

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE FILOSOFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA

Fábio Luís Pedroso

Perspectivas de valor e desenvolvimento tecnológico e
científico do cimento: motivações passadas, presentes e
futuras

(Versão corrigida)

São Paulo
2018

Fábio Luís Pedroso

Perspectivas de valor e desenvolvimento tecnológico e científico do cimento: motivações passadas, presentes e futuras

Versão corrigida

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia do Departamento de Filosofia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Filosofia sob a orientação do Prof. Dr. Marcos Barbosa de Oliveira.

De acordo _____
(14/setembro/2018)

São Paulo
2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

Pedroso, Fábio Luís

P372p Perspectivas de valor e desenvolvimento tecnológico e científico do cimento: motivações passadas, presentes e futuras / Fábio Luís Pedroso ; orientador Marcos Barbosa de Oliveira. - São Paulo, 2018.

309 p.

Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Departamento de Filosofia. Área de concentração: Filosofia.

1. valores. 2. ciência. 3. filosofia da ciência. 4. cimento. 5. pesquisa interdisciplinar. I. Oliveira, Marcos Barbosa de, orient. II. Título.

Folha de Aprovação

PEDROSO, FÁBIO LUÍS. Perspectivas de valor e desenvolvimento tecnológico e científico do cimento: motivações passadas, presentes e futuras. 2018. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Departamento de Filosofia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

Aprovado em: 01 de agosto de 2018

Banca Examinadora

Prof. Dr.: Marcos Barbosa de Oliveira – FE – USP (Presidente)

Prof. Dr.: Sérgio Cirelli Ângulo – EP – USP (Titular)

Prof. Dr.: Hugh Matthew Lacey – FFLCH – USP (Titular)

Prof. Dr.: Cristiano Cordeiro Cruz – Externo (Titular)

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me incentivaram a trilhar o caminho do conhecimento.

Agradecimentos

Muito especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Barbosa de Oliveira, por ter acreditado no projeto, me guiado com valiosas contribuições e persistido comigo nas dificuldades.

À Profa. Dra. Maria Alba Cincotto, por sua revisão do segundo capítulo, que deu clareza e precisão aos conceitos.

Ao Prof. Dr. Hugh Matthew Lacey, por sua profusão de artigos e palestras, principalmente suas conferências no Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo, que auxiliaram no entendimento do modelo teórico de referência.

Ao Prof. Dr. Sérgio Cirelli Angulo, por suas aulas e intervenções nos seminários na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, bem como por suas dicas e orientações de como organizar a pesquisa e enriquecer a análise dos dados e informações no Exame de Qualificação.

Aos Prof. Dr. Pablo Rubén Mariconda e Prof. Dr. Valter Alnis Bezerra, por suas aulas e intervenções nos seminários na Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, que ajudaram a compor o quadro das discussões no campo da filosofia da ciência.

A ciência é em si mesmo um valor [...]: conhecimento (verdade) é um valor; a ciência informa práticas que produzem valor; sua própria prática requer o exercício da racionalidade, um valor universal (Nagel, 1961), ou, de modo mais geral, cultiva nos seus praticantes características que facilitam o florescimento humano ou o bem-estar (Putnam, 1981, 1990); a ciência cria beleza (Poincaré, 1920/1958).

**Hugh Lacey (1999, p. 17, tradução
nossa)**

RESUMO

PEDROSO, F.L. **Perspectivas de valor e desenvolvimento tecnológico e científico do cimento: motivações passadas, presentes e futuras**. 2018. 309 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Departamento de Filosofia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

Nesta dissertação buscamos aplicar o modelo das interações entre as atividades científicas e os valores de Hugh Lacey ao campo das pesquisas tecnocientíficas sobre o cimento, a fim de verificar suas principais teses. Dois tipos de abordagens foram adotadas: a análise interpretativa de episódios-chave do desenvolvimento científico e tecnológico do cimento à luz do modelo teórico de referência; e a análise interpretativa das iniciativas do setor, em termos de processos tecnológicos e de estratégias de pesquisa, para reduzir suas emissões de gás carbônico até 2050. As principais conclusões a que chegamos com essas abordagens são: o campo de pesquisas sobre cimentos tem elementos para corroborar o modelo laceyano, na medida em que é caracterizado por pesquisas tecnocientíficas sob estratégias descontextualizadoras, fecundas e úteis, em relações mutuamente reforçadoras com as perspectivas de valor do progresso tecnológico e do capital e mercado, que preservam a imparcialidade, mas que não asseguram nem a autonomia nem a neutralidade no campo; e as iniciativas do setor cimenteiro para reduzir suas emissões de CO₂ baseiam-se na conjunção hierárquica das perspectivas de valor do progresso tecnológico, do capital e mercado, e da sustentabilidade, cujas pressuposições até o momento carecem de comprovação empírica.

Palavras-chave: valores e atividades científicas; estratégias de pesquisa; estratégias tecnológicas; cimentos; pegada de carbono.

ABSTRACT

PEDROSO, F.L. **Value Perspectives and technological and scientific development of cement: past, present and future motivations**. 2018. 309 p. (Master Degree) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Departamento de Filosofia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

In this dissertation we undertake the application of Hugh Lacey's model of interactions between values and scientific activities to the field of cement techno-scientific research with the purpose of verifying its basic theses. Two approaches are followed: an interpretative analysis of the key episodes of the scientific and technological development of cements in the light of the model; and an interpretative analysis of the cement sector initiatives, in terms of technological processes and scientific strategies, for reductions of CO₂ emission up to 2050. The main conclusions are: the field holds elements for corroboration of the model as it is characterized for techno-scientific research based on materialist strategies, fruitful and useful, in mutual relationship with value perspectives of technological progress and of capital and market, that preserves impartiality but neither autonomy nor neutrality in the field; and the cement sector initiatives for CO₂ mitigation are based on an hierarchical conjunction of value perspectives of technological progress, of capital and market, and of sustainability, whose presuppositions so far lacked empirical corroboration.

Key Words: values and scientific activities; research strategies; technological strategies; cements; carbon footprint.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Farol de Eddystone, 1759, xilogravura de Edward Rooker a partir de desenho de Smeaton.....106
- Figura 2 – Fórmula estrutural assinalada por Meyer para o composto silicato tricálcico.....163
- Figura 3 – Fórmulas estruturais assinaladas por Meyer para o composto silicato dicálcico.....164
- Figura 4 - Diagrama de fluxo de energia, gases e particulados no processo manufatura de cimento.....195

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Mudanças nos níveis de insumos materiais na economia do Reino Unido.....	204
Tabela 2 - Anos de pico no uso de oito insumos pela economia do Reino Unido.....	205
Tabela 3 - Compilação das emissões de CO ₂ (e sua distribuição entre RM-CO ₂ , IEB-CO ₂ e DEB-CO ₂), SO _x , NO _x e CKD derivadas da produção de cimento ou clínquer, com base nos dados de revisão bibliográfica.....	209
Tabela 4 - Uso de energia para diferentes tipos de fornos com base na literatura.....	211
Tabela 5 - Estimativas de consumo elétrico específico por tipo de plantas de cimento para 2009, 2014, 2030 e 2050.....	220
Tabela 6 - Estimativas de consumo térmico específico por tipo de forno de cimento para os anos de 2008, 2009, 2014, 2030 e 2050 e da respectiva intensidade de carbono.....	222
Tabela 7 - Valores de emissões líquidas de CO ₂ em massa (gramas) por energia consumida (em milhões de joules) para diferentes combustíveis usados na planta de cimento.....	226
Tabela 8 - Potencial de uso de matérias-primas alternativas pela indústria cimenteira e estimativa de seu impacto na redução das emissões de CO ₂ pelo setor.....	236

Tabela 9 - Estimativas de custos para captura de carbono por pós-combustão usando tecnologias de absorção química para uma planta de cimento com produção anual de dois milhões de toneladas.....	241
Tabela 10 - Estimativas das taxas de substituição de clínquer por SCM e seu impacto nas variações de consumo específico de energia térmica e elétrica, e de intensidade específica de emissões de CO ₂ até 2050.....	254
Tabela 11 - Estimativas do fator clínquer para os anos 1990, 2014, 2030 e 2050.....	259
Tabela 12 – Percentual máximo de abatimento nas emissões de CO ₂ na produção dos novos aglomerantes em relação às emissões de gás carbônico na produção de cimento Portland comum.....	271

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Consumo, importação e produção de cimento Portland nos Estados Unidos entre 1883 e 1902.....	148
Gráfico 2 – Evolução do preço do cimento Portland nos Estados Unidos entre 1893 e 1913 – preços médios para todo o país, em centavos de dólar por barril.....	149
Gráfico 3 – Evolução da resistência à compressão do cimento Portland de 1850 a 1950, na qual três períodos de desenvolvimento são demarcados – sua fabricação artesanal na Inglaterra, sua produção mais qualificada na Alemanha, com a introdução da análise química qualificada das matérias-primas, e sua produção avançada no mundo, com a introdução do forno rotatório e das técnicas e conhecimentos advindos da química do cimento.....	152
Gráfico 4 - Comparação da produção de cimento e aço com a população.....	192
Gráfico 5 - Tendências na produção <i>per capita</i> de cimento por regiões.....	193
Gráfico 6 - Cenário de alta demanda do IEA para o consumo futuro de cimento por região.....	194
Gráfico 7 - Evolução da produção de cimento e das emissões de CO ₂ entre os participantes do GNR, passando pelos anos 1990, 2000, 2005 e 2006.....	200
Gráfico 8 - Médias das emissões líquidas de CO ₂ por tonelada de cimento em 1990, 2000, 2005 e 2006 entre os participantes do GNR.....	201

Gráfico 9 - Projeções das reduções das emissões de CO ₂ no setor cimenteiro de 2006 a 2050 pela incorporação das tecnologias da eficiência energética, uso de combustíveis alternativos, substituição de clínquer por SCM e captura e armazenamento de carbono, nos cenários de baixa e alta demanda por cimento.....	203
Gráfico 10 - Evolução da produção de clínquer por tipo de forno entre os participantes do GNR.....	212
Gráfico 11 - Gráfico do consumo específico médio de energia elétrica numa planta de cimento em função da distribuição cumulativa de frequências da planta mais eficiente para a menos eficiente nos anos de 1990, 2000, 2010, 2013 e 2014.....	216
Gráfico 12 - Gráficos com as projeções de consumo de energia térmica e elétrica para uma planta de cimento com a incorporação nos fornos das tecnologias mais avançadas.....	219
Gráfico 13 - Gráfico das emissões específicas brutas de CO ₂ em função da distribuição cumulativa de frequências da planta mais eficiente para a menos eficiente entre os participantes do GNR nos anos de 1990, 2000, 2010, 2005 e 2006.....	223
Gráfico 14 - Estimativas do uso de combustíveis alternativos no período de 2006 a 2050 para países desenvolvidos e em desenvolvimento.....	229
Gráfico 15 - Custos estimados para tecnologias de captura e estoque de carbono (pós-combustão e uso de oxigênio nos fornos).....	237

Gráfico 16 - Estimativas da disponibilidade de SCM em comparação com o montante de cimento produzido.....	247
Gráfico 17 - Porcentagem de conteúdo de fíler de calcário no cimento para várias regiões.....	252
Gráfico 18 - Potencial de mitigação de uma combinação de 25% a 35% de argila calcinada com 15% de fíler calcário em função da fatia de mercado para o cenário de baixa demanda em 2050.....	257
Gráfico 19 - Potencial de mitigação para taxa de substituição de clínquer por fíler calcário variando entre 25% e 35%, com uso de dispersantes, em função da fatia de mercado para o cenário de baixa demanda em 2050.....	258
Gráfico 20 - Estimativas do potencial de mitigação dos novos aglomerantes para o ano de 2050, em função da fatia de mercado desses novos cimentos, para o cenário de baixa demanda do IEA ETP 2016.....	277

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	33
1.0 MODELO DAS INTERAÇÕES ENTRE AS ATIVIDADES CIENTIFICAS E OS VALORES.....	41
1.1 Método científico e valores cognitivos.....	45
1.2 Estratégias de restrição e seleção como terceiro nível das práticas científicas.....	52
1.3 Refutação da metafísica materialista e suas implicações.....	58
1.4 Quadro conceitual para entender os valores e as perspectivas de valor no modelo laceyano.....	63
1.5 Relações mutuamente reforçadoras entre estratégias descontextualizadoras e perspectivas de valor do progresso tecnológico.....	67
1.6 Abordagem multiestratégica para a ciência.....	73
1.7 Discussão da neutralidade na ciência.....	78
1.8 Cinco momentos da prática científica.....	85
1.9 Autonomia localizada.....	87
2.OS VALORES E O DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E CIENTIFICO DO CIMENTO.....	93
2.1 Primórdios do uso de argamassas.....	96
2.2 Tipos de conhecimento envolvidos na produção e uso das argamassas de cal e cimento.....	98
2.3 O cimento usado na construção do Farol de Eddystone.....	102
2.4 As investigações de Smeaton.....	108
2.5 Traços metodológicos das investigações de Smeaton.....	114
2.6 O patenteamento do cimento natural.....	124
2.7 Os experimentos para produzir cimento artificial.....	128
2.8 Comparação entre as pesquisas de Vicat e de Smeaton.....	134
2.9 Análise filosófica das pesquisas de Vicat.....	139
2.10 A invenção do cimento moderno.....	144

2.11 Estudos relativos à composição química dos constituintes do cimento Portland.....	153
2.12 Programas experimentais sobre a constituição química do cimento Portland.....	165
3. A SUSTENTABILIDADE E AS ESTRATEGIAS DE PESQUISA SOBRE CIMENTOS E NOVOS AGLOMERANTES.....	177
3.1 A emergência do valor da sustentabilidade.....	178
3.2 O impacto ambiental do setor cimenteiro e as iniciativas para sua redução.....	191
3.3 Estratégias para redução das emissões de CO₂.....	208
<u>3.3.1 Eficiência energética na produção de clínquer.....</u>	<u>210</u>
<u>3.3.2 Uso de combustíveis alternativos.....</u>	<u>224</u>
<u>3.3.3 Uso de matérias-primas alternativas.....</u>	<u>232</u>
<u>3.3.4 Captura, uso e estocagem de carbono.....</u>	<u>236</u>
<u>3.3.5 Substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares e fíleres.....</u>	<u>245</u>
<u>3.3.6 Novos aglomerantes</u>	<u>262</u>
3.3.6.1 Cimentos alternativos com menos conteúdo de cálcio.....	263
3.3.6.2 Cimentos alternativos sem conteúdo de cálcio.....	273
CONCLUSÃO.....	279
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	302

INTRODUÇÃO

O objetivo desta dissertação é investigar os papéis dos valores cognitivos e não cognitivos nas pesquisas tecnocientíficas sobre o cimento, material-chave para a construção de edificações e infraestruturas das sociedades modernas, por suas propriedades aglomerantes, sua fabricação a partir de matérias-primas abundantes e bem distribuídas, e seus preços acessíveis às populações de baixa renda.

A investigação toma como referência teórico-metodológica o modelo das interações entre as atividades científicas e os valores desenvolvido por Hugh Lacey. Segundo este modelo, as atividades científicas são marcadas por cinco momentos distintos: a adoção de uma estratégia de pesquisa (estratégia de restrição e seleção), o desenvolvimento da pesquisa, a avaliação de teorias, a difusão dos resultados científicos e a aplicação do conhecimento científico. No primeiro, segundo, quarto e quinto momentos, as atividades científicas são legitimamente influenciadas por valores não cognitivos, isto é, valores morais, éticos, sociais e políticos. Esses valores, reunidos e organizados em perspectivas de valor socialmente endossadas, orientam os cientistas sobre quais estratégias de restrição e seleção adotar, isto é, sobre os tipos de fenômenos a serem investigados, as categorias teórico-metodológicas a serem usadas para sua explicação, os tipos de dados empíricos a serem levantados e as categorias descritivas apropriadas para fazer os relatos observacionais e experimentais, tendo em vista o domínio de fenômenos e as possibilidades de interesse de uma determinada coletividade e o potencial de aplicação do entendimento dos fenômenos e possibilidades desse domínio para resolver problemas práticos da vida social, ou seja, para o desenvolvimento, introdução, operação e manutenção de tecnologias. Sendo assim, a neutralidade e a autonomia da ciência, ideais reivindicados para a atividade científica, precisam ser reformuladas dentro do modelo laceyano.

Segundo o modelo teórico de referência a ciência moderna, em seus quatro séculos de sucesso na investigação dos fenômenos da natureza, tem considerado quase exclusivamente as possibilidades desses fenômenos enquanto abstraídos de seus contextos sociais, históricos e ecológicos. Isto porque a finalidade da ciência moderna seria entender os fenômenos para poder controlá-los. Guiada por esta perspectiva de valor do controle da natureza, a ciência moderna tem buscado

conhecer as estruturas, processos e leis subjacentes aos fenômenos por meio do isolamento deles em espaços experimentais sob condições controladas. Seu ideal é o de representar o mundo tal como ele é, independentemente das percepções, emoções, ações, interesses e valores associados às práticas humanas, lançando mão de estratégias descontextualizadoras de restrição e seleção. Por meio delas a ciência moderna progrediu tanto em termos da geração de conhecimento sobre a ordem subjacente aos fenômenos naturais, quanto em termos da aplicação desse conhecimento em projetos da vida social, diversificando avassaladoramente as tecnologias presentes em cada vez mais aspectos do mundo da vida.

O sucesso da ciência é inegável. No entanto, os produtos teóricos e práticos dessas estratégias descontextualizadoras não têm atendido igualmente e satisfatoriamente à diversidade de grupos sociais que compõem a humanidade, mas sobretudo àqueles caracterizados pela perspectiva moderna do controle dos objetos naturais, isto é, as sociedades nas quais o valor do controle da natureza é um valor predominante, não subordinado a nenhum outro valor social. Por outro lado, têm emergido recentemente estratégias de pesquisa científica que consideram outras perspectivas de valor na condução da investigação, como a agroecologia, nas quais o valor do controle dos objetos naturais é subordinado a outros valores sociais, como a justiça social, a participação democrática e a sustentabilidade. Ao reconhecer os papéis dos valores não cognitivos nas atividades científicas, Lacey procura inserir as pesquisas e os interesses científicos em contextos sociais, históricos e ecológicos, valorizando estratégias de pesquisa sensíveis ao contexto, ao lado das estratégias descontextualizadoras, e, com isso, tornar a ciência um bem público da humanidade.

Na argumentação desenvolvida por Lacey, a autonomia da ciência, definida como ausência de interferência de interesses, poderes e valores externos à comunidade científica, é um ideal indefensável, já que todas as estratégias de pesquisa mantêm relações mutuamente reforçadoras com perspectivas de valor (as estratégias descontextualizadoras, em particular, com a perspectiva moderna do controle). Porém, a neutralidade da ciência, definida como a capacidade do estoque de conhecimento científico servir a uma ampla gama de perspectivas viáveis de valor, apesar de se manifestar atualmente em grau muito baixo nas atividades científicas modernas, pode vir a adquirir maior grau de concretização com a diversificação das estratégias de pesquisa na ciência (pluralismo metodológico), a

partir do momento em que a multiplicidade de perspectivas de valor que caracteriza a humanidade for contemplada pela ciência.

Segundo o modelo das interações, independentemente de os cientistas adotarem estratégias descontextualizadoras ou estratégias sensíveis ao contexto, as teorias formuladas a partir delas precisam ser avaliadas exclusivamente pelos valores cognitivos, como a adequação empírica, a consistência, o poder explicativo e preditivo, entre outros. No momento de avaliação das teorias científicas não há qualquer papel para os valores não cognitivos, sob pena de as teorias não proporcionarem um adequado entendimento sobre os fenômenos. Com a distinção entre os valores cognitivos e não cognitivos, Lacey assegura a imparcialidade no juízo científico, separando o momento de aceitação das teorias dos momentos de escolha da estratégia, desenvolvimento da pesquisa, difusão dos resultados científicos e de aplicação do conhecimento científico.

Esse modelo das interações entre as atividades científicas e os valores é desenvolvido e comentado no primeiro capítulo desta dissertação.

Aplicar esse modelo ao campo das pesquisas tecnocientíficas sobre o cimento, com vistas a verificar se suas principais teses podem ou não ser sustentadas, foi a motivação principal deste trabalho. Iniciativas deste tipo já foram empreendidas por Lacey e por grupos de trabalho que tomam como referência seu modelo. No entanto, a maioria dessas iniciativas volta-se ao campo das pesquisas tecnocientíficas em agricultura, onde é possível demarcar nitidamente pesquisas guiadas por estratégias descontextualizadoras (agrobiotecnologia) e pesquisas sob estratégias sensíveis ao contexto (agroecologia).

Essa aplicação do modelo laceyano ao campo das pesquisas sobre o cimento considerou dois tipos de abordagens, expostas no segundo e terceiro capítulos desta dissertação. Com vistas a caracterizar o objeto de estudo desta dissertação, no segundo capítulo colocamos no foco alguns dos episódios-chave do desenvolvimento científico e tecnológico do cimento, procurando interpretá-los, na medida do possível, à luz do modelo teórico de referência. Neste panorama histórico-filosófico, procuramos demonstrar as seguintes proposições. O conhecimento tradicional sobre cales e cimentos, cuja origem e desenvolvimento remontam à Era Neolítica, pode ser devidamente caracterizado como científico, por seu caráter empírico e sistemático. Os traços da moderna metodologia científica já

podem ser encontrados nas investigações de Smeaton (1724-1782) para encontrar a argamassa hidráulica mais apropriada para seu propósito construtivo de edificação do Farol de Eddystone, no século XVIII. As pesquisas sobre as cales e cimentos desde então, para além de seu caráter teórico de entender as causas subjacentes ao fenômeno da hidraulicidade (portanto, pesquisas sob estratégias descontextualizadoras em relações mutuamente reforçadoras com a perspectiva de valor do controle da natureza), buscaram sobretudo inovações e patentes, sendo, portanto, caracterizadas como pesquisas tecnocientíficas comercialmente orientadas (ou seja, pesquisas influenciadas pela perspectiva de valor do capital e mercado). Com a mobilização do instrumental teórico e metodológico da química moderna, baseado em estratégias descontextualizadoras, Vicat (1786-1861) teve sucesso em rastrear as proporções de calcário e argila nas rochas calcárias e, com isso, produzir pela primeira vez cimentos artificiais a partir do controle das proporções dessas espécies químicas, contribuindo, assim, com as patentes dos modernos cimentos Portland e com o desenvolvimento de sua indústria (relações mutuamente reforçadoras entre teoria e prática na pesquisa). E, por fim, o desenvolvimento técnico dos cimentos Portland decorreu das pesquisas tecnocientíficas subsequentes sobre a constituição e a caracterização de seus constituintes, principalmente com as investigações de Le Chatelier (1850-1936) e dos Programas do Laboratório Geofísico da Instituição Carnegie em Washington e do Escritório de Padronização dos Estados Unidos, nas quais as estratégias descontextualizadoras foram incrementadas com a introdução do microscópio e do princípio da regra de fase nos estudos da química dos cimentos, o que as tornou fecundas e úteis, duas condições necessárias para seu endossamento e que, portanto, contribuíram para a consolidação do campo de pesquisa da química de cimentos.

A principal conclusão a que chegamos no segundo capítulo é que as pesquisas tecnocientíficas para o desenvolvimento do cimento podem ser caracterizadas por estratégias descontextualizadoras fecundas e úteis em relações mutuamente reforçadoras com as perspectivas de valor do progresso tecnológico (que valorizam o controle dos objetos materiais) e do capital e mercado (que valorizam inovações, patentes e pesquisas tecnocientíficas comercialmente orientadas), conforme o modelo das interações.

Dessa forma, o status da imparcialidade, da neutralidade e da autonomia das atividades tecnocientíficas relacionadas ao desenvolvimento do cimento foi discutido

e avaliado no segundo capítulo. A conclusão geral a que chegamos foi que a imparcialidade é, na maioria das vezes, preservada na investigação científica no campo, mas que nem a autonomia nem a neutralidade dessas pesquisas são asseguradas.

No terceiro capítulo, procuramos entender como a perspectiva emergente de valor da sustentabilidade ajusta-se às perspectivas tradicionais de valor do progresso tecnológico e do capital e mercado no campo da pesquisa e desenvolvimento do cimento, compondo o quadro institucional, político, econômico e social no interior do qual são tomadas as decisões quanto às estratégias tecnológicas e às estratégias de restrição e seleção para se alcançar o desenvolvimento sustentável no setor cimenteiro. Este ajuste entre perspectivas de valor para reorientar a pesquisa científica e o desenvolvimento tecnológico é uma das teses do modelo laceyano, comprovada para o campo da agroecologia. Nosso propósito no terceiro capítulo foi mostrar que a emergência e consolidação recente da perspectiva de valor da sustentabilidade nas sociedades contemporâneas têm mudado o panorama de desenvolvimento tecnológico na indústria cimenteira nos últimos anos e aberto o campo de pesquisas sobre cimentos e aglomerantes para novas estratégias de restrição e seleção.

O processo de fabricação do cimento é intensivo em recursos materiais e energéticos, e produz poluentes e dióxido de carbono, responsáveis por impactos ambientais locais, regionais e globais. As estimativas indicam que o setor cimenteiro é atualmente responsável por, no mínimo, cerca de 5% das emissões antropogênicas de CO₂ na atmosfera. Essas emissões vêm principalmente dos processos de descarbonatação do calcário, matéria-prima para a fabricação de cimento, e da queima de combustíveis fósseis nos fornos de cimento, que perfazem uma taxa atual de 842 quilogramas de CO₂ por tonelada de clínquer produzida (o clínquer é o principal componente do cimento).

Com a perspectiva de crescimento da população mundial e da economia dos países em desenvolvimento, a demanda por cimento deve continuar a crescer, atingindo cerca de 6 bilhões de toneladas por ano em 2050, num cenário de alta demanda, que considera que a produção de cimento crescerá a uma taxa similar ao crescimento da população mundial, assunção bem fácil de ser alcançada e superada, tendo em vista que a demanda por cimento cresceu 10 vezes mais do que

o crescimento da população mundial de 1950 a 2015. Com isso, as previsões são que as emissões de CO₂ devem crescer até 260% em 2050 em relação ao ano de 1990, num cenário econômico sem mudanças (*business as usual*).

Essa tendência de crescimento das emissões absolutas de CO₂ pelo setor cimenteiro contraria a principal recomendação do Painel Intergovernamental das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (IPCC): cortar pela metade as emissões globais de CO₂ até 2050, em relação aos níveis de 1990, para evitar o aumento superior a dois graus Celsius em relação à temperatura média da Terra na era pré-industrial.

Com vistas a contribuir com o abatimento das emissões de CO₂, algumas companhias cimenteiras mundiais reuniram-se na Iniciativa Cimenteira para a Sustentabilidade (CSI), em 1999, criando um protocolo para medir e reportar suas emissões de dióxido de carbono e estruturando um banco de dados quanto ao desempenho de suas plantas em relação ao consumo de energia e emissões de CO₂ (GNR), não restrito a seus membros, mas aberto a todas as companhias cimenteiras que queiram contribuir com as estatísticas. A iniciativa mais importante da CSI foi elaborar, junto com a Agência Internacional de Energia (IEA), em 2009, um mapeamento das tecnologias de baixo carbono, que dispendo de suporte científico, já poderiam ser aplicadas em larga escala nas plantas de cimento. Quatro soluções tecnológicas para a redução das emissões de CO₂ no setor são destacadas: a eficiência térmica e elétrica das plantas de cimento, o uso de combustíveis alternativos nos fornos, a substituição do clínquer por materiais cimentícios suplementares e fíleres, e a captura e estoque de carbono (CCS). Segundo o mapeamento, essas estratégias tecnológicas aplicadas conjuntamente poderiam reduzir as emissões do setor em 18% em 2050 em relação ao ano base de 2006, revertendo, assim, uma tendência de crescimento nas projeções das emissões de CO₂ pelo setor.

Essas iniciativas tecnológicas e as pesquisas tecnocientíficas que elas têm implicado perseguem a via da ecoeficiência do desenvolvimento sustentável. Essa via busca atender à demanda global crescente por produtos, sem acarretar o aumento no uso de recursos materiais e energéticos, e o aumento nas emissões de poluentes ambientais e gases do efeito estufa, por meio da pesquisa, desenvolvimento e implantação de tecnologias mais eficientes em termos de impactos ambientais. O pressuposto fundamental da adoção da via da ecoeficiência

no setor cimenteiro é o de que as soluções tecnológicas disponíveis e em desenvolvimento serão suficientes para contrabalançar o impacto ambiental decorrente do aumento da população mundial e do consumo *per capita* por cimento no cenário futuro. Essa via da ecoeficiência e sua pressuposição fundamental têm também orientado as pesquisas tecnocientíficas sobre aglomerantes alternativos ao cimento Portland, soluções tecnológicas que, apesar de não contempladas no mapeamento tecnológico de 2009 do setor cimenteiro, entram no relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA/UNEP) sobre cimentos ecoeficientes, lançado em 2016, e devem entrar na próxima atualização do mapeamento tecnológico do setor cimenteiro.

Nesse capítulo todos esses conceitos e teses, suas relações e pressuposições, serão analisados e discutidos à luz do modelo laceyano. Mostraremos como a via da ecoeficiência do desenvolvimento sustentável ajusta as perspectivas de valor do progresso tecnológico, do capital e mercado, e da sustentabilidade, criando o quadro institucional, político, econômico e social que têm orientado as pesquisas tecnocientíficas comercialmente orientadas sobre cimentos e novos aglomerantes por meio de relações mutuamente reforçadoras com as estratégias descontextualizadoras sob as quais essas pesquisas são realizadas. Serão avaliados os pesos dos aspectos econômico, social e ambiental do desenvolvimento sustentável endossado pelo setor cimenteiro, que tem balizado a adoção de tecnologias mais ecoeficientes e a pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias. Colocaremos em perspectiva crítica os resultados que têm sido alcançados com essas pesquisas e desenvolvimentos, bem como as projeções estatísticas feitas para endossar a via da ecoeficiência no setor cimenteiro.

Em síntese, podemos dizer que a principal contribuição do modelo laceyano nessa análise das estratégias e pesquisas que têm sido adotadas pelo setor cimenteiro para reduzir suas emissões de CO₂ no longo prazo foi lançar luz sobre seus fundamentos. Poderemos constatar que elas se baseiam em valores não cognitivos advindos da conjunção das perspectivas de valor do progresso tecnológico, do capital e mercado, e da sustentabilidade, cujos pressupostos fundamentais carecem de comprovação empírica. Diante da margem cada vez mais estreita para o gerenciamento humano das mudanças climáticas, a comprovação ou refutação desses pressupostos torna-se a cada dia mais urgente. Nesse contexto, o

modelo laceyano parece ter o mérito de alertar os pesquisadores envolvidos com tais estratégias a concentrarem seus esforços para que no curto prazo elas sejam capazes de demonstrar sua efetividade no abatimento das emissões absolutas de CO₂ pelo setor e, assim, indicarem se serão ou não suficientes para cumprir as metas de reduções estabelecidas pelo setor em 2030 e 2050.

1. O MODELO DAS INTERAÇÕES ENTRE AS ATIVIDADES CIENTÍFICAS E OS VALORES

A tradição científica moderna sustenta que a ciência é livre de valores pessoais, éticos, sociais, culturais e políticos, por consistir em práticas baseadas numa metafísica, epistemologia e metodologia que, combinadas, garantiriam o conhecimento dos fenômenos do mundo em abstração dos lugares que possam ter nos espaços humanos, estes sim permeados por valores e por categorias intencionais. Essa prática científica moderna asseguraria, assim, a imparcialidade (o juízo isento e correto na escolha e aceitação de teorias) e a neutralidade na ciência (a aplicação e a significação equiparadas das teorias científicas em relação à diversidade de grupos, comunidades e sociedades, ou seja, em relação à diversidade de valores e perspectivas de valor, o que faria com que a ciência fosse bem comum e patrimônio da humanidade). Com vistas a assegurar essa imparcialidade e neutralidade da ciência moderna e em razão do seu sucesso crescente em explicar os fenômenos do mundo e em gerar aplicações úteis de seus resultados no mundo da vida, a prática científica moderna adquiriu social e institucionalmente autonomia, isto é, aos cientistas foi conferida a liberdade para escolher seus objetos de estudo, seus problemas, programas e métodos de investigação, bem como a autoridade exclusiva para fazer seus juízos acerca das teorias e hipóteses propostas. Imparcialidade, neutralidade e autonomia são os componentes principais da ideia de que a ciência é livre de valores.

Recentemente cada um desses componentes da ideia de ciência livre de valores foi criticado. A imparcialidade, enquanto escolha sem ambiguidade de teorias com base em dados empíricos e em certas regras lógicas e epistemológicas, na ausência de uma concordância quanto a essas regras, foi assumida simplesmente como escolha e aceitação de teorias para domínios de fenômenos com base num diálogo nas comunidades científicas sobre o grau de manifestação de certos valores cognitivos. Essa noção de imparcialidade da ciência admite discordância entre as comunidades científicas e dentro de uma comunidade científica quanto aos valores cognitivos válidos, sua ordem de importância e seu grau de manifestação adequado em teorias. Por isso, a lista de valores cognitivos na ciência não é fixa nem igual para todos os cientistas, havendo inclusive divergências quanto ao significado atribuído a cada valor cognitivo. Por exemplo, a adequação

empírica, valor cognitivo por excelência, pode assumir variadas significações, em função das estratégias de restrição e seleção adotadas por uma determinada comunidade ou grupo científico, segundo Hugh Lacey, um dos autores dessa corrente filosófica e criador do modelo teórico de referência desta dissertação. Essas estratégias consistem numa dupla seletividade imposta por uma comunidade científica aos dados empíricos de interesse e às teorias consideradas para avaliação. Elas apontam para os tipos relevantes de dados empíricos a ser buscados numa investigação científica, para as categorias descritivas apropriadas para fazer os relatos observacionais e para a natureza das teorias científicas a ser formuladas para explicar os dados levantados. São o terceiro elemento metodológico da prática científica, ao lado dos dados empíricos e das teorias, consistindo em perspectivas teórico-metodológicas a partir das quais olhamos para o mundo, para suas possibilidades de interesse.

A neutralidade da ciência, do ponto de vista de consequências lógicas das teorias científicas, derivadas de uma ordem subjacente ontologicamente independente do ser humano, postulada pela metafísica materialista, não pode ser teoricamente mantida, devido às fracassadas tentativas filosóficas para se estabelecer “a priori” ou “a posteriori” essa metafísica. Consequentemente, as estratégias de restrição e seleção predominantes hoje na ciência moderna, que restringem as teorias científicas àquelas que representam os fenômenos como gerados por uma ordem subjacente ontologicamente independente das práticas humanas e que selecionam os dados àqueles que descrevem os fenômenos quantitativamente, como resultados de operações instrumentais, experimentais e de medida (estratégias descontextualizadoras) deixaram de ser valor cognitivo, isto é, deixaram de estar associadas aos objetivos da ciência, segundo o modelo laceyano.

Na ausência da metafísica materialista, as estratégias descontextualizadoras ficaram carentes de uma justificação apropriada. Uma das possibilidades para sua justificação foi atrelá-las aos valores não cognitivos, como os valores sociais. Nesta interpretação, as perspectivas de valor, que caracterizam diferentes grupos sociais, seriam determinantes na escolha de estratégias de restrição e seleção usadas nas pesquisas científicas. Haveria relações mutuamente reforçadoras entre as perspectivas de valor e as estratégias de restrição e seleção. Essa é uma das teses principais do modelo das interações entre as atividades científicas e os valores não

cognitivos proposto pelo filósofo Hugh Lacey, modelo teórico de referência dessa dissertação de mestrado.

Como os interesses dominantes nas sociedades modernas estão associados ao controle dos objetos materiais e às relações econômicas de mercado, que permeiam quase todos os aspectos de nossa vida social, a prática científica moderna é quase exclusivamente caracterizada por estratégias descontextualizadoras (que mantêm relações mutuamente reforçadoras com a perspectiva do progresso tecnológico, uma vez que o conhecimento científico gerado a partir dessas estratégias é profícuo em gerar aplicações tecnológicas) e crescentemente atravessada pela interpenetração entre ciência e tecnologia (tecnociência¹) orientada para o mercado (que mantêm relações mutuamente reforçadoras com a perspectiva do capital e do mercado, uma vez que o objetivo dessa tecnociência comercialmente orientada é gerar patentes e inovações). Dessa forma, a ciência moderna não seria neutra nem autônoma.

Apesar de reconhecer a importância das estratégias descontextualizadoras para a ciência, devido à sua fecundidade (capacidade de gerar crescentemente teorias que manifestem os valores cognitivos no mais alto grau possível, segundo os padrões mais rigorosos disponíveis de avaliação) e utilidade (capacidade de gerar crescentemente teorias que expliquem os fenômenos relevantes no mundo da vida de uma comunidade e que resolvam problemas práticos da vida social dessa comunidade), Lacey argumenta que essas estratégias não são capazes de gerar conhecimento das possibilidades não abstraídas dos fenômenos do mundo nem de atender aos interesses de perspectivas alternativas às perspectivas do progresso tecnológico e do capital e mercado. Por isso, para ele, a ciência moderna encontra-se atualmente limitada em seus objetivos, não sendo regulada pelos ideais da abrangência (valor da prática científica de gerar crescentemente teorias aceitas segundo a imparcialidade para um número cada vez maior de domínios de fenômenos) e da neutralidade. No sentido de resgatar esses ideais, endossados pela tradição científica moderna, Lacey propõe, para a prática científica, além das

¹ O termo “tecnociência” é usado neste trabalho no sentido de uma relação íntima entre ciência e tecnologia que leva a uma desconfiguração dos limites desse cruzamento. Ele é usado em contextos onde a ciência aplicada e a ciência pura não podem ser separadas. Não é o propósito desta dissertação discutir o termo, criado e usado a partir da década de 1980 pelo campo interdisciplinar de estudos sociais da ciência e tecnologia, e suas problematizações, mas se apropriar dele enquanto conceito consistente com o modelo teórico de referência deste trabalho e pertinente para entender certos contextos históricos que serão descritos e analisados nesta dissertação.

estratégias descontextualizadoras, as estratégias sensíveis ao contexto, nas quais os objetos de estudo não são abstraídos de suas relações humanas, sociais, ecológicas e cósmicas. Com as estratégias sensíveis ao contexto, a ciência adquire a capacidade de investigar as possibilidades não abstraídas dos fenômenos e pode atender aos interesses de perspectivas de valor nas quais o controle da natureza e as relações mercantis não são centrais, como, por exemplo, as perspectivas de valor da justiça social, da sustentabilidade e da democracia participativa. Com elas, a ciência torna-se capaz de lidar não apenas com as questões de eficácia das inovações tecnológicas, mas também com questões de legitimidade de sua adoção no mundo da vida. Por sua vez, as estratégias sensíveis ao contexto podem também ser usadas para investigar cientificamente os próprios pressupostos das perspectivas de valor, como os pressupostos do progresso tecnológico, atualmente legitimados ideologicamente nas instituições das sociedades modernas.

Para nosso autor, o desafio atual para a ciência é provar que, além das estratégias descontextualizadoras, as estratégias sensíveis ao contexto são também fecundas e úteis, e, com isso, que a prática científica deveria aderir à abordagem multiestratégia, no interior da qual cada estratégia de restrição e seleção adotada por um grupo social, em função das relações mutuamente reforçadoras entre essa estratégia e sua perspectiva de valor, atenderia aos interesses desse grupo social em certas possibilidades do mundo. A ciência assim caracterizada consistiria num objeto de valor para cada complexo viável de valor, não se restringindo em atender apenas os complexos de valor organizados em torno das perspectivas de valor do progresso tecnológico e do capital e mercado. Dessa forma, a neutralidade passaria a ser um ideal regulador da prática científica, tal como é atualmente o ideal da imparcialidade.

Esses conceitos e teses são a seguir retomados, desenvolvidos e articulados, com o objetivo de apresentar e discutir o modelo laceyano de interações entre as atividades científicas e os valores, modelo teórico de referência desta dissertação, alvo deste capítulo.

1.1 Método científico e valores cognitivos

As teorias aceitas da ciência moderna são produtos decorrentes da prática baseada num método composto pelas evidências experimentais e observacionais, pelas condições de intersubjetividade e, se possível, de replicabilidade dos experimentos e observações, e por critérios cognitivos de ligação das evidências experimentais/observacionais com as postulações teóricas (LACEY, 1999, pp. 4-5). Em toda a dissertação, o termo 'teoria' é usado num sentido bastante amplo, referindo-se a corpos organizados de hipóteses, explicações e encapsulações de possibilidades, que procuram trazer entendimento do mundo.

O projeto tradicional na filosofia da ciência tem sustentado que a escolha e a aceitação de uma teoria devem ser baseadas em critérios cognitivos, que dizem respeito tanto às relações entre a teoria e os dados empíricos disponíveis quanto às relações da teoria com outras teorias aceitas. Idealmente esses critérios cognitivos consistiriam num conjunto finito de regras, de maneira que as teorias confiavelmente aceitas repousariam em dados, em outras teorias aceitas e em poucas regras (ibid., pp. 55-56). Os empiristas lógicos, com vistas a caracterizar a avaliação científica como governada por regras lógicas e como fundamentada na intersubjetividade dos dados, de modo a gerar resultados determinados, sem ambiguidade, compartilhados e obrigatórios na escolha de hipóteses e teorias científicas, buscaram reformular a linguagem científica em termos da lógica formal, propondo que a linguagem da ciência seria estruturada por uma hierarquia de níveis, sendo cada nível imediatamente superior uma interpretação de um nível imediatamente inferior. Haveria uma distinção principal entre o nível observacional (nível dos enunciados sobre coisas observáveis, como dados experimentais e valores numéricos dos conceitos científicos e das leis experimentais) e o nível teórico (nível dos enunciados sobre as coisas não observáveis, como os objetos postulados em teorias). O nível observacional seria independente do nível teórico (os relatórios de observação seriam independentes da teoria, a verdade ou falsidade desses relatórios poderia ser decidida diretamente sem apelo às sentenças do nível teórico), servindo aquele como base de teste para este (LOSEE, 1984, pp. 173-174). A visão seria que a inferência científica pudesse ser reconstruída em termos da concordância com certas regras formais, que relacionariam os dados empíricos e as teorias, de uma

maneira que seguir essas regras levaria a escolhas sem ambiguidade sobre quais teorias aceitar, rejeitar ou considerar como requerendo mais investigações, constituindo-se em meios para transferir a aceitação intersubjetiva dos dados disponíveis para a teoria (LACEY, 1999, p. 5). Sendo assim, a aceitação de uma teoria seria sempre relativa a um domínio de fenômenos, o conjunto dos dados empíricos explicados e previstos pela teoria: os dados são explicados pela teoria quando, conhecidos de antemão, são deduzidos dela, sendo a teoria justamente proposta para dar conta deles; os dados são previstos pela teoria, quando são deduzidos dela, mas ainda não foram observados pelos cientistas, seja porque se referem a regiões do espaço-tempo de difícil acesso aos seres humanos, seja porque requerem instrumentos poderosos para serem observados. Por outro lado, aceitar uma teoria para um domínio de fenômenos à luz da evidência empírica disponível seria dizer que a teoria foi suficientemente bem confirmada pelos padrões mais rigorosos de observação, experimentação e argumentação. Assim, a teoria não necessitaria ser submetida a mais investigações, porque essas levariam apenas à replicação do que já foi inúmeras vezes replicado. No limite, mais investigações trariam apenas refinamentos corretivos de pouca relevância e uma delimitação mais acurada do domínio de fenômenos para o qual a teoria é aceita (LACEY, 1999, pp. 13-14).

No entanto, apesar de ter havido uma busca por essas regras formais desde os primórdios da ciência moderna, nunca houve unanimidade entre cientistas e filósofos sobre quais são essas regras e sobre sua natureza, sendo proposta uma diversidade de regras para o método científico, do tipo dedutivo, abduutivo, indutivo, hipotético-dedutivo, estatístico ou uma combinação desses tipos (ibid., p. 5). Para Lacey, esses esforços para produzir abordagens baseadas em regras estão envoltos em controvérsias intratáveis e com poucas chances de desenvolvimento (ibid., p. 57). Em razão disso, nosso autor optou por uma abordagem alternativa do método científico, baseada em *valores cognitivos* (LACEY, 2008, p. 83).

Para Lacey (2008, p. 83), os juízos científicos corretos são alcançados por meio de um diálogo entre os membros de uma comunidade científica acerca do grau de manifestação dos valores cognitivos pelas teorias, ao invés da aplicação de um conjunto de regras claras e explícitas por cientistas individuais.

Os valores cognitivos são ideais a serem satisfeitos por uma boa teoria científica, isto é, por uma teoria racionalmente aceita (LACEY, 1999, p. 45). São

características das teorias científicas em suas relações com os dados empíricos e com outras teorias aceitas, tidas por uma comunidade científica como metas que devem ser perseguidas na investigação científica, na aceitação e na escolha entre teorias, porque, acredita-se, uma vez realizadas em seu mais alto grau, conferem às teorias o caráter de representação das possibilidades genuínas do mundo relativas a um domínio de fenômenos, aquelas que nos dizem algo sobre o mundo e que podem ser usadas para informar projetos práticos. Sendo assim, os valores cognitivos envolvem o desejo de uma comunidade científica de que as teorias científicas tenham determinadas qualidades e a crença dessa comunidade de que essas qualidades almejadas conferem às teorias uma espécie de objetividade, isto é, uma representação das possibilidades genuínas das coisas.

Com a abordagem do método científico em termos de valores cognitivos, os juízos científicos deixam de estar enredados nas controvérsias até o momento não resolvidas sobre quais regras são usadas na escolha e aceitação de teorias. Isto porque essas escolhas assentam-se, em última instância, em valores, não em regras, sendo resultados da avaliação apropriada de teorias segundo os critérios epistêmicos considerados conjuntamente por um grupo de especialistas como adequados para sua aceitação para um domínio de fenômenos, o que confere valor cognitivo à teoria. Dependendo do ponto de vista epistemológico de um grupo de cientistas e filósofos, a natureza do valor cognitivo de uma teoria pode ser expressa na terminologia da confirmação, da probabilidade, da corroboração, da verificação, ou o que seja. Em todos esses pontos de vista as atitudes epistemológicas de seus defensores estão carregadas de valores cognitivos, que são os critérios epistêmicos mais fundamentais a embasar juízos científicos corretos (LACEY, 1999, p. 55). Sendo assim, a *imparcialidade* na ciência é alcançada, não pela aplicação de certas regras em detrimento de outras (indutivas, dedutivas, hipotético-dedutivas ou probabilísticas), mas por meio de um diálogo entre os membros da comunidade científica acerca do nível de manifestação dos valores cognitivos por uma teoria, ou por teorias rivais, aferido segundo os padrões mais rigorosos disponíveis (LACEY, 2008, p. 83).

Ser um juízo imparcial não implica em ser unânime. Em primeiro lugar, porque uma comunidade científica pode não estar de acordo sobre quais são os valores cognitivos que devem ser endossados na escolha e aceitação de teorias (LACEY,

1999, p. 53). Desacordos sobre os valores cognitivos a serem sustentados ocorrem no âmbito dos conflitos sobre crenças das pessoas, especificamente no contexto de práticas de aquisição de crenças, que são historicamente localizadas (a ciência é considerada por muitos como uma prática exemplar de aquisição de crenças). Ainda que seja exemplar, a ciência é constituída por uma variedade de objetivos e formas, o que parece implicar que não exista uma única e definitiva lista de valores cognitivos (LACEY, 1999, p. 58). Em segundo lugar, assumir um conjunto de valores cognitivos não leva necessariamente a uma concordância na comunidade sobre a escolha de teorias, pois podem ocorrer entre seus membros controvérsias em relação à ordem de importância dos valores e ao grau adequado de manifestação desses valores por uma teoria (LACEY, 2008, pp. 85-86). Isto explica a divisão da comunidade científica em momentos de crise (KUHN, 2009, pp. 95-102) e se afasta do ideal de que a razão deveria apontar inequivocamente para uma única conclusão (BERNSTEIN², 1983 apud LACEY, 2008, pp. 85-86). Os valores cognitivos podem ser manifestados em teorias em maior ou menor grau, sendo a adequação de sua manifestação, sua ordem relativa e sua interpretação assuntos de controvérsia razoável, abertos ao diálogo crítico dentro de uma comunidade e entre comunidades científicas. Devido à natureza das crenças não ser relativa apenas à pessoa, mas ao mundo em interação com as pessoas, às possibilidades do mundo, a expectativa é que essas controvérsias em torno dos valores cognitivos sejam passíveis de serem resolvidas objetivamente por meio do surgimento de novas evidências, novas argumentações e novas práticas, isto é, por uma racionalidade inerente e em desenvolvimento na prática científica (LACEY, 1999, p. 57).

Essa abordagem do juízo científico em termos de valores cognitivos pode ser remetida a Thomas Kuhn e a McMullin (LACEY, 2008, p. 83). No posfácio de sua obra “A estrutura das revoluções científicas”, que apareceu na segunda edição, de 1970, Kuhn se refere ao compromisso com valores que sejam constitutivos da ciência para a escolha entre paradigmas em competição (KUHN, 2009, pp. 231-232). McMullin, explorando a ideia levantada por Kuhn, sustenta que as escolhas teóricas adequadas podem ser idealmente reconstruídas em termos de valores exclusivamente cognitivos. A reconstrução configura-se como um ideal porque, na prática, existe a possibilidade de que um valor não cognitivo participe aberta ou

² BERNSTEIN, R. J. **Beyond objectivism and relativism** : science, hermeneutics and praxis. Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 1983.

veladamente do juízo científico, o que configura, para McMullin, como uma distorção na avaliação da teoria científica. Para ele, bem como para Lacey, a tese da imparcialidade, de que as escolhas teóricas adequadas podem ser reconstruídas em termos de grau da manifestação de valores cognitivos, é também um valor, não necessariamente um fato, funcionando como um ideal ou uma aspiração acerca das escolhas de teorias científicas (LACEY, 2008, p. 87, nota de rodapé 4).

Lacey (2008, pp. 84-86, nota de rodapé 3) propõe uma lista de valores cognitivos que desempenham ou desempenharam na história da ciência algum papel na escolha de teorias. Essa lista, apesar de extensa, é reconhecidamente incompleta, e foi elaborada a partir de uma ampla variedade de fontes, destacando-se os seguintes valores cognitivos:

- a) adequação empírica: valor que diz respeito à qualidade de testabilidade empírica, ou de falseamento da teoria, ou qualquer outro critério de ajuste da teoria com os dados observacionais, segundo o ponto de vista epistemológico sobre a natureza das teorias científicas;
- b) consistência: ausência de contradição no interior de uma teoria (consistência interna), ou entre a teoria em causa e outras teorias aceitas (estando de acordo com os resultados dessas teorias bem estabelecidas, ou explicando ou sendo explicada por elas, de modo a especificar seus domínios de fenômenos), ou entre a teoria em avaliação e as concepções dominantes acerca da natureza dos objetos da investigação (paradigmas, programas de pesquisa e tradições de pesquisa);
- c) simplicidade: valor associado a variadas qualidades de uma teoria, como sua harmonia, elegância, parcimônia, economia, clareza, inteligibilidade, ausência de aspectos 'ad hoc', entre outras;
- d) fecundidade: valor associado à capacidade de uma teoria originar novas questões e novos programas de pesquisa, ocasionar a descoberta de novos fenômenos e solucionar problemas empíricos e teóricos, ter utilidade prática, etc.;

- e) poder explicativo: capacidade da teoria em associar um domínio de fenômenos a um conjunto de leis, estruturas e processos ou de associar uma classe diversificada de teorias e fenômenos a uma teoria mais abrangente;
- f) poder preditivo: capacidade da teoria de, para um domínio de fenômenos, identificar novas possibilidades, com baixa probabilidade de ocorrência ou não realizadas, redefinindo a fronteira deste domínio de fenômenos (LACEY, 1999, p. 60);
- g) poder interpretativo: capacidade da teoria de fornecer uma narrativa interpretativa dos sucessos e fracassos das teorias precedentes, especificando as fronteiras dentro das quais essas teorias são confiavelmente aceitas, ou seja, seus domínios de fenômenos (ibid.).

A aceitação de uma teoria para um domínio de fenômenos ou a escolha entre teorias rivais envolvem julgamentos sobre o grau de manifestação dos valores cognitivos segundo os padrões mais rigorosos disponíveis. Segundo Lacey (1999, pp.62-66), esses padrões para estimar o grau dos valores cognitivos pelas teorias consistem idealmente:

- a) na consideração de todos os dados empíricos possíveis de serem obtidos no domínio de fenômenos para o qual a teoria é aceita;
- b) no estabelecimento o mais precisamente possível do domínio de fenômenos característicos para o qual uma teoria é aceita, especificando as diferenças no grau de manifestação dos valores cognitivos da teoria para os espaços experimental, tecnológico, natural e da vida diária deste domínio;
- c) na consideração da relevância dos dados empíricos obtidos para a confrontação crítica entre teorias rivais e para a definição clara do domínio de fenômenos para o qual uma teoria é aceita;
- d) na avaliação da confiabilidade dos dados empíricos obtidos e das generalizações empíricas derivadas deles, considerando se as condições de intersubjetividade foram atendidas e se as regras da inferência indutiva ou estatística foram devidamente seguidas;

- e) na comparação do grau de manifestação dos valores cognitivos por uma teoria com o grau de manifestação deles num conjunto suficiente de teorias rivais, levando em conta as relações e intersecções entre os domínios de fenômenos das teorias em competição;
- f) na comparação do grau de manifestação dos valores cognitivos na teoria em causa com o grau de sua manifestação nas teorias bem estabelecidas (que fazem parte do estoque de conhecimento), para se assegurar da equiparação;
- g) na avaliação de que o grau de manifestação dos valores cognitivos por uma teoria cresce com as respostas consistentes com ela às críticas, especialmente a crítica que torna explícito o que deve contar como manifestação adequada dos valores cognitivos.

Todos esses padrões para avaliar o grau de manifestação dos valores cognitivos por uma teoria podem estar sujeitos a controvérsias e a juízos de valor. Por exemplo, o conjunto suficiente de teorias rivais considerado para a avaliação do grau de manifestação dos valores cognitivos pelas teorias em avaliação pode estar sendo determinado socialmente, em razão das condições sociais e materiais dadas, e da mentalidade predominante numa determinada época e lugar, sendo assim restringido por valores sociais em vigor, muitas vezes aceitos como fatos do mundo, sem, no entanto, terem sido devidamente comprovados empiricamente como tais, constituindo-se em pressuposições não questionadas pela comunidade científica. Nesta situação, a escolha de teorias não é determinada exclusivamente pelos valores cognitivos, mas por esses em conjunção com os valores sociais dominantes. Em tais casos a imparcialidade da ciência não estaria sendo manifestada em alto grau e as teorias aceitas não estariam cumprindo o requisito fundamental de serem livres de valores não cognitivos no momento de sua escolha.

Na prática, pode haver dificuldades para impor padrões rigorosos de avaliação, seja porque eles podem estar em disputa na comunidade científica, seja porque eles podem ser reconhecidos, mas as condições para sua realização não estarem colocadas, seja porque eles não são sequer reconhecidos. Nesses casos as condições para a realização da imparcialidade na prática científica não estão dadas (LACEY, 1999, pp. 73-74).

1.2 Estratégias de restrição e seleção como terceiro nível das práticas científicas

Apesar de concordar que a lista de valores cognitivos seja plausível, Lacey sustenta que ela não é completa. Sua divergência incide em dois aspectos da análise dos valores cognitivos. Em primeiro lugar, Lacey aponta para o caráter vago da definição de adequação empírica, principal item da lista de McMullin. A adequação empírica foi vagamente definida como a qualidade do ajuste entre teoria e observação, sem fazer qualquer referência ao fato de que as constatações observacionais na ciência moderna dizem respeito principalmente aos objetos que ocorrem em arranjos experimentais, não sendo simplesmente objetos presentes no mundo da experiência ordinária. Na ciência moderna, as constatações observacionais descrevem fenômenos replicáveis produzidos em práticas experimentais, que envolvem intervenção de instrumentos de medida ou que ampliam nossa percepção, constituindo-se basicamente de relatos das propriedades e relações quantitativas desses fenômenos. Assim caracterizadas, as constatações observacionais da ciência moderna distinguem-se de outros tipos de descrições que poderiam ser dadas para os mesmos fenômenos, quando esses não são abstraídos das práticas humanas e de seus lugares nos sistemas sociais e culturais (LACEY, 2008, pp. 89-91). Por serem abstraídas dos contextos onde os fenômenos ocorrem, essas constatações observacionais da ciência moderna dizem respeito às *possibilidades materiais* dos fenômenos.

Relacionada a isso há uma restrição dominante na ciência moderna de que as teorias empreguem tipicamente categorias quantitativas, matemáticas e materialistas, uma vez que somente teorias com essas categorias podem possuir a qualidade do ajuste requerido com as constatações observacionais características das práticas científicas modernas (ibid.).

Deste modo, a adequação empírica da lista de McMullin pressupõe *estratégias materialistas de restrição e seleção* nas práticas científicas, combinação da dupla seletividade dos dados empíricos (constatações observacionais obtidas em práticas experimentais e descritas por categorias materialistas) com a restrição imposta às teorias científicas (emprego de categorias materialistas). Este item adicional apareceu em decorrência da análise crítica do valor cognitivo da

adequação empírica, que explicitou as condicionantes advindas da epistemologia baconiana e da metafísica galileana, fontes principais da *ideia da ciência livre de valores não cognitivos*.

A tradição científica moderna sustenta que a ciência é livre de valores pessoais, éticos, sociais, culturais e políticos, por consistir numa atividade regida por uma metodologia capaz de abstrair os fenômenos do mundo dos lugares que possam ter nos espaços humanos, permeados por valores e por categorias intencionais. Essa tradição está ancorada basicamente na metafísica galileana e na epistemologia baconiana.

A metafísica assumida por Galileu Galilei (1564-1642) em seus trabalhos postula uma ordem subjacente no mundo ontologicamente independente do ser humano. Essa ordem subjacente aos fenômenos é expressa em termos de estruturas, seus componentes e processos, e as leis que regem os fatos da natureza, não tem significados, finalidades e potencialidades, e não está conectada com as percepções, valores, interesses e ações humanos. Sua linguagem é a das matemáticas, de modo que todos os objetos que pertencem a essa ordem subjacente podem ser caracterizados em termos quantitativos e as interações entre os objetos, em termos de equações matemáticas. O objetivo da ciência é o de representar o mundo do fato puro, ou seja, as propriedades primárias e suas relações (LACEY, 1999, pp. 2-4). Com essa proposta, Galileu teve sucesso em deduzir de modo aproximado o comportamento dos corpos em queda livre e dos pêndulos a partir de princípios explicativos que especificavam as propriedades dos movimentos idealizados (LOSEE, 1984, p.54), isto é, movimentos dos objetos na ordem subjacente do mundo.

A metafísica galileana, por assumir uma ordem subjacente no mundo independente dos valores humanos, sem relações essenciais com a vida e as práticas humanas, é dita materialista. Ela fundamenta uma ciência com enunciados sem conteúdo valorativo, sem conceitos teleológicos, intencionais e sensoriais, mas apenas com conceitos quantitativos ou materialistas. Por isso, a ciência moderna, que tem Galileu como um de seus precursores, é pensada como objetiva, já que se constituiria como representação fiel do objeto de investigação, não variando com os compromissos teóricos e as perspectivas assumidas na investigação. Dessa

metafísica materialista advém a tese da *neutralidade* da ciência, que pode ser entendida em seus três aspectos fundamentais (LACEY, 1999, pp. 3-4):

- a) por não possuir conteúdo valorativo, as teorias científicas não implicam juízos de valor (neutralidade cognitiva);
- b) por isso, sua aceitação não tem consequências cognitivas para os valores de pessoas, comunidades e culturas;
- c) por representarem fatos do mundo, as teorias científicas estão disponíveis para ser aplicadas a quaisquer projetos individuais ou coletivos associados com quaisquer perspectivas de valor, servindo aos interesses de quaisquer valores pessoais ou sociais (neutralidade aplicada).

Em contraste com a fonte galileana da ideia de ciência como livre de valores, a fonte baconiana, para Lacey, é, sobretudo, epistemológica e metodológica (LACEY, 1999, pp. 4-5). Diferentemente de Galileu, Francis Bacon (1561-1626) concebe o mundo em conexão com as práticas humanas, de modo que descobrimos o que é possível no curso de nosso engajamento com o mundo. O engajamento bem-sucedido se dá principalmente por meio de experimentos, através dos quais descobrimos as possibilidades genuínas do mundo, aquelas possibilidades imaginadas que podem ser realizadas. Essas podem estar crescentemente associadas com nossas práticas e planos de intervenção no mundo. A dicotomia fato/valor é reafirmada em termos de uma separação entre o possível e o desejado: as considerações derivadas de valores não podem determinar o curso natural das coisas; apenas o que é observado, especialmente nos experimentos, e certificado pela replicação e pela concordância intersubjetiva, independentemente de nossos desejos, perspectiva de valor, normas e pressuposições culturais e institucionais, é possível de realização. A dicotomia fato/valor é mediada pela evidência empírica advinda do experimento científico, que requer como condições fundamentais para validação de seus resultados a intersubjetividade e a replicação. Essa dicotomia é a fonte da ideia de *imparcialidade* na ciência, que diz respeito ao terreno para a aceitação de postulações científicas e para fazer julgamentos científicos, e que se constitui numa outra tese relativa à ideia de ciência como livre de valores. Essa imparcialidade requer um método, um conjunto finito de regras ou de valores cognitivos que ligue os dados empíricos com as formulações teóricas, de modo que

aqueles sirvam de evidência para a aceitação destas. Nas interpretações mais usuais de Francis Bacon, este método seria o indutivo, pelo qual a ciência é caracterizada como sendo uma progressão gradual das observações para os princípios mais gerais (LOSEE, 1984, p. 71). Como consequência dessa visão epistemológica/metodológica, o objetivo da ciência seria o de encapsular o que puder do repositório complexo de possibilidades do mundo, com vistas a controlar a natureza, para melhorar a qualidade de vida dos seres humanos.

A dicotomia fato/valor e as ideias de neutralidade e imparcialidade implicadas por ela encontram guarida numa certa visão metaética que representa os valores como fenômenos subjetivos e os julgamentos de valor como articulações pessoais preferenciais, que carecem, portanto, de valor de verdade e, por isso, não podem estar contidos em proposições científicas (LACEY, 1999, p. 7).

Para Lacey, a neutralidade e a imparcialidade tenderam a se fundir na prática (ibid., pp.5-6). A ordem subjacente do mundo, postulada pela metafísica materialista, não podia ser descoberta diretamente. O próprio Galileu reconheceu isso ao postular a técnica da idealização, forma de extrapolação a partir de fenômenos ordenados seriadamente: a concepção de queda livre no vácuo não foi exemplificada diretamente nos fenômenos à época de Galileu, mas consistiu numa extrapolação feita por ele a partir da observação do comportamento dos corpos soltos numa série de fluidos com densidades decrescentes (LOSEE, op.cit., p. 54). Essa técnica concordava com as prerrogativas postuladas por Francis Bacon para o método científico: experimentação e observação sistemáticas e acordadas intersubjetivamente. Essa seria a forma de se obter conhecimento objetivo do mundo por meio da investigação empírica sistemática. Nos termos de Lacey, a fusão entre as condições requeridas pela neutralidade e imparcialidade, entre a metafísica galileana e a metodologia baconiana, na prática científica moderna adquiriu a forma de *estratégias de restrição e seleção* da investigação científica. Diante do objetivo de entender e controlar a natureza, a ciência moderna caracteriza-se por *estratégias* que:

- a) restringem as teorias de tal modo que representem os fenômenos em termos de sua concordância com as leis da natureza, com sua geração por intermédio de estruturas, processos e leis que lhes são subjacentes, isto é, de uma ordem subjacente caracterizada por relações matemáticas e por ser

ontologicamente independente das práticas humanas, não variando segundo os compromissos teóricos, as perspectivas, os interesses e os valores que possam ser assumidos na investigação;

- b) selecionam os dados observacionais relevantes que possam ser colocados em contato com as teorias formuladas segundo a metafísica galileana e, assim, que sirvam de evidência empírica para a sustentação dessas teorias: esses dados, submetidos aos critérios de intersubjetividade e replicabilidade, caracterizam-se por descrever quantitativamente os fenômenos, sendo resultados de operações instrumentais, experimentais e de medida.

Por suas características, as estratégias de restrição e seleção da ciência moderna abstraem os fenômenos de qualquer inserção que possam ter na experiência humana e nas atividades práticas, de qualquer vínculo que venham a ter com valores e possibilidades sociais, humanas e ecológicas. Por isso, são chamadas por Lacey de *estratégias materialistas* ou *estratégias descontextualizadoras*. Atualmente, nosso autor tem usado o termo “estratégias descontextualizadoras” para acentuar seu propósito de gerar teorias sobre a ordem subjacente aos fenômenos, isto é, sobre as relações entre os objetos materiais caracterizadas independentemente de seu contextos de realização, ao invés do termo “estratégias materialistas”, que está ligado à sua origem – a metafísica materialista advinda das ideias de Galileu.

Desta forma, as *estratégias de restrição e seleção* apontam, no âmbito de um domínio de fenômenos, para os tipos relevantes de dados empíricos a ser estabelecidos, para as categorias descritivas apropriadas para fazer os relatos observacionais e para os tipos de teorias a ser formuladas de modo a estarem em contato com esses dados. Elas consistem em perspectivas por meio das quais olhamos o mundo, direcionando a investigação científica para certos tipos de possibilidades do mundo que possam nos interessar. Segundo Lacey (2010, p. 66), a noção de estratégias de restrição e seleção é inspirada no conceito de paradigma de Kuhn. Em sua concepção original, o paradigma constitui-se em terceiro elemento metodológico da prática científica, ao lado dos dados empíricos e das teorias, consistindo numa perspectiva teórico-metodológica a partir da qual olhamos para o mundo, para suas possibilidades. Como conjunto de compromissos teóricos e metodológicos compartilhados por uma comunidade científica, o paradigma fornece

o pano de fundo para entendermos o mundo e a mudança de paradigma traz a mudança das categorias empregadas nas representações teóricas e nas descrições empíricas. Neste sentido, o uso de estratégias de restrição e seleção como terceiro componente do método científico introduz inovações na abordagem filosófica tradicional da ciência, ao postular que o nível observacional e o nível teórico não são separados e independentes, pois ambos são enquadrados pelas estratégias, e ao postular historicidade às práticas científicas, já que essas estariam associadas com uma visão de mundo característica de uma época e lugar (LACEY, 2010, pp. 66-69). Sendo assim, o uso de estratégias de restrição e seleção para caracterizar o método científico é um primeiro passo dado por Lacey em direção à caracterização da ciência como envolta em valores não cognitivos. Essa relação entre as estratégias e os valores será mais explorada à frente.

Em segundo lugar, Lacey avalia que, ao justificar racionalmente os valores cognitivos levantados na reconstrução histórica e sociológica de episódios-chave de escolha de teorias dentro de uma disciplina científica, segundo passo para a elaboração da lista de valores cognitivos apontados como aqueles empregados pelos membros de uma determinada comunidade científica, McMullin associa os valores cognitivos propostos ao que acredita ser o objetivo da ciência: representar as estruturas, processos e leis subjacentes aos fenômenos e, a partir disso, descobrir novos fenômenos, por meio de teorias racionalmente aceitas (LACEY, 2008, pp. 92-95). Tal objetivo para a ciência apoia-se, como vimos, na combinação da metafísica materialista com a metodologia baconiana, endossando a ideia de uma ciência como livre de valores não cognitivos, postulada pela tradição científica moderna. Diante deste objetivo para a ciência, os itens da lista de McMullin, inclusive o item pressuposto da estratégia materialista de restrição e seleção, caracterizam-se racionalmente como valores cognitivos, pois são critérios epistêmicos que contribuem efetivamente para a seleção de teorias em acordo com a visão metafísica-epistemológica-metodológica predominante na tradição científica moderna.

Ao endossar este objetivo para a ciência, McMullin expressa um ideal explicativo para a teoria científica, de caráter materialista e reducionista, já que ele exclui, como não científicas, as explicações que representam os objetos (coisas,

eventos, domínios etc.) como portadores de valores ou como tendo um lugar nas práticas humanas. Este ideal explicativo restringe o poder explicativo e preditivo de uma teoria aos espaços onde a interferência intencional humana não é pertinente (LACEY, 2008, p. 94). Com isso, McMullin integra a corrente dos cientistas e filósofos para os quais a ciência deve perseguir o ideal de ser livre de valores não cognitivos. Como veremos a questão sobre qual é o objetivo da ciência é também controversa e de difícil resolução, sendo que Lacey adota um objetivo para a ciência bem mais amplo do que o que tem sido adotado pela tradição científica moderna e, dessa forma, capaz de contemplar explicações dos objetos como portadores de valores não cognitivos.

1.3 Refutação da metafísica materialista e suas implicações

A ausência de certeza epistêmica no conhecimento científico, tendo em vista os reveses frequentemente ocorridos na aceitação das teorias científicas e a caracterização dos valores cognitivos como suscetíveis de controvérsia, aponta para o problema com a reivindicação de neutralidade da ciência a partir da metafísica materialista. O produto da investigação empírica, de acordo com os critérios da imparcialidade, não parece se constituir em conhecimento do mundo tal como ele é. Se for assim, a ciência pode não ser um objeto de valor para cada complexo de valor - a partir do momento que não representa o mundo tal como ele é, ela pode não ser consistente com todos os julgamentos de valor, pode ter consequências valorativas e pode servir a certos valores mais do que a outros, negando cada componente da tese da neutralidade defendida anteriormente. Se a metafísica materialista não puder ser sustentada, a imparcialidade não implicará necessariamente a neutralidade da ciência.

O mundo como uma ordem subjacente aos fenômenos, caracterizada por estruturas, processos e leis, que podem ser expressos por quantidades e por funções matemáticas, e cujo funcionamento é independente das percepções, desejos, concepções, valores, interesses e ações humanas (*mundo material ou mundo das possibilidades materiais*), é uma postulação feita pela metafísica materialista, um dos componentes da filosofia do materialismo científico. Como podemos saber que o mundo é tal como a metafísica materialista nos diz que ele é? Para começo de conversa, não podemos saber diretamente, sem qualquer

representação mental, o que é o mundo. Isto, como dissemos, foi reconhecido pelo próprio Galileu em suas obras. Estamos impossibilitados de ver diretamente o mundo tal como ele é e, assim, se ele é tal como nos diz a metafísica materialista. Em segundo lugar, se afirmamos saber como o mundo é, é porque o representamos mentalmente, por meio de categorias criadas, estruturadas, desenvolvidas, refinadas, transformadas e aplicadas no curso de nossas práticas de observação, medição, experimentação e teorização, e acreditamos ser essa representação fidedigna. Mas, como podemos saber se a representação do mundo é fidedigna? Como podemos saber se as nossas melhores teorias representam o mundo adequadamente? Parece haver entre os termos 'mundo tal como ele é' e 'representação do mundo' uma contradição entre termos, um paradoxo: o primeiro reivindica o mundo como sendo independente de suas relações com os seres humanos; mas o segundo postula a representação como produto humano, como advinda de nossas interações com o mundo, não sendo, portanto, simplesmente o mundo, mas o mundo em interação conosco. Em suma: parece não haver como conciliar o mundo tal como é (*o mundo material*) com o objetivo da ciência de representar este mundo, como postula a filosofia do materialismo científico. Os termos parecem não se ajustar, de modo que o objetivo da ciência de representar o mundo tal como é aparece como uma contradição entre termos (LACEY, 2008, pp. 24-29).

A conclusão inescapável de Lacey com relação ao paradoxo na filosofia do materialismo científico é que a metafísica materialista constitui-se de uma extrapolação do entendimento científico moderno consolidado e da direção esperada de seu crescimento (ibid., p.176). O conhecimento científico formado a partir das estratégias materialistas, que nos tem oferecido uma compreensão adequada de certas possibilidades do mundo (*as possibilidades materiais*) e que tem sido aplicado com sucesso em nossas práticas materiais da vida moderna, nos induziu a acreditar nos pressupostos que carrega, entre os quais a metafísica materialista. No entanto, como veremos, as possibilidades materiais não são as únicas possibilidades genuínas do mundo e a metafísica materialista não é o único pressuposto possível de ser assumido para explicar o sucesso da ciência. Veremos que esse sucesso, expresso, por um lado, pelo contínuo aumento do estoque do conhecimento por meio de teorias bem consolidadas empiricamente, que descrevem, classificam e

explicam os fatos, encapsulando possibilidades genuínas do mundo (entendimento científico), e, por outro, pela sua aplicação ampla, efetiva e útil para explicar fenômenos significativos da vida cotidiana (aplicação a fenômenos) e para informar assuntos práticos, contribuindo com o desenvolvimento de tecnologias (aplicação em atividades práticas), é relativo, sendo circunscrito a um tipo possível de entendimento e aplicação. Por isso, tomar o sucesso da ciência como prova empírica para a metafísica materialista consiste numa extrapolação, num passo argumentativo apressado, não devidamente comprovado, que foi seguido pela maioria dos cientistas e filósofos da ciência desde Galileu. Sendo assim, apelar para a metafísica materialista para justificar a neutralidade na ciência, como fez Galileu, é uma petição de princípio, já que a metafísica materialista não foi estabelecida nem “a priori”, independentemente da ciência moderna, nem “a posteriori”, como produto dessa ciência moderna.

Todavia, se a metafísica materialista não pode sustentar as estratégias materialistas por redundar num paradoxo, essas perdem o status conferido por Kuhn e por McMullin de valor cognitivo. Sendo assim, quais razões podem ser dadas para sua predominância quase exclusiva na ciência moderna? A abordagem do método científico por meio de estratégias de restrição e seleção, mediadas por valores cognitivos, como faz Lacey, a partir da refutação da metafísica materialista, abre-se para a possibilidade epistemológica de essas estratégias serem escolhidas por perspectivas de valor, que guiarão os cientistas quanto às possibilidades de interesse no mundo. Sendo assim, quais valores e quais perspectivas de valor justificariam a escolha quase exclusiva das estratégias materialistas na ciência moderna? Outras estratégias que não as materialistas seriam justificáveis a partir de outros valores e perspectivas de valor? Como uma atividade de pesquisa guiada por valores sociais pode redundar em conhecimento científico consolidado e no sucesso da ciência? A resposta estaria na imparcialidade da ciência, que, associada com a escolha das estratégias de restrição e seleção pelas perspectivas de valor, seria capaz de assegurar conhecimento genuíno do mundo para domínios particulares de fenômenos. Sendo carregada de valores, a ciência moderna não seria neutra - sem a metafísica materialista a imparcialidade não pode implicar a neutralidade da ciência. A neutralidade da ciência é, portanto, uma idealização não realizável na prática? Ou outra forma de neutralidade é possível a partir da imparcialidade da ciência? Essas são questões implicadas pela recusa da metafísica materialista e do

materialismo científico, que devem ser respondidas por qualquer modelo que procure representar a interação entre os valores não cognitivos e a atividade científica.

Lacey deixa de identificar o objeto das práticas científicas com o objeto do mundo tal como ele é, negando a metafísica materialista advinda de Galileu e, com isso, evitando cair no paradoxo associado a ela, ao optar por um dos termos da filosofia do materialismo científico: a teoria científica é representação do mundo, mas sendo produto da criação humana, não pode representar o mundo independentemente das relações que este possa vir a ter com os interesses humanos (LACEY, 2008, pp. 27-29). Ele sustenta a visão baconiana de que toda teoria é representação, seu objeto não é o mundo tal como ele é, mas o mundo mediado por valores, desejos e intenções humanas. Nesta perspectiva, o mundo aparece como um repositório complexo de possibilidades, associadas com nossas práticas e planos de intervenção. Como nem tudo o que imaginamos como possível está entre as possibilidades do mundo, cabe à prática científica nos dizer, através de seu método, quais possibilidades imaginadas ou desejadas são reais (LACEY, 1999, pp. 4-6). A ordem subjacente no mundo e o entendimento das coisas em termos de estruturas, processos e leis subjacentes aos fenômenos não deixam de existir, mas existem sempre em relação aos interesses e valores humanos, não de forma independente deles, ao menos para nós, seres humanos. Nossa condição humana nos prende a uma perspectiva de valor quando olhamos para o mundo: não vemos nunca o mundo tal como ele é, mas o mundo a partir de uma perspectiva valorativa (LACEY, 2008, pp. 38-41).

Lacey refuta a metafísica galileana e endossa a epistemologia e metodologia baconianas, modificando a visão tradicional da ciência moderna, na qual, como vimos, a metafísica galileana aparece paradoxalmente associada à metodologia baconiana. Ao refutar a metafísica galileana, Lacey nega a neutralidade advinda da filosofia do materialismo científico, na qual o objetivo da ciência seria representar o mundo tal como ele é, filosofia que, como vimos, apresenta muitos problemas insolúveis. Por outro lado, ao endossar a epistemologia e metodologia baconianas, Lacey adere à ideia de que a teoria científica é imparcial, sustentando que as teorias científicas devem ser avaliadas e julgadas com base nos valores cognitivos.

Sendo a pesquisa científica orientada por estratégias de restrição e seleção, que são guiadas por perspectivas de valor, associadas a grupos sociais, e que variam de tempos em tempos e de lugar para lugar, como explicar o sucesso da ciência? Certamente, o que explica a aplicação bem-sucedida da ciência, tanto em termos de sua capacidade de explicar fenômenos significativos no reino da vida e experiência diárias quanto na forma de gerar tecnologias presentes na vida material humana, não pode ser opiniões, ideologias, dogmas ou juízos de valor, que mudam com as sociedades e os tempos, como quer a crítica pós-moderna da ciência, agrupamento heterogêneo de pensadores que reivindicam que a ciência não é livre de valores não cognitivos, de modo que as teorias científicas seriam avaliadas e escolhidas com base tanto em valores cognitivos quanto em valores não cognitivos. O que explica o sucesso da ciência é sua imparcialidade, isto é, a capacidade da prática científica de aceitar teorias com base exclusivamente na avaliação coletiva da manifestação dos valores cognitivos por essas teorias, condição epistemológica que assegura às teorias científicas o entendimento das possibilidades genuínas do mundo. O que importa é que o que caracteriza uma boa teoria é a manifestação em alto grau dos valores cognitivos relevantes, independentemente dos valores não cognitivos ou das convicções metafísicas que levaram à sua formulação.

Segundo Lacey, o sucesso da ciência moderna pode prescindir da filosofia do materialismo científico, que diz que a ciência produz entendimento do mundo tal como ele é. No que diz respeito à aplicação da ciência em atividades práticas, esse sucesso (tecnológico) pode ser simplesmente explicado pelas seguintes postulações: o objeto das práticas científicas modernas identifica-se com o objeto representado nas teorias científicas que, com respeito aos seus domínios de fenômenos, manifestam os valores cognitivos num grau elevado; este objeto, por sua vez, identifica-se com objeto das aplicações tecnológicas, isto é, o objeto potencial de controle. Nas palavras de Lacey (2008, p. 40):

Para explicar o sucesso tecnológico, precisamos apenas fazer referência ao fato histórico de que em certos espaços, incluindo os da aplicação tecnológica, obtemos teorias que manifestam os valores cognitivos num grau elevado. Então, a aplicação tecnológica é considerada como mais uma replicação concreta das experiências que fornecem comprovações para uma teoria. Nenhuma explicação metafísica 'profunda' do sucesso da tecnologia é necessária, apenas que o mundo tem se mostrado receptivo às formas de apreensão conduzidas pela estratégia materialista, uma apreensão que progressivamente nos habilita a identificar um número cada vez maior de suas possibilidades materiais.

A reivindicação do autor é que a metafísica galileana em combinação com a metodologia baconiana na prática científica, ao invés de ter produzido entendimento do mundo tal como ele é, produziu apenas entendimento das *possibilidades materiais* do mundo, isto é, daquelas possibilidades do mundo quando consideradas sob a perspectiva da abstração dos fenômenos de qualquer inserção na experiência humana e nas atividades práticas. Sob esse viés, cuja justificação original seria a de produzir conhecimento neutro e imparcial das coisas, o que se obteve, na verdade, foi, segundo Lacey, um tipo de entendimento das coisas com vistas ao seu controle, uma forma de entendimento do mundo para atender aos interesses humanos de controlar a natureza, de direcionar os objetos do mundo material para a realização de fins humanos. Isto é, as estratégias materialistas de restrição e seleção da ciência moderna fundamentaram-se na *perspectiva valorativa moderna do controle da natureza*. É por isso, segundo o autor, que as teorias científicas são formuladas para estar em contato com dados empíricos obtidos em experimentos controlados e, assim, servirem aos propósitos de controle dos objetos materiais pela via de sua aplicação por meio do desenvolvimento tecnológico (LACEY, 2008, pp. 41-42).

Com tal reivindicação, Lacey dá razão à crítica pós-moderna, que afirma que os valores sociais desempenham papéis importantes na investigação científica, atribuindo a eles influência no nível da escolha das estratégias de pesquisa e no nível da aplicação da ciência, mas, contrariamente a essa crítica, sem qualquer influência no nível da escolha e aceitação de teorias científicas (ibid.).

1.4 Quadro conceitual para entender os valores e as perspectivas de valor no modelo laceyano

Antes de explorarmos as relações entre os valores não cognitivos e as estratégias de restrição e seleção, explicitando as afinidades eletivas entre a perspectiva da valorização moderna do controle e as estratégias materialistas da ciência moderna, faz-se necessário esclarecer a significação dos termos “valores não cognitivos”, “juízo de valor” e “perspectiva de valor”, assumida no modelo laceyano de interações entre as atividades científicas e os valores.

Se os valores cognitivos são ideais sustentados pelos praticantes da ciência de que as teorias científicas tenham determinadas características, para que possam

realizar o objetivo mais geral que pode ser atribuído à ciência – o de gerar entendimento das coisas e encapsular as possibilidades genuínas do mundo, os *valores não cognitivos* são metas estabelecidas pelas pessoas, pelos grupos, pelas comunidades e pelas sociedades em geral para que a vida das pessoas seja caracterizada por certas qualidades, vistas como possíveis de serem realizadas e como sendo importantes de serem realizadas, pois são características que conferem significado para a vida das pessoas. Como tais, os valores não cognitivos caracterizam-se como desejos de segunda ordem nas pessoas, advindos de uma concepção sobre a natureza humana e de uma concepção sobre o mundo, que servem de causas para suas ações, sendo ao mesmo tempo particulares aos indivíduos e associados às concepções predominantes num determinado grupo, comunidade ou sociedade sobre o bem-estar humano e sobre as possibilidades de ação humana.

Se os valores não cognitivos são desejos das pessoas que desempenham um papel causal no comportamento humano, eles têm na sua origem um caráter pessoal, ligado aos desejos mais fundamentais de uma pessoa (*valores pessoais*). Como tais eles podem se apresentar como manifestados no comportamento da pessoa e como presentes na consciência ou articulados em palavras, numa representação do que alguém é ou gostaria de ser ou gostaria que os outros pensassem que é (LACEY, 2008, pp. 54-57). Na medida em que esses valores pessoais são articulados, eles se tornam objetos de discussão e argumentação, disseminando-se entre as pessoas, sendo reconhecidos e compartilhados, podendo ser incorporados em instituições sociais e na sociedade, tornando-se *valores sociais*. Uma instituição incorpora um valor não cognitivo em alto grau quando seu funcionamento normal oferece papéis sociais nos quais esse valor está entrelaçado. Já a sociedade incorpora um valor em alto grau se proporciona as condições favoráveis para o funcionamento de instituições que incorporam esse valor, bem como se seu funcionamento e manutenção dependem dessas instituições que incorporam esse valor (ibid., pp. 57-60).

O vínculo entre o pessoal e o social na formação, manutenção, transformação e reconhecimento dos valores é dialético, no sentido de que os valores pessoais são incorporados pelas instituições sociais, mas estas, ao mesmo tempo, restringem os valores que podem ser entrelaçados na vida de uma pessoa aos valores que são incorporados em alto grau nelas. Isto se dá pela via da linguagem, na medida em

que os recursos linguísticos disponíveis numa sociedade refletem as concepções predominantes de bem-estar humano e de possibilidades de ação humana, e pela via da mediação das relações interpessoais e grupais pelas instituições sociais, que são o que define os papéis sociais dos indivíduos numa comunidade e suas relações (LACEY, 2008, pp. 57-60).

Entre manifestação e articulação dos valores por uma pessoa, um grupo, uma comunidade e uma sociedade existem brechas entre intenções e ações (nossas ações não conduzem estritamente ao que pretendemos e nossos desejos não são completamente realizados por meio das ações), entre aspirações futuras e as condições presentes de vida (interação entre nossas condições de operação e as possibilidades futuras almeçadas), entre as modalidades pessoais e sociais dos valores, entre valores intrínsecos (que justificam a existência de uma instituição) e valores extrínsecos (que garantem o funcionamento social de uma instituição) às instituições sociais (ibid., pp. 63-67).

Essas brechas são percebidas pelas pessoas, que respondem a elas diferentemente no sentido de reduzi-las, pela escolha dos caminhos do ajustamento (valores pessoais são ajustados aos valores sociais dominantes), da resignação (contrapartida dialética do ajustamento em sociedades estruturadas por relações de dominação, para as pessoas dominadas), da marginalidade criativa (valores pessoais pressionam as margens dos espaços institucionais, buscando sua maior manifestação nesses espaços), da busca pelo poder (ajuste das estruturas sociais aos valores pessoais de quem conquista o poder político e econômico) e da transformação a partir de baixo (grupos marginalizados atuam em cooperação com setores oficiais com vistas a abrir espaços para maior manifestação de seus valores na sociedade, alterando, com isso, as relações dominantes entre os valores pessoais e sociais) (ibid., pp. 67-77).

Em decorrência dessas escolhas, cada pessoa, grupo, comunidade e sociedade procura criar, articular ou discernir unidade com relação aos valores que sustenta, buscando manifestá-los de modo constante, coerente e recorrente, o que redundará na sustentação de um *complexo ou perspectiva de valor*. Nessa articulação da unidade dos valores sustentados é considerado um número de critérios para justificar a legitimidade do caminho adotado em face das restrições impostas pelas condições materiais, históricas e sociais, entre os quais se destacam: a possibilidade

de que o complexo de valor seja manifestado consistente, constante e coerentemente; e a visão de natureza humana, que explique, com alguma sustentação empírica, como o complexo de valor torna a vida realizada (LACEY, 2008, pp. 77-82).

Por fim, o juízo de valor consiste na sustentação por uma pessoa de que um certo valor (pessoal, moral, social, estético, cognitivo) é bem manifestado por um objeto de valor (pessoa, instituição, sociedade, obra de arte, teoria). Esse juízo de valor baseia-se no enunciado estimativo de valor, hipótese sobre o grau de manifestação de um valor num objeto de valor, como tal avaliada à luz de dados empíricos disponíveis. Sendo assim, com base em investigações científicas, os enunciados estimativos de valor podem afetar os juízos de valor de uma pessoa. Em função das interconexões que possa haver entre os juízos de valor, os enunciados estimativos de valor e as investigações científicas sobre a natureza humana e sobre as possibilidades de ação humana, os pressupostos de um complexo de valor podem ser respaldados ou refutados. É logicamente possível que uma perspectiva de valor afetada pelas descobertas científicas seja reformulada, com a substituição de suas pressuposições inconsistentes com o corpo de teorias científicas aceitas por outras consistentes com ele, tornando-se, assim, um *complexo ou perspectiva viável de valor* (LACEY, 2010, pp. 270-276).

Como vemos essa abordagem dos valores por Lacey nega a dicotomia lógica de que enunciados de valor não contêm enunciados de fato, mas reafirma a dicotomia fato/valor em termos de uma distinção entre o possível e o desejado. Por sua vez, a abordagem supera os problemas associados com a visão metaética que postula os valores como fenômenos meramente subjetivos, associados à privacidade e subjetividade de alguém, incapaz de explicar a formação e constituição dos valores sociais. Segundo a abordagem laceyana, os valores decorrem de seis modalidades em interação dialética (manifestados na ação, expressos em práticas, presentes na consciência, articulados em palavras, entrelaçados em vidas e incorporados em instituições sociais), refletindo aspirações e possibilidades para o desenvolvimento dos seres humanos, de acordo com as diferentes condições materiais e sociais dadas para pessoas, grupos, comunidades e sociedades. A abordagem marca uma postura metodológica de caráter empírico e sistemático para o estudo dos valores como fenômenos objetivos.

1.5 Relações mutuamente reforçadoras entre estratégias descontextualizadoras e perspectivas de valor do progresso tecnológico

O controle humano sobre os objetos naturais ocorre quando, informados por crenças sobre os efeitos de nossas ações sobre os objetos, somos capazes de usá-los como meios para nossos fins. Sendo assim, os requisitos para o controle são (LACEY, 1999, p. 118):

- a) identificar as condições que, uma vez dadas, levam à ocorrência de um estado de coisas como função de um objeto material ter adquirido uma propriedade específica (condições de contorno para o controle);
- b) que objeto material adquira a propriedade específica por nossa atuação direta;
- c) que as condições de contorno para o controle possam ser estabelecidas ou mantidas por nós;
- d) que a ocorrência do estado de coisas em função do objeto material adquirir a propriedade específica seja uma conexão causal ou uma regularidade empírica.

Essa forma de entendimento constitui o *entendimento prático* das coisas e os objetos assim entendidos possuem um valor instrumental (LACEY, 2008, p. 160). Essa forma de entendimento inclui o conhecimento sobre as regularidades empíricas envolvidas nos requisitos para o controle dos objetos materiais, bem como a identificação dos objetos e das condições de contorno para o controle que estão dentro do poder de atuação de um sujeito, grupo, comunidade ou sociedade.

Esse entendimento prático existe em todas as culturas, assumindo variadas formas, que refletem as diferentes ordens sociais, ecológicas e cósmicas possíveis, concebidas e desejadas por pessoas, grupos, comunidades e sociedades, isto é, as possibilidades de controle dos objetos naturais são subordinadas às relações sociais, ecológicas e cósmicas vigentes numa determinada comunidade, sendo

limitadas em seu escopo e valorizadas na extensão em que contribuem com a perspectiva de valor sustentada por essa comunidade (LACEY, 1999, pp. 111-112).

Caracteristicamente o controle sobre a natureza na modernidade assume a forma de sua expansão contínua nas atividades da vida prática. Essa expansão tem sido tão bem sucedida que nossa vida prática tornou-se proeminentemente esculpida pelos produtos do controle humano sobre os objetos naturais, em especial, os produtos tecnológicos. Por isso, ganhar controle sobre a natureza tornou-se um valor social altamente apreciado, em relação ambígua com outros valores sociais: ao mesmo tempo não subordinado a quaisquer outros valores, mas sem ascendência sobre eles. Comumente o valor social do controle sobre as coisas é tido idealmente como capaz de servir a todos os valores sociais e ideais de florescimento humano vigentes, de modo que esse controle é considerado em larga medida em abstração de suas ligações com os outros valores, procedendo com relativa autonomia (ibid., pp. 113-115).

A tese de Lacey é a de que o controle humano sobre as coisas é um princípio organizador central das sociedades modernas, constituindo-se simultaneamente numa perspectiva para se lidar com problemas práticos e na confiança de que o avanço de nossa capacidade de exercer controle seja capaz de solucionar quaisquer problemas, inclusive os efeitos colaterais advindos do exercício desse controle. Dessa forma, os complexos modernos de valores caracterizam-se por incluir um conjunto de valores acerca do controle, os valores modernos do controle, formado pelos seguintes componentes (ibid., pp. 114-115):

- a) expansão das capacidades humanas de controle dos objetos materiais;
- b) exercício do controle sobre os objetos materiais como uma atividade característica da vida prática, de maneira que, onde é possível, os problemas são redefinidos como tendo uma solução tecnológica;
- c) implementação de novas formas de controle;
- d) objetos tecnológicos e seus produtos tendem a ser considerados objetos de valor;
- e) os objetos naturais são tidos como objetos de valor em função de seu valor instrumental;

- f) esses valores tidos como não subordinados a nenhum outro valor podem também ser considerados como mais um valor.

Esse conjunto de valores modernos do controle é denominado por Lacey em diversas passagens de seus escritos de valorização moderna do controle, constituindo-se numa perspectiva de valor central nas sociedades modernas. Numa formulação mais enxuta e atual, Lacey e Mariconda (2014, p. 657) identificam a valorização moderna do controle à perspectiva de valor do progresso tecnológico $\{V_{PT}\}$, definindo-a como:

Na $\{V_{PT}\}$, o exercício do controle sobre os objetos naturais torna-se por si mesmo um valor social que não é subordinado de forma sistemática e geral a outros valores sociais, e atribui-se um alto valor ético às inovações que aumentam as capacidades humanas de exercer controle sobre os objetos naturais, à penetração cada vez maior de tecnologias em sempre mais domínios da vida cotidiana, da experiência humana e das instituições sociais, e à definição de problemas em termos que permitam soluções tecnocientíficas.

Em razão disso, o entendimento dos requisitos para o controle nas sociedades modernas foca as regularidades empíricas entre o estado de coisas e a possibilidade de um objeto vir a ter uma determinada propriedade, bem como as condições gerais de contorno para que isso ocorra, independentemente de quaisquer outros valores que possam estar associados à situação de controle e ao entendimento prático.

Vimos que o entendimento capaz de encapsular as possibilidades das coisas independentemente do lugar que venham ocupar na experiência humana e na vida prática (possibilidades materiais) é o entendimento obtido sob as estratégias materialistas ou descontextualizadoras de restrição e seleção, que caracteriza a ciência moderna. A ciência moderna constitui-se, assim, como forma de entendimento que apreende a totalidade das regularidades para o controle num determinado tempo, representando os limites para nossa capacidade de controlar as coisas, indicando condições e objetos relevantes que, sob nossa ação direta, nos habilitaria a controlar estados de coisas específicos. A ciência moderna, ao representar os fenômenos em termos da ordem subjacente, nos habilita a derivar sistematicamente as regularidades requeridas para o controle das coisas, encapsulando as possibilidades das coisas enquanto possibilidades de controle, sejam essas possibilidades usadas ou não para informar nossas capacidades

correntes de controle dos objetos materiais. Sendo assim, sustentar a perspectiva de valor do progresso tecnológico traz consigo o interesse em perseguir o entendimento sob estratégias descontextualizadoras, pois entender mais das possibilidades materiais das coisas leva quase inevitavelmente a encapsular mais das possibilidades de controle das coisas (LACEY, 1999, pp. 118-120).

Nas formas tradicionais de entendimento prático, os conjuntos de requisitos para o controle são enquadrados pelas particularidades e complexidades de relações das sociedades nas quais eles são propostos e avaliados. Isto porque os conjuntos de requisitos são estabelecidos sistemática e empiricamente no interior de práticas sociais e culturais específicas, voltadas para promover valores distintos dos valores modernos do controle, sendo o produto indutivo de observações repetidas e transmitidas através de gerações (LACEY, 2008, p. 161). Por oposição, nas sociedades modernas, o conjunto de regularidades para o controle é geralmente encapsulado em teorias da ciência moderna, que são o produto de práticas científicas, caracterizadas por estratégias descontextualizadoras. Como essas estratégias descontextualizadoras abstraem as relações que os objetos materiais têm com a vida prática e com a ordem social e cósmica, elas acabam por encapsular as possibilidades do mundo de uma forma adequada para expandir nossas capacidades de controle sem subordinar os valores modernos do controle a outros valores sociais em voga. O entendimento em geral promovido pela ciência moderna é, assim, uma forma de representação sem reservas morais quanto às práticas de controle das coisas. Ele sustenta que as possibilidades de controle devem sempre ser trazidas à realização e seus riscos assumidos, endossando a perspectiva de valor do progresso tecnológico (ibid., pp. 168-170).

Existe, assim, como vemos, uma *relação mutuamente reforçadora* entre a ciência moderna e a perspectiva de valor do progresso tecnológico, que explica a adoção quase exclusiva de estratégias descontextualizadoras pela ciência (LACEY, 2010, p. 26). Apesar de ciência e tecnologia serem duas esferas da vida social constituídas em processos históricos com origens distintas, a partir do século XVII a interdependência entre elas ganhou proeminência. Foi a partir deste momento que a racionalidade na cultura ocidental moderna passou a ser concebida pelo entrelaçamento da ciência e da tecnologia. A ciência, como lugar privilegiado para a avaliação racional das representações do mundo, ofereceria o melhor entendimento da natureza, fornecendo a base teórica para o sucesso e o avanço tecnológicos. Já

a tecnologia, como lugar privilegiado para a avaliação racional das ações humanas orientadas para melhorar o exercício de nossos desígnios sobre o mundo, ofereceria os instrumentos para a realização desses desígnios, inclusive o de entender o mundo. Por isso, na modernidade a hegemonia da tecnologia na vida cotidiana é baseada na hegemonia da ciência como forma de entendimento do mundo e, esta, por sua vez, é baseada na sua contribuição para a hegemonia das práticas tecnológicas. Há, entre elas, na modernidade, uma relação indissociável de reforço mútuo, mas não uma completa identidade. Esta não identidade entre ciência e tecnologia pode ser afirmada pelo fato de que nem toda teoria científica aceita segundo a imparcialidade para um domínio de fenômenos pode informar práticas de controle e, conversamente, nem toda tecnologia é reflexo do ganho de conhecimento científico (LACEY, 1999, pp. 115-116).

A relação mutuamente reforçadora entre a ciência moderna e a perspectiva do progresso tecnológico no contexto social e histórico da modernidade vai além da forte afinidade entre os objetos das investigações sob as estratégias descontextualizadoras e das práticas de controle. Muitos desenvolvimentos científicos dependem de inovações tecnológicas, que fornecem os instrumentos necessários para conduzir as investigações empíricas requeridas pelo avanço teórico. É altamente provável que essas inovações tecnológicas sejam desenvolvidas e estejam disponíveis em sociedades nas quais os valores modernos do controle sejam profundamente manifestados. Isto porque dessas inovações tecnológicas visando o avanço das investigações científicas frequentemente advém resultados inesperados úteis, que podem servir para informar projetos práticos importantes para uma sociedade que busca continuamente expandir o controle sobre a natureza. Por sua vez, as práticas sociais que expressam os valores modernos do controle são compostas por uma variedade de objetos tecnológicos no reino da vida diária, com os quais a interação bem sucedida é alcançada por meio do entendimento propiciado pela ciência moderna. Dessa forma, vemos a reciprocidade e a interação dinâmica entre os interesses do entendimento sob estratégias descontextualizadoras (entendimento científico moderno) e da valorização moderna do controle nas sociedades modernas (LACEY, 1999, pp. 121-122).

Vimos que na pesquisa sob as estratégias descontextualizadoras os dados empíricos selecionados são frequentemente obtidos por meio da observação de fenômenos no curso de práticas experimentais. Essas práticas experimentais são produtos da ação intencional humana, que procura estabelecer condições de contorno dentro das quais os fenômenos são passíveis de serem descritos adequadamente em termos materialistas e explicados em termos da ordem subjacente. Essas práticas experimentais são, portanto, práticas exemplares de controle, pois fixam as condições iniciais de contorno, para buscar, dentro delas, relacionar eventos por meio de sua conexão causal ou de sua regularidade empírica. Isto é, a partir das condições experimentais torna-se possível generalizar práticas de controle, como as práticas tecnológicas, porque o espaço experimental é especialmente concebido para descobrir regularidades empíricas e suas condições de contorno, dois requisitos essenciais para o controle dos objetos naturais. A partir dessas práticas experimentais, podemos também generalizar explicações para fenômenos naturais, muitos dos quais não sujeitos às práticas de controle humano, como os fenômenos astronômicos. Dessa forma, do experimento, prática central da ciência moderna, situada entre os espaços tecnológico e natural, são extraídas as generalizações teóricas para explicar os fenômenos de um espaço e de outro, servindo de modelo de como as coisas são e de contexto para testes críticos dessas generalizações. No experimento, identificamos e confirmamos os poderes da natureza que somos capazes de dispor para o exercício do controle sobre as coisas (ibid., pp. 122-123).

Nem toda pesquisa científica é motivada pela busca de aplicações práticas nem pelo interesse em regularidades que, uma vez consolidadas, venham a se tornar itens de conjuntos de requisitos para o controle dos objetos materiais. Não se pode esquecer que as estratégias descontextualizadoras têm sido bem sucedidas em gerar teorias que aumentam nossa compreensão do domínio das possibilidades materiais, que é mais amplo e abarca o domínio das possibilidades de controle, mais restrito. No entanto, as pesquisas guiadas pelo interesse puramente intelectual são também realizadas sob estratégias descontextualizadoras e no contexto social do endossamento da perspectiva de valor do progresso tecnológico. Elas acabam por reforçar, portanto, as condições materiais e sociais vigentes e predominantes para as pesquisas científicas de um modo geral, servindo, em última instância, para

reiterar o quadro institucional e social instaurado, que vimos comentando (LACEY, 1999, pp. 124-126).

Vemos, assim, que as relações de reforço mútuo entre a adoção das estratégias descontextualizadoras e a perspectiva de valor do progresso tecnológico são múltiplas e polivantes, sendo a tese principal de Lacey que essas relações mútuas explicam a adoção quase exclusiva das estratégias descontextualizadoras pela ciência moderna.

1.6 Abordagem multiestratégica para a ciência

A partir da refutação da metafísica materialista e conseqüentemente da postulação de que as estratégias descontextualizadoras seriam valores cognitivos, essas, como vimos, passam a ser justificadas por meio de relações mutuamente reforçadoras com a perspectiva de valor do progresso tecnológico. Com esse passo, o modelo laceyano pode advogar para a pesquisa científica um alargamento de escopo em seus objetivos, não a reduzindo à investigação das possibilidades materiais do mundo e reivindicando a diversificação das práticas científicas, de modo que não se limitem às relações mutuamente reforçadoras entre a perspectiva de valor do progresso tecnológico e as estratégias descontextualizadoras.

O modelo laceyano das interações entre as atividades científicas e os valores é consistente com a existência de uma multiplicidade de estratégias, cada uma delas em interação com uma perspectiva particular de valor, explorando diferentes classes de possibilidades no mundo e gerando teorias corretamente aceitas que atenderiam aos interesses de cada perspectiva de valor que tenha se mostrado viável (*pluralismo multiestratégico*).

Para Lacey (1999, pp. 102-104), além das possibilidades materiais, existem possibilidades dos objetos materiais que só podem ser descritas e explicadas quando eles não são abstraídos de seus contextos humano, social e ecológico (*possibilidades não abstraídas*). O mundo é um poço inesgotável de possibilidades a serem investigadas, devendo haver possibilidades além das correntemente realizadas, de modo que proposições empíricas sobre o que é o mundo e quais são suas regularidades não são suficientes para exaurir o que o mundo pode vir a ser e o que ele poderia ter sido.

Com esse objetivo mais largo, a ciência passa a ser caracterizada simplesmente como uma investigação empírica sistemática (ibid., p. 100), sem qualquer vínculo com qualquer metodologia particular. Sendo assim, a ciência conduzida sob estratégias descontextualizadoras, forma predominante atualmente, é apenas um tipo de investigação possível. Um tipo muito importante no contexto sócio-histórico da modernidade, justificado em termos de sua ligação mutuamente reforçadora com os valores modernos do controle. Essa abordagem particular para a ciência pode ser caracterizada pelo objetivo de encapsular confiavelmente em teorias racionalmente aceitas as possibilidades de um domínio de objetos que podem servir bem aos interesses dos valores modernos do controle, e descobrir os meios para a realização de algumas possibilidades não realizadas até o momento (ibid., p. 103). Essa abordagem particular pode ser complementada por outras abordagens particulares para a ciência, associadas a outros valores sociais, de modo que, todas as abordagens em conjunto, possam fazer avançar o objetivo em aberto da ciência. Sendo assim, cada abordagem particular é uma instância de um esquema geral assim expresso por Lacey (1999, p. 104, tradução nossa):

[...] o objetivo da abordagem (...) da ciência é encapsular confiavelmente em teorias racionalmente aceitas as possibilidades de um domínio de objetos que podem servir bem ao projeto moral/social (...), e descobrir os meios de realização de possibilidades não realizadas até o momento.

Com isso, o modelo laceyano reinterpreta o ideal da abrangência, sustentado dentro da tradição científica moderna, que passa a ser entendido como segue (LACEY; MARICONDA, 2014, p. 647):

Em princípio, qualquer objeto/fenômeno do mundo - inclusive os fenômenos de importância no mundo da vida (e hipóteses sobre eles) e, portanto, fenômenos e objetos descobertos, produzidos ou propostos no curso de operações experimentais e de mensuração - pode ser submetido à pesquisa científica, com a esperança (pelo menos a longo prazo) de que ele pertença a um domínio para o qual uma teoria tornar-se-á aceita de acordo com a imparcialidade.

Com tal ideal, a ciência necessita ir além das estratégias descontextualizadoras, explorando *estratégias alternativas de restrição e seleção*, em interações mutuamente reforçadoras com perspectivas de valor nas quais o controle da natureza é subordinado a outros valores sociais, como, por exemplo, o valor da justiça social e o valor da estabilidade ecológica (LACEY, 1999, pp. 136-137). Nessas estratégias alternativas o entendimento dos objetos materiais não

requer sua abstração de suas relações com os fatores sociais, humanos e ecológicos, explorando possibilidades do mundo não encapsuladas nas estratégias descontextualizadoras (*possibilidades não abstraídas*). Por não abstrair seus objetos de estudo de suas relações humanas, sociais, ecológicas e cósmicas, essas estratégias alternativas de restrição e seleção são ditas *estratégias sensíveis ao contexto*.

As estratégias sensíveis ao contexto podem ser usadas para entender, por exemplo, as consequências ocasionadas pelo uso das inovações tecnocientíficas, como os riscos e malefícios advindos de seu uso num determinado contexto socioeconômico e cultural. Neste sentido, elas complementam as estratégias descontextualizadoras, que conseguem apenas investigar as consequências de uma aplicação tecnológica em termos de seus mecanismos físicos, químicos e biológicos, não considerando os mecanismos econômicos, sociais, políticos e culturais envolvidos. Como a legitimidade de implementação de qualquer inovação no mundo da vida deve considerar não apenas questões de eficácia, mas sobretudo questões relativas aos benefícios esperados, às consequências prejudiciais, aos riscos e à existência de alternativas melhores, as estratégias sensíveis ao contexto complementam as estratégias descontextualizadoras para investigar essas questões, de modo a subsidiarem as decisões relativas à introdução de inovações no mundo da vida (LACEY, 2014, p. 684).

O termo 'mundo da vida' refere-se aqui ao entorno cotidiano das pessoas, no qual se desenrola a vida humana, dotado de intencionalidade e pluralidade de sentidos. Neste mundo da vida, "os agentes humanos podem explorar, avaliar e deliberar sobre as possibilidades futuras e contribuir causalmente para quais delas serão realizadas, e (caracteristicamente) as suas ações são explicadas em termos de suas crenças, deliberações, fins, desejos, valores e outros estados intencionais, todos os quais são ininteligíveis quando separados das instituições e dos ecossistemas que são os constituintes principais de situações sócio-históricas" (LACEY; MARICONDA, 2014, p. 644).

Vimos que a justificação racional da prioridade concedida às estratégias descontextualizadoras assenta-se em razões para sustentar a perspectiva de valor do progresso tecnológico em detrimento de outras perspectivas de valor. Essas razões para a sustentação das estratégias descontextualizadoras de forma quase

exclusiva são pressupostos da perspectiva de valor do progresso tecnológico e, como tais, abertos à investigação empírica. Como são pressupostos acerca de fenômenos sociais e históricos, sua investigação apropriada requer estratégias sensíveis ao contexto. Na ausência atual dessas pesquisas e dos dados empíricos necessários para a avaliação dos pressupostos da perspectiva de valor do progresso tecnológico, sua aceitação é puramente ideológica, em virtude do papel que tal perspectiva tem na legitimação das instituições atualmente predominantes (ibid., 2014, p. 660). Daí a importância de se empreender a abordagem multiestratégica na ciência, para investigar os pressupostos atualmente assumidos para sustentar a perspectiva do progresso tecnológico e, dessa forma, obter evidências empíricas para sua sustentação ou para seu abandono ou para sua reformulação.

Para que as estratégias sensíveis ao contexto não se caracterizem apenas como uma possibilidade lógica dentro do modelo laceyano, mas se constituam efetivamente nas atividades científicas, elas precisam passar, como fizeram as estratégias descontextualizadoras, por dois testes básicos. O primeiro advém do ideal regulatório da imparcialidade da ciência, que implica a condição de que as estratégias sejam capazes de gerar crescentemente teorias que manifestem os valores cognitivos no mais alto grau possível, segundo os padrões mais rigorosos disponíveis de avaliação (*fecundidade*). Caso uma estratégia não seja capaz de gerar teorias aceitas segundo a imparcialidade, essa estratégia deve ser abandonada, pois não é capaz de produzir conhecimento científico. A fecundidade é, assim, condição necessária para a adoção de uma estratégia de pesquisa (LACEY, 2010, pp. 69-78).

O segundo teste diz respeito à significação das teorias geradas por uma determinada estratégia. Se essa estratégia não é capaz de gerar teorias cujos resultados sirvam para atender às expectativas de uma determinada comunidade, seja para explicar fenômenos relevantes no mundo da vida dessa comunidade, seja para resolver problemas práticos do dia a dia de sua vida social, tal estratégia de pesquisa deve ser reavaliada, de modo a torná-la mais significativa para o grupo social que a patrocina. Por isso, a *utilidade* de uma estratégia de restrição e seleção é também condição para adotar e manter uma estratégia de pesquisa (ibid., pp. 97-99).

Assim, se uma estratégia mostra-se fecunda em produzir teorias aceitas segundo as condições da imparcialidade e se seus produtos, tanto teóricos como práticos, são úteis, ou seja, são significativos para a sociedade que banca a pesquisa, como é o caso das estratégias descontextualizadoras, essa estratégia de pesquisa deve ser mantida e continuamente explorada, de modo a gerar mais e mais teorias, expandindo nosso entendimento das possibilidades genuínas do mundo segundo a perspectiva encampada por ela. Essas são as duas condições que explicam a vigência das estratégias descontextualizadoras na ciência moderna. Essas estratégias são fecundas porque capacitam a acumulação de uma quantidade enorme de conhecimento das estruturas, processos e leis subjacentes aos fenômenos do mundo, tornando possível muitas descobertas dos componentes e leis dessa ordem causal subjacente e identificando possibilidades para a ação humana previamente desconhecidas (LACEY; MARICONDA, 2014, p. 653). Elas são significativas porque capacitam o desenvolvimento tecnológico do mundo moderno e explicam os objetos técnicos/tecnológicos do mundo da vida moderna. Além disso, as estratégias descontextualizadoras são versáteis, originando regularmente novas estratégias para tratar de fenômenos que não puderam ser entendidos sob as estratégias antecedentes (ibid.).

Segundo o modelo laceyano a reivindicação da pesquisa multiestratégica na investigação científica vai depender de que as pesquisas sob as estratégias sensíveis ao contexto em curso e as que, porventura, venham a ser ainda empreendidas sejam fecundas e úteis, desafiando a alegação atualmente vigente de que apenas as estratégias descontextualizadoras são fecundas e úteis, alegação que procura justificar a hegemonia dessas últimas e da perspectiva do progresso tecnológico.

Como o entendimento gerado a partir das estratégias descontextualizadoras é a forma característica da vida moderna, capaz de explicar seus feitos materiais, qualquer forma de entendimento nova no contexto moderno, para ser significativa, precisa incorporar aquele entendimento, sob a pena de não ser capaz de explicar os objetos tecnológicos que constituem o mundo da vida nas sociedades modernas. Por isso, as estratégias sensíveis ao contexto devem enquadrar o entendimento gerado a partir das estratégias descontextualizadoras numa forma mais completa de

entendimento, capaz de estabelecer os limites para o uso das estratégias descontextualizadoras (LACEY, 1999, p. 137).

Do ponto de vista teórico, se uma variedade de estratégias fosse adotada na pesquisa científica e se essas estratégias se mostrassem fecundas e úteis, elas deveriam ser endossadas em pesquisas futuras, contribuindo, assim, para a expansão do entendimento científico sobre as variadas possibilidades do mundo, não apenas suas possibilidades materiais. No entanto, do ponto de vista prático a adoção de uma estratégia tende a solapar a adoção de outra, alternativa, em razão da competição por recursos materiais e financeiros, e em razão dos fatores políticos, econômicos e sociais que fazem com que uma perspectiva de valor seja dominante em relação a outras perspectivas viáveis de valor, como acontece atualmente com a perspectiva do progresso tecnológico, proeminente nas sociedades modernas, com papel central e dominante nos complexos correntes de valor que integram essas comunidades. Sendo assim, embora o modelo laceyano se abra para uma multiplicidade de estratégias na pesquisa científica, endossando o pluralismo metodológico na ciência, ele explica por que isto não ocorre atualmente nas práticas científicas, reconhecendo que as estratégias descontextualizadoras de restrição e seleção constituem uma opção quase exclusiva na pesquisa científica contemporânea (LACEY, 2010, pp.50-52).

1.7 Discussão da neutralidade na ciência

Uma vez que a metafísica materialista foi recusada, o produto da investigação científica não é o conhecimento do mundo tal como ele é, mas o conhecimento das possibilidades do mundo que possam interessar a uma determinada perspectiva de valor. Ainda que se possa argumentar que pesquisas científicas baseadas nas estratégias descontextualizadoras, que representam os fenômenos em abstração aos contextos de valor onde ocorrem, não implicam, em razão disso, quaisquer juízos de valor, sendo cognitivamente neutras, não se pode deixar de considerar que elas são motivadas, como vimos, pela perspectiva de valor do progresso tecnológico, de modo que a aplicação de seus resultados tende a favorecer complexos de valor que adotam tal perspectiva de valor, em detrimento de outros complexos de valor que não assumem esta perspectiva. Por isso, a ciência moderna é caracterizada pela não neutralidade aplicada. Vemos, assim, que com a recusa da

metafísica materialista, a imparcialidade deixa de implicar necessariamente a neutralidade da ciência. Por isso, essa questão da neutralidade da ciência precisa ser retomada e discutida frente ao modelo laceyano das interações entre as atividades científicas e os valores.

A princípio, podemos alegar que cada teoria científica aceita segundo a imparcialidade é aplicável a todos os complexos viáveis de valor, mas numa extensão muito variável, que não pode ser definida “a priori”, mas apenas empiricamente, caso a caso. A aplicação da ciência moderna é central aos processos produtivos e ao mundo da vida das sociedades que manifestam os valores modernos do controle, como as sociedades ocidentais industrializadas. No entanto, para complexos viáveis de valor que não se orientam pelas descobertas científicas, mas cujos pressupostos não são inviabilizados pelos produtos da ciência moderna, essa pode ter alguma aplicação, mas será sempre marginal, sendo que sua extensão requererá condições materiais e sociais que enfraquecerão esses complexos de valor e os laços sociais que eles orientam. Este parece ter sido o caso da aplicação das teorias científicas que informaram a revolução verde, que, apesar de ter aumentado a produção e rentabilidade de agricultores, trouxe, como efeitos colaterais, a destruição dos laços sociais nas comunidades de agricultores e os danos ambientais decorrentes do regime de monocultura (LACEY, 2010, pp. 203-215).

Ainda que seja assumida esta tese fraca da neutralidade, em oposição à tese forte advinda da metafísica materialista, ela implica que a adoção quase exclusiva de estratégias descontextualizadoras na pesquisa científica moderna privilegia os complexos de valor que assumem a perspectiva de valor do progresso tecnológico. Por isso, essa tese fraca contraria o próprio ideal regulador da neutralidade assumido pela tradição científica, para o qual a ciência deve ser objeto de valor para cada complexo viável de valor, constituindo-se em bem público e patrimônio da humanidade (LACEY, 2014, pp. 674-675).

Por isso, segundo o modelo laceyano, para que a neutralidade seja integralmente mantida na prática científica moderna, é imprescindível que essa prática seja estruturada por uma pluralidade de estratégias de pesquisa (abordagem multiestratégica), de modo que idealmente as pesquisas científicas em diferentes domínios de fenômenos atenderiam igualmente aos interesses de diferentes

complexos viáveis de valor. Assim, para cada perspectiva viável de valor nas sociedades contemporâneas, deve haver um tipo de pesquisa conduzida sob certa estratégia de restrição e seleção que mantém com essa perspectiva relações de reforço mútuo. É uma questão prática descobrir se, para uma perspectiva de valor particular, existe uma estratégia de pesquisa relevante, que seja fecunda.

Se a neutralidade e a abrangência podem efetivamente funcionar como ideais reguladores para a pesquisa científica é uma questão para resolução a partir de pesquisa conduzida a longo prazo que utilize efetivamente uma variedade de estratégias (LACEY, 2014, p. 678).

Lacey (1999, p. 237) propõe a substituição da tese fraca da neutralidade por uma tese ainda mais fraca: para qualquer complexo viável de valor, existem, em princípio, algumas teorias aceitas de acordo com a imparcialidade que são significativas em alguma extensão. Este enunciado reconhece que a significação de uma teoria pode transcender o contexto de sua origem e desenvolvimento, como é o caso da teoria genética, que, desenvolvida no contexto da perspectiva do progresso tecnológico e segundo estratégias descontextualizadoras, é capaz de informar projetos agroecológicos, que requerem estratégias sensíveis ao contexto, sendo guiados por perspectivas alternativas à perspectiva de valor do progresso tecnológico, como a perspectiva de justiça social e sustentabilidade. O enunciado também reconhece que quanto maior o poder explicativo de uma teoria, mais ela será significativa em alguma extensão para um conjunto maior de complexos viáveis de valor, o que explicaria por que as práticas associadas à ciência fundamental expressam em maior grau o valor da neutralidade.

Todavia, a tese ainda mais fraca da neutralidade reforça ainda mais que o grau e a extensão em que uma teoria é aplicável ao conjunto dos complexos viáveis de valor não podem ser aferidos “a priori”, sendo a investigação empírica dessa aplicação necessária para determinar se uma teoria científica particular é ou não significativa para um complexo viável de valor e, se for significativa, em que grau ela pode ser aplicada. Diferentemente da tese fraca da neutralidade, que afirmava que toda teoria aceita segundo a imparcialidade seria significativa em alguma extensão não trivial para qualquer complexo viável de valor, a tese ainda mais fraca da neutralidade muda o foco da neutralidade, que deixa de apontar para uma característica da teoria, associada aos desdobramentos de sua aplicação, para uma característica desejada e valorizada das práticas científicas – o ideal de que essas

práticas gerem teorias que sejam significativas para todos os complexos viáveis de valor (LACEY, 1999, pp. 238-239).

A neutralidade consistiria, para Lacey (1999, pp. 240-241), no valor regulador das práticas científicas (qualquer investigação empírica e sistemática), caracterizadas por uma variedade de estratégias e pela aceitação de teorias de acordo com a imparcialidade. Este valor regulador seria determinado pelas seguintes condições:

- a) a aceitação dessas teorias não implicaria compromissos de valor (primeira condição);
- b) a aceitação dessas teorias não enfraqueceria nem reforçaria a adoção de qualquer complexo viável de valor (segunda condição);
- c) em princípio, para qualquer complexo de valor que permanecesse viável à medida que o estoque de teorias aceitas de acordo com a imparcialidade se expandisse no curso da pesquisa que testa empiricamente suas pressuposições (terceira condição):
 - existiriam algumas teorias aceitas, desenvolvidas sob estratégias descontextualizadoras, que seriam significativas em alguma extensão (a);
 - existiriam algumas teorias aceitas, desenvolvidas sob estratégias sensíveis ao contexto, que seriam altamente significativas (b).

A *tese final da neutralidade* no modelo laceyano reconhece o valor das estratégias descontextualizadoras para o conjunto dos complexos viáveis de valor, admitindo que o controle sobre os objetos materiais tem lugar em todas as perspectivas de valor (LACEY, 1999, p. 241). Ela retém a primeira e a segunda condição da tese forte da neutralidade, reinterpretando-as como valores que devem guiar as práticas científicas em seu conjunto, que, conduzidas pela abordagem multiestratégica, atenderiam aos interesses variados e distintos dos complexos viáveis de valor. Com isso, ela restabelece a ideia original de neutralidade da ciência, que seria a de ciência como objeto de valor para qualquer complexo viável de valor, o que faria da ciência um bem público, um patrimônio comum da humanidade, por conter teorias que seriam significativas e aplicáveis para todos os complexos viáveis de valor (*significação e aplicação equiparadas*).

A tese final da neutralidade não representa um fato das práticas científicas correntes nem representa um valor endossado nessas práticas, mas é um valor endossado nas críticas a essas práticas (ibid.). Como vimos as práticas científicas são predominantemente conduzidas sob estratégias descontextualizadoras, não implicando a neutralidade na ciência, de modo que a versão da tese da neutralidade consistente com elas teria apenas o item 'a' da terceira condição, considerando que o pluralismo metodológico não pode ser perseguido nas comunidades nas quais a perspectiva de valor do progresso tecnológico é dominante. Essa neutralidade vigente é válida apenas para um conjunto muito específico de complexos de valor (aqueles que endossam centralmente a perspectiva de valor do progresso tecnológico), sendo uma neutralidade restritiva, em contradição com o próprio ideal regulador da neutralidade postulado pela tradição científica.

Como valor, a neutralidade defendida por Lacey será manifestada apenas no contexto de investigações empíricas sistemáticas conduzidas sob múltiplas estratégias de restrição e seleção, que possibilitem que as pressuposições dos complexos viáveis de valor sejam testadas pelo confronto com os resultados dessas investigações. Neste sentido, a pesquisa científica deve ser estendida para ser significativa não apenas para os *complexos socialmente sustentáveis*, isto é, complexos de valor compatíveis com as práticas vigentes informadas pelo conhecimento científico moderno e permitidas pelos arranjos sociais em vigor, mas também para os complexos possíveis de valor que se mostrem viáveis à medida que o estoque de teorias e postulados aceitos de acordo com imparcialidade aumenta no curso da pesquisa que objetiva testar empiricamente as pressuposições desses complexos de valor. Assim, a tese final da neutralidade resiste à identificação entre o conceito mais largo de complexo viável de valor e o conceito mais restritivo de complexo socialmente sustentável de valor (LACEY, 1999, pp. 241-243).

Conduzir a pesquisa para expressar a neutralidade defendida por Lacey requer condições materiais e sociais, que podem estar disponíveis apenas onde valores sociais específicos são altamente manifestados, onde possa vigorar certo ideal de florescimento humano, isto é, certo horizonte de condições e expectativas no interior do qual as pessoas venham a conduzir suas vidas de modo que elas e suas comunidades possam cultivar e expressar seus valores, vinculados à capacidade de ação individual responsável e ao bem estar de todos (LACEY, 2014, p. 682). Essas condições não estão disponíveis onde a perspectiva do progresso tecnológico vigora

como perspectiva de valor. Sendo assim, a tese da neutralidade não é neutra (LACEY, 1999, pp. 243-246).

Quando se assume a perspectiva de que o florescimento humano é melhor atendido de forma exclusiva pelo controle da natureza (perspectiva do progresso tecnológico), o que pressupõe que não existem *possibilidades perdidas*, isto é, possibilidades genuínas para o florescimento humano fora das condições sociais e materiais que manifestam a valorização moderna do controle, endossamos a tese da neutralidade consistente com as práticas científicas conduzidas sob estratégias descontextualizadoras (tese final da neutralidade, com exclusão do item 'b' da terceira condição), isto é, o valor da neutralidade expresso nas práticas atuais da pesquisa científica moderna (ibid.).

Quando se assume a perspectiva de que o florescimento humano, com todas as suas dimensões e variações, e considerando que possa ser um valor válido e bem expresso para o maior número de pessoas possíveis, somente pode ser plenamente atendido com uma multiplicidade de complexos viáveis de valor, que levam em conta a diversidade de interações possíveis de respeito mútuo entre o ser humano e a natureza, bem como as variadas formas harmônicas de relacionamento e convívio social (diversidade cultural e social), a neutralidade do modelo laceyano é endossada (LACEY, 1999, pp. 243-246).

No entanto, endossar a neutralidade como valor corrente implica abdicar da significação e aplicação equiparadas das teorias científicas, uma vez que essas teorias servem, nas atuais circunstâncias, predominantemente aos interesses dos complexos viáveis de valor nos quais a perspectiva de valor do progresso tecnológico é central. Apesar de a tradição científica moderna ter se desenvolvido por meio de relações mutuamente reforçadoras com a perspectiva do progresso tecnológico, ela sempre manteve a perspectiva de que nenhuma possibilidade da natureza e da natureza humana deveria ser deixada de fora da investigação científica, o que deve incluir, portanto, as possibilidades das coisas em interação com a diversidade de complexos viáveis de valor. Por isso, a significação e aplicação equiparadas das teorias científicas são valores da prática científica moderna, apesar de não devidamente articulados dentro da tradição científica moderna. A tese final da neutralidade propõe uma rearticulação desses valores, restabelecendo seus lugares de direito dentro das práticas científicas (ibid.).

Outra razão para sustentar a tese final da neutralidade é que ela garante uma maior expressão da imparcialidade nas práticas científicas. Apenas quando a abordagem multiestratégica se desenvolver nas práticas científicas é que teremos condições de avaliar as próprias teorias científicas segundo os mais rigorosos padrões de avaliação, isto porque será possível a comparação crítica de teorias desenvolvidas sob estratégias conflitantes de restrição e seleção como padrão recorrente – as teorias rivais avaliadas não serão apenas as desenvolvidas sob as estratégias descontextualizadoras (ibid.). A interação crítica entre os cientistas com diferentes perspectivas de valor seria capaz de criar um ambiente de pesquisa propício para desvelar todo tipo de influência que possa haver dos valores não cognitivos no momento de escolha entre teorias em competição, uma vez que a comparação entre teorias para esse fim não estaria limitada àquelas de acordo com os interesses e valores predominantes, por vezes compartilhados entre os membros da comunidade científica, das instituições científicas e das instituições exteriores à prática científica, e que, por isso, podem se manter escondidos (ibid., pp. 85-87).

Por fim, as práticas científicas manifestando a neutralidade do modelo laceyano possibilitariam submeter os pressupostos dos complexos viáveis de valor dominantes (em cujo cerne está a perspectiva de valor do progresso tecnológico) à investigação empírica de longo prazo, de modo que se tornariam aceitos de acordo com a imparcialidade, ou refutados, ao invés de se manterem ideologicamente, como ocorre atualmente sob as pesquisas científicas conduzidas sob as estratégias descontextualizadoras. Esse caminho aberto pela tese final da neutralidade na ciência possibilitaria explorar novos modos possíveis de vidas humanas mais prósperas, por trazer conhecimento das possibilidades reivindicadas da natureza e da natureza humana, especialmente as pertinentes para os complexos de valor com significação política e social contemporânea (LACEY, 1999, pp. 85-87).

Por causa da indisponibilidade de condições sociais e materiais necessárias para expressar a neutralidade do modelo laceyano nas práticas científicas correntes, o tipo de pesquisa que manifesta essa neutralidade existe apenas nos caminhos da marginalidade criativa e da transformação a partir de baixo. Por existirem instituições bem estabelecidas nas sociedades contemporâneas que manifestam a perspectiva de valor do progresso tecnológico, o caminho do ajustamento leva prontamente ao endossamento da neutralidade vigente nas práticas científicas conduzidas sob estratégias descontextualizadoras (ibid., p. 247).

1.8 Cinco momentos da prática científica

A proposta de Lacey é o de uma ciência motivada por valores não cognitivos, mas que preserva a imparcialidade, ao julgar as teorias com base exclusiva nos valores cognitivos. O método científico aparece, então, dividido em duas partes – nível das estratégias de restrição e seleção e nível da escolha de teorias – e envolvendo cinco momentos lógicos (LACEY; MARICONDA, 2014, pp. 645-649):

- a) escolha da estratégia de restrição e seleção: momento da escolha dos tipos de fenômenos e possibilidades a serem investigados e dos tipos de teorias que serão provisoriamente consideradas :

[...] as pesquisas sobre tipos diferentes de fenômenos podem requerer a adoção de tipos diferentes de estratégias, o que talvez seja óbvio a respeito dos fenômenos investigados em disciplinas diferentes (basta pensar nas diferenças entre as estratégias da mecânica newtoniana, da química molecular, da mecânica quântica e da genética)(LACEY; MARICONDA, 2014, p. 646);

- b) desenvolvimento da pesquisa: momento do empreendimento da pesquisa, no qual são escolhidos os objetos particulares a serem investigados dentro do domínio geral escolhido previamente – neste momento os valores éticos e sociais influenciam a escolha dos objetos particulares que serão investigados e a condução da pesquisa ocorre dentro de limites valorativos estipulados pelos códigos de ética da conduta científica;
- c) avaliação da teoria: momento no qual as teorias elaboradas segundo as estratégias de pesquisa escolhidas e desenvolvidas segundo programas de pesquisa particulares são avaliadas quanto ao seu grau de adequação empírica, de consistência, de poder explicativo e preditivo etc., isto é, são aceitas, refutadas ou provisoriamente mantidas conforme manifestem em maior ou menor grau os valores cognitivos;
- d) difusão dos resultados científicos: momento de disseminação dos resultados da pesquisa por meio de publicações especializadas, na educação de novas gerações de pesquisadores e na divulgação para o público leigo – nesta etapa estão implicadas diversas questões políticas, sociais e éticas, como a da classificação dos conhecimentos científicos em secretos por governos e

corporações financiadoras das pesquisas, que têm impacto nos valores de imparcialidade, neutralidade e autonomia da prática científica;

- e) aplicação da teoria: momento no qual as teorias aceitas são usadas para informar projetos práticos da vida cotidiana, como o desenvolvimento, introdução, operação e manutenção dos inventos tecnológicos, de modo que os resultados da pesquisa científica tornam-se fatores causais da transformação do mundo social; este é também o momento em que as teorias aceitas são dispostas para explicar os fenômenos significativos da vida social, que estão associados a uma perspectiva de valor encampada por um tipo de sociedade, como a perspectiva da valorização moderna do controle, adotada pelas sociedades ocidentais modernas (LACEY, 1999, pp. 14-16).

Uma aplicação serve sempre a interesses que refletem valores éticos e sociais específicos, sendo desenvolvida e implementada em razão dos benefícios esperados por esses interesses, bem como em razão da expectativa de que esses benefícios superem as possíveis consequências negativas implicadas nos seus efeitos colaterais e de que a proporção dos benefícios em relação aos malefícios seja maior do que se pode esperar de outras ações e práticas potencialmente competidoras. Por isso, o momento de aplicação da teoria envolve questões de *legitimidade*, como seus efeitos danosos, riscos, benefícios e alternativas, que são avaliadas por meio de considerações imbricadas por valores éticos e sociais (LACEY; MARICONDA, 2014, p. 649).

Essas diferentes etapas da atividade científica são sobretudo momentos lógicos, e não necessariamente momentos temporais, pois não indicam a rigor uma sequência temporal definida para a atividade científica. Se a escolha da estratégia é o ponto de partida para qualquer investigação científica, os resultados alcançados no momento da avaliação das teorias geradas segundo uma determinada estratégia vão determinar se uma comunidade científica continuará ou não a seguir essa estratégia. Como se vê os momentos lógicos interagem entre si, mas preserva-se nesta interação o julgamento imparcial das teorias científicas (LACEY, 2010, pp. 48-50).

1.9 Autonomia localizada

O modelo laceyano explica como a imparcialidade pode ser preservada e a neutralidade alcançada sem a autonomia da ciência, isto é, sem que a prática científica seja livre de interferências externas. A imparcialidade é preservada toda vez que as formas de avaliação das teorias e hipóteses forem baseadas exclusivamente em valores cognitivos, segundo os padrões de avaliação mais rigorosos disponíveis, independentemente dos valores não cognitivos que possam estar influenciando outros momentos da prática científica. Já, a neutralidade será alcançada quando uma pluralidade de abordagens metodológicas, cada qual atrelada a um complexo viável de valor, caracterizar a prática científica, de modo que a ciência possa atender integralmente aos interesses de uma diversidade de perspectivas viáveis de valor.

No modelo a influência de fontes externas de recursos sobre as instituições científicas é aceita para a prática científica, desde que circunscrita aos momentos de escolha de estratégias de restrição e seleção, de desenvolvimento de pesquisas e de difusão e aplicação dos resultados dessas pesquisas. A prática científica é atravessada por compromissos firmados entre os cientistas, de um lado, e grupos sociais, de outro, principalmente os grupos sociais com poder político e econômico, que são os que garantem os recursos materiais e sociais necessários para que as pesquisas se realizem. Em primeiro lugar, esses compromissos aceitáveis dizem respeito aos problemas e domínios de fenômenos a serem investigados pela ciência, escolhidos com base em interesses sociais dominantes. Em segundo lugar, esses compromissos aceitáveis acabam por moldar a forma e o conteúdo da educação científica, bem como a estrutura e as atividades das instituições científicas. Assim, ao invés de ser conduzida exclusivamente por valores cognitivos, como postula os defensores da ciência livre de valores não cognitivos, a prática científica se caracteriza, assim, dentro do modelo laceyano, como fortemente influenciada por valores pessoais e sociais dominantes.

Sendo assim, o que resta de autonomia na prática científica no modelo laceyano é uma *autonomia localizada*. Ela consiste em facultar aos cientistas a liberdade para estabelecer compromissos aceitáveis com quaisquer perspectivas de valor, concedendo, por sua vez, a essas perspectivas de valor o papel de determinar

as agendas de pesquisa, os problemas a ser investigados e os domínios de fenômenos a ser estudados (LACEY, 1999, p. 11).

As condições gerais para a autonomia localizada da ciência no modelo laceyano seriam (LONGINO³, 1990 apud LACEY, 1999, pp. 250-253):

- a) as pesquisas devem ser conduzidas sob uma variedade de estratégias, cada qual em interação mutuamente reforçadora com um complexo viável corrente de valor, de modo que, sendo bem sucedidas, produzirão teorias significativas, capazes de colocar pressuposições dos complexos viáveis de valor em contato com os resultados das investigações empíricas;
- b) a distinção de níveis (estratégias/teorias) deve ser estritamente mantida nas pesquisas científicas, com o papel dos valores não cognitivos limitado a fornecer sustentação à adoção de estratégias de restrição e seleção, de modo que as práticas de cada comunidade engajada em pesquisas empíricas sistemáticas sejam delimitadas por uma versão da autonomia localizada;
- c) as pesquisas devem ser conduzidas por uma variedade de comunidades em interação, para que as teorias aceitas de acordo com a imparcialidade em cada comunidade sejam avaliadas criticamente por outras comunidades;
- d) uma comunidade de pesquisa pode não ser separável de uma comunidade engajada num conjunto de práticas particulares; por isso, a questão de quem deve ser considerado na comunidade de pesquisa é uma questão flexível e aberta;
- e) a comunidade de comunidades engajadas na investigação empírica sistemática precisa manifestar difusão de poder, para produzir padrões elevados para estimar o grau de manifestação dos valores cognitivos, para acessar possibilidades perdidas e para se contrapor ao impacto dos valores institucionalizados na produção científica, que são parte de algum sistema socioeconômico dominante.

Vimos que o sistema socioeconômico dominante nas sociedades modernas industrializadas é organizado em torno da perspectiva do progresso tecnológico. Por isso, a ciência moderna é marcada por estratégias descontextualizadoras, que

³ LONGINO, H. E. **Science as social knowledge**. Princeton: Princeton University Press, 1990.

atendem aos interesses dos complexos de valor hierarquizados em função da perspectiva do progresso tecnológico. Como as aplicações tecnológicas que têm sido mais valorizadas hoje em dia nas sociedades modernas industrializadas são as inovações, a ciência moderna atual tende a se caracterizar como *tecnociência comercialmente orientada*.

O amálgama entre entendimento científico moderno e sua aplicação, refletido nos compromissos aceitáveis da autonomia localizada da ciência, corresponde à tese da tecnociência, defendida por uma variedade de filósofos e sociólogos pós-modernos. Ela sustenta que ciência e tecnologia são tão intimamente interligadas que, embora abstratamente se possa fazer a distinção – a ciência é o conhecimento objetivo da realidade, sendo sua aplicação, para tornar mais eficiente a produção da vida material do homem, a tecnologia -, na prática ela tende a desaparecer, formando uma unidade. Um dos pilares dessa tese está na contribuição da tecnologia com o instrumental necessário para a realização dos experimentos científicos, fazendo avançar o conhecimento básico a partir dos resultados alcançados nesses experimentos dotados da mais alta tecnologia. Outro pilar está na exigência pelos órgãos de fomento das pesquisas científicas de que os projetos tenham potencial de aplicação, com indicações cada vez mais específicas das inovações visadas (OLIVEIRA, 2004, pp. 243-246).

Como inovação significa invenção rentável e quem determina o que é rentável é o mercado, nessa breve explanação torna-se possível vislumbrar a forte intervenção atualmente em vigor do mercado, de seus pressupostos e interesses, nos rumos da pesquisa científica básica em diversos países do mundo (OLIVEIRA, 2012, p. 2471). As relações mutuamente reforçadoras entre as pesquisas científicas conduzidas por estratégias descontextualizadoras e a perspectiva do progresso tecnológico são interpretadas e valorizadas nas sociedades contemporâneas no interior da perspectiva de valor do capital e do mercado (LACEY; MARICONDA, 2014, pp. 657-659). Dessa forma, as pesquisas tecnocientíficas são orientadas para obter principalmente inovações industriais e técnicas que possam contribuir para aumentar a competitividade e a produtividade de empresas, para alavancar suas vendas e seus lucros, e, assim, promover o desenvolvimento socioeconômico em vigor no mundo. Essa *tecnociência comercialmente orientada* é fonte produtiva de inovações eficazes que estão contribuindo para aumentar a incorporação de

perspectivas de valor do progresso tecnológico e do capital e do mercado nas instituições contemporâneas, fortalecendo, assim, a trajetória social e econômica do capitalismo atual (OLIVEIRA, 2012, pp. 2469-2473).

Este fato gera consequências recorrentes para as instituições científicas com respeito às prioridades de pesquisa, às condições para seu empreendimento, às fontes para seu financiamento, à avaliação dos resultados da pesquisa, às oportunidades de emprego dos cientistas e ao avanço nas suas carreiras, ao conteúdo do currículo da educação científica e à estrutura das próprias instituições científicas e aos valores incorporados nela (LACEY, 2014, p. 683).

Apesar de grande parte do financiamento para a pesquisa científica atualmente nas sociedades de economia de mercado estar motivada pelas ligações entre a pesquisa científica, a inovação tecnocientífica, a obtenção de vantagens econômicas e o crescimento econômico, muita pesquisa básica continua sendo realizada nas suas instituições científicas. Isto porque conduzir pesquisa que visa obter inovações com potencial de utilização prática imediata requer frequentemente como condição preliminar a pesquisa básica e os instrumentos de medida, aparelhos experimentais, computadores com grande capacidade de análise de dados e simulação de processos requeridos pela pesquisa básica. Na avaliação de Lacey (2014, pp. 677):

Por conseguinte, apesar de seus objetivos serem muito distantes dos interesses imediatos do mercado, continuam a ser conduzidas pesquisas que buscam desenvolvimentos teóricos ou a construção de novos instrumentos, algumas vezes, porque certos tipos de produtos não podem ser desenvolvidos sem o seu *input*, mas, outras vezes, apenas por causa da esperança de que, mais cedo ou mais tarde, ela conduzirá ao retorno do investimento (*pay off*) feito nessa pesquisa (...) e, como um indício disso, a obtenção de patentes tornou-se um critério para a avaliação da produtividade científica em muitas instituições científicas e universidades.

Vale a ressalva de que o grau de fusão dos domínios da ciência e da tecnologia não é o mesmo para toda ciência, variando consideravelmente de uma área do conhecimento a outra (esta fusão parece ter atingido seu ápice na biotecnologia), nem se dá da mesma maneira em todos os países onde o processo está em curso (OLIVEIRA, 2004, p. 246).

O que a tese da tecnociência aponta é que, apesar de a ciência e da tecnologia poderem ainda ser separadas institucionalmente, com a pesquisa básica sendo predominantemente praticada nas universidades e nos institutos públicos e a

tecnologia sendo desenvolvida nas empresas, existe uma tendência em vigor nas sociedades de economia de mercado em uni-las, em fazê-las interagir cada vez mais, por meio da associação entre universidades e empresas em projetos de pesquisa, que visam patentes e inovações, com respaldo de leis nacionais, como é o caso do Marco Legal da Ciência, Tecnologia e Inovação, sancionado pela presidente Dilma Roussef em 12 de janeiro de 2016.

Fazendo um balanço do que foi exposto, podemos afirmar que estamos diante de um dilema: por um lado, as instituições científicas atuais são dominadas pela pesquisa tecnocientífica comercialmente orientada, que enfraqueceu os ideais tradicionais regulatórios da prática científica (imparcialidade, neutralidade, autonomia e abrangência); por outro, a abordagem multiestratégia proposta pelo modelo laceyano restabelece os ideais tradicionais, mas carece das condições institucionais, materiais e sociais adequadas para seu desenvolvimento. Podemos nos conformar com o estágio atual da ciência institucionalizada, alegando que a abordagem multiestratégica não é uma opção realista, postura política que pressupõe que os poderes políticos e econômicos atualmente dominantes serão capazes de enfrentar quaisquer desafios advindos da incorporação de valores opostos às perspectivas do progresso tecnológico e do capital e mercado. Ou podemos nos alinhar às perspectivas alternativas de valor e aos ideais da tradição científica moderna, desenvolvendo onde for possível (universidades, organizações não governamentais, programas governamentais e organizações internacionais) pesquisas conduzidas sob estratégias sensíveis ao contexto, na esperança de que seu desenvolvimento traga a reinstitucionalização da ciência para a abordagem multiestratégica. O importante é destacar que não existem razões científicas, para não abrir mais espaços nas instituições científicas para o desenvolvimento e o ensino da abordagem multiestratégica (LACEY, 2014, pp. 692-693).

2. OS VALORES E O DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E CIENTÍFICO DO CIMENTO

O objetivo deste capítulo é caracterizar e desenvolver o objeto de estudo desta dissertação de mestrado. Episódios-chave do desenvolvimento técnico do cimento e da pesquisa científica sobre esse aglomerante serão descritos e interpretados à luz do modelo laceyano das interações entre as atividades científicas e os valores, desenvolvido no primeiro capítulo. A tese central defendida no capítulo é a de que o modelo teórico de referência tem elementos teóricos úteis para explicar a estrutura e a dinâmica das pesquisas tecnocientíficas sobre o cimento.

Parte-se das primeiras evidências sobre o uso de aglomerantes na história da humanidade, como o barro, a cal, o gesso e o cimento pozolânico, com a ênfase no cimento pozolânico desenvolvido pelos romanos por suas propriedades hidráulicas, isto é, suas características aglomerantes relacionadas ao seu emprego em construções em contato com a água. Com relação à cal e ao cimento pozolânico, são analisados os conhecimentos e as atividades empíricas envolvidas, tanto na identificação, extração e transporte da rocha calcária a partir das quais esses aglomerantes eram produzidos quanto nos processos de calcinação, extinção, preparo, armazenagem e uso desses materiais construtivos. Nessa análise esses conhecimentos tradicionais serão apropriadamente caracterizados como científicos, por seu caráter empírico e sistemático, tese derivada do modelo teórico, por este postular, para a ciência, o pluralismo multiestratégico (LACEY, 2010, p. 164).

É esse conhecimento tradicional sobre fabricação e uso do cimento pozolânico que é posto à prova por John Smeaton (1724-1792) quando da reconstrução do Farol de Eddystone, no século XVIII. Com seus experimentos com as bolas de argamassas, por meio dos quais Smeaton buscou encontrar uma argamassa hidráulica apropriada para ser usada na construção do Farol, o construtor inglês obteve fortes evidências empíricas para a refutação de algumas hipóteses construtivas assumidas desde os tempos de Vitruvius. Na dissertação será defendida a tese de que as investigações empíricas de Smeaton já apresentavam traços da moderna metodologia científica, como a centralidade do experimento no teste de hipóteses, o controle quantitativo ou qualitativo de variáveis experimentais como expressão do propósito do controle da natureza, a busca pela

ordem subjacente aos fenômenos investigados e a prioridade do valor cognitivo da adequação empírica. Por sua vez, defendo também que as investigações de Smeaton foram bem sucedidas por manterem separados os níveis da escolha das estratégias de pesquisa (influenciado por valores não cognitivos) e da avaliação das hipóteses de pesquisa (baseado exclusivamente em valores cognitivos), preservando, assim, a imparcialidade da pesquisa científica.

Com suas descobertas, Smeaton abriu o caminho para as pesquisas tecnocientíficas visando a fabricação de cimento a partir de calcário e argila, que redundaram, primeiramente, no patenteamento dos cimentos naturais, em seguida, no patenteamento dos cimentos artificiais e, por fim, na descoberta e disseminação do cimento moderno, mundialmente conhecido como cimento Portland. Tais pesquisas são caracterizadas no trabalho como tecnocientíficas comercialmente orientadas, na medida em que, para além de seu caráter teórico de busca das causas subjacentes ao fenômeno da hidráulidade, essas pesquisas, na maioria das vezes, almejam a obtenção de um produto padronizado rentável, isto é, uma inovação, na terminologia contemporânea. Para esses propósitos teóricos e práticos, as pesquisas empreendidas por Louis Joseph Vicat (1786-1861) foram um marco, pois estabeleceram, pela primeira vez, as proporções de calcário e argila nas misturas para se produzir cales hidráulicas e cimentos artificiais, abrindo caminho tanto para as investigações teóricas sobre os compostos formados na calcinação de calcário e argila quanto para os desenvolvimentos dos tipos de cimentos industrializados a partir do planejamento adequado do controle de misturas de matérias-primas.

O feito de Vicat é explicado a partir da mobilização do instrumental teórico e metodológico da química moderna consolidada em seu tempo, como a conceituação de elementos e compostos químicos, a análise química quantitativa, os procedimentos experimentais modernos de análise e síntese químicas, a nova nomenclatura das substâncias e a teoria atômica de Dalton. Com esse ferramental teórico-metodológico à sua disposição e com seu trabalho experimental meticuloso e sistemático de análises e sínteses químicas, Vicat demonstrou que todas as cales hidráulicas eram originárias de rochas calcáreas argiláceas, sendo viável produzir cales e cimentos hidráulicos a partir da adequada mistura dessas duas espécies químicas.

Deste ponto até a invenção do cimento moderno foi apenas um passo de aquecer as misturas até o ponto de sintetização de compostos responsáveis pela hidráulidade do clínquer, substância principal da composição do cimento Portland. A descoberta do cimento Portland foi o coroamento de milênios de pesquisas para se encontrar um aglomerante hidráulico, capaz de produzir uma argamassa com qualidades técnicas almejadas pelos construtores, com resistência mecânica e durabilidade superiores. Mas, não foi o passo final em termos da pesquisa tecnocientífica sobre o cimento. Apesar de se saber que a calcinação de cimentos produzia compostos com cal, sílica e alumina, não se conhecia quais compostos eram esses e como eles reagiam com a água para explicar o fenômeno da hidráulidade.

Fazendo uso consistente do microscópio, aliado com os melhores procedimentos de análise e síntese química de sua época, Henri Le Chatelier (1850-1936) descortinou, no final do século XIX, um novo campo de pesquisa – os estudos de constituição e caracterização dos constituintes do cimento Portland. Esses estudos giraram em torno da existência ou não do silicato tricálcico como componente principal responsável pela hidráulidade dos cimentos, da composição química da alita, principal cristal formado durante a calcinação e cristalização do cimento Portland, da presença ou não de cal livre nos cimentos anidros, das condições de concentração de matérias-primas e de temperatura durante a calcinação e a cristalização para a formação de compostos nos cimentos em diferentes proporções e das funções de cada composto para a hidratação, pega, endurecimento e resistência mecânica dos cimentos.

Esses estudos mostraram-se promissores em termos de resultados teóricos e práticos, adquirindo proeminência dentro da área de pesquisa da química dos cimentos desde o começo do século XX até os dias de hoje, com a incorporação progressiva de novos e mais potentes instrumentos e aparelhos de pesquisa, cada vez mais sofisticados tecnologicamente. Sua importância para este trabalho decorre do fato de retratarem com perfeição uma das teses centrais do modelo teórico de referência – o predomínio das estratégias descontextualizadoras no campo das pesquisas sobre a química do cimento em razão do endossamento pela comunidade científica do complexo de valor do progresso tecnológico.

As perguntas que perduram ao final do capítulo são: haveria outros caminhos possíveis de serem trilhados pela pesquisa sobre o cimento, caso ela fosse influenciada por outros valores não cognitivos, quais caminhos seriam esses e para quais resultados práticos levariam?

2.1 Primórdios do uso de argamassas

O uso de um material aglomerante na construção de edificações, isto é, um material com propriedades adesivas e coesivas, capaz de unir ou revestir rochas, areias, blocos de pedra ou barro e outros materiais de construção num todo compacto, remonta aos primórdios da construção. Jazidas naturais de compostos cimentícios, formados pela reação de combustão espontânea entre o calcário e o xisto oleoso, foram datados de 12 mil anos antes de Cristo, em Israel. Autores, como Kozlowski e Kempisty (1990, pp. 357-360), Rollefson⁴ (1990, pp.33-54 apud HANZLICEK et al., 2012, p. 57) e Garfinkel (1987, pp. 69-72), encontraram evidências do uso de argamassas feitas de rochas calcárias, gesso ou cal em construções da Era Neolítica, no Oriente Médio. Para Gourdin e Kingery (1975, pp. 133-150) e Kingery, Vandiver e Prickett (1988, pp. 219-244), a queima do calcário para sua transformação em cal⁵ aconteceu antes mesmo da queima do barro para a confecção de potes cerâmicos, sendo a primeira pirotecnologia desenvolvida pelo homem.

O barro associado com a palha, bem como o gesso e a cal, foram usados pelos egípcios antigos para unir os blocos de pedra das pirâmides, por volta de 3000 a.C. Essa argamassa egípcia antiga de cal, usada para unir os blocos das pirâmides de Queóps, é referida no trabalho de Vicat (1837, pp. 114-116).

A argamassa de cal apresenta baixa resistência ao tempo, requerendo reparos periódicos. Além disso, ela não pode ser usada em estruturas em contato permanente ou periódico com a água, porque a cal hidratada é solúvel na água. Em razão dessas desvantagens no uso da argamassa de cal, os antigos romanos

⁴ ROLLEFSON, G. The uses of plaster at Neolithic'Ain Ghazal. *Archeomaterials*, Jordan, v. 4, n.1, pp. 33-54, 1990.

⁵A calcinação de rochas calcárias puras, isto é, contendo somente carbonato de cálcio (CaCO_3), a uma temperatura de aproximadamente 900°C , produz cal viva (CaO) e gás carbônico (CO_2). Frequentemente, nas rochas calcárias, o carbonato de cálcio está associado ao carbonato de magnésio e pode ou não estar associado a impurezas, como a sílica, os óxidos de ferro e de alumínio. Dependendo da proporção dessas impurezas nas rochas calcárias, a cal produzida terá propriedades bem diferentes.

desenvolveram uma argamassa com propriedades hidráulicas, isto é, capaz de se estabelecer e endurecer em contato e sob a água e de se manter estável nessas condições (COWAN; SMITH, 1988, pp.113-114). Nesta argamassa hidráulica, além da cal, da areia e de outros materiais, eram adicionadas pozolanas⁶, nome genérico para os materiais capazes de conferir hidraulicidade às argamassas, tornando-as adequadas para o uso em construções marítimas, de armazenamento e transporte de água e em obras em contato constante com a água e a umidade (DAVEY, 1961, p. 98).

A tecnologia da argamassa foi difundida para os gregos e, depois, para os romanos a partir do Oriente Médio, por volta de 500 a.C. (ibid., p.102). O conhecimento sobre os materiais construtivos e a forma de seu emprego veio dos egípcios e persas por um processo de transmissão através das civilizações mesopotâmicas e mediterrâneas (COLLEPARDI⁷, 1997, pp. 673-694 apud KIRCA, 2005, p. 91). Estudos da cisterna de Kameiros-Rhodes, datada de 500 anos antes de Cristo, apontaram o emprego de argamassa de cimento⁸ para cobrir suas paredes (MALINOWSKI⁹, 1981, pp. 341-349 apud MOROPOULOU; BAKOLAS; ANAGNOSTOPOULOU, 2005, p. 295). Os romanos usavam o cimento pozolânico onde era importante conter a penetração da umidade, como no revestimento das superfícies internas de túneis, sistemas de drenagem, banhos, tanques e aquedutos, para juntar blocos de pedra em construções próximas à água (como fundações, arcos de pontes e paredes), para pavimentação e para selar as telhas usadas na construção de telhados. Nos lugares onde não havia materiais pozolânicos naturais, como as cinzas vulcânicas encontradas próximas ao Monte Vesúvio, na cidade de Pozzuoli (de onde deriva o termo), os romanos usavam as pozolanas artificiais,

⁶ Pozolanas são materiais siliciosos ou sílico-aluminosos, naturais ou artificiais, como as cinzas vulcânicas, terras diatomáceas e algumas argilas e xistos, que, quando finamente moídos e na presença de água, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio em temperaturas ordinárias, formando compostos com propriedades aglomerantes (Erdogän, 1997).

⁷ COLLEPARDI, M. A historical review of development of chemical and mineral admixtures for use in stucco and terrazzo floor. **Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on 'Superplasticizers and other chemical admixture in concrete'**, [S.l.], SP 173, 1997.

⁸ O termo 'cimento' está sendo usado aqui em contraposição ao termo 'cal', para distinguir a argamassa de cimento da argamassa de cal em termos de essas argamassas possuírem ou não propriedades hidráulicas. No decorrer do capítulo, veremos que essa distinção não se manterá, uma vez que a cal comum (cal não hidráulica) será contraposta à cal hidráulica; já, o cimento antigo era, na realidade, um tipo de cimento (cimento pozolânico), distinto do cimento moderno (cimento Portland).

⁹ MALINOWSKI, R. Ancient mortars and concretes : durability aspects. **Proceedings ICCROM Symposium**, Rome, ICCROM, 1981.

como os restos moídos de tijolos, telhas e potes (Davey, 1961, p. 103). Eles espalharam o uso do cimento pozolânico em todo o Império, na Europa, África e oeste da Ásia.

Essas referências do uso do cimento pelos romanos estão contidas no livro do arquiteto Vitruvius Pollio – “De Architectura” – no qual ele relata que a pozolana, quando misturada com cal, era capaz de fazer a argamassa se consolidar e endurecer sob a água (VITRUVIUS¹⁰, 1960 apud KIRCA, 2005, p. 87). Os arquitetos e construtores do Império Romano devem ter se convencido de que a pozolana melhorava as propriedades construtivas de suas argamassas e concretos¹¹, pois ela foi usada em quase todas as edificações do século I a.C em diante (SINGER et al., 1965, p. 410).

2.2 Tipos de conhecimento envolvidos na produção e uso das argamassas de cal e cimento

O primeiro passo para a produção de cal foi o de encontrar as rochas adequadas, compostas por carbonatos de cálcio, como os calcários e os mármore. Por meio de tentativas e erros e do acúmulo de experiências ao longo do tempo, os homens adquiriram a capacidade de identificar as rochas apropriadas para produzir a cal, bem como as formas mais produtivas para sua extração manual e para seu transporte até os locais em que seriam empregadas (KRUMNACHER, 2001, pp. 4-5).

No local de seu emprego, as rochas calcárias eram despedaçadas até o tamanho de dois punhos fechados, dimensão descoberta, também por experiência acumulada, como a que permitia a queima mais completa da rocha (ibid.). Em seguida, esses pedaços de rocha eram amontoados em camadas, nas quais eram abertos buracos ou canais onde era colocado o combustível, ou eram colocados em fornos construídos de rochas ou tijolos, formados por duas camadas – a inferior para o combustível e a superior para o material a ser calcinado. Em Khafaje foram encontradas as ruínas de um forno para a produção de cal e tijolos, datada de 3000

¹⁰ VITRUVIUS, P. **Vitruvius: ten book on Architectura**. New York : Dover Publications, 1960.

¹¹ A distinção básica entre a argamassa de cimento e o concreto romano é que neste, além da areia, água e cimento pozolânico, entram em sua composição as rochas, tijolos quebrados e outros materiais, que lhe conferem resistência estrutural a forças de compressão advindas do peso dos corpos, sendo material adequado para construção de fundações, paredes, arcos, domos e outras estruturas portantes.

a.C., muito parecido com o forno usado pelos romanos para a mesma finalidade milênios depois (DAVEY, 1961, pp. 65-66). Segundo Krumnacher (2001, p. 7), os responsáveis pela calcinação da rocha calcária precisavam ser bem treinados para o gerenciamento adequado da calcinação, trabalhando por horas para garantir a queima completa da rocha. Ainda segundo ele, nos tempos dos romanos, os responsáveis por essa difícil tarefa eram as pessoas aprisionadas, como os criminosos.

Após a calcinação, a cal virgem, para ser usada na construção, era hidratada¹², processo que fazia os pedaços de cal virgem se transformarem num fino pó de cal hidratada. No Império Romano, eram conhecidos três métodos de transformação da cal virgem em cal hidratada (MCKEE¹³, 1971, p. 21 apud KRUMNACHER, 2001, pp. 10-11, tradução nossa):

- a) regamento: a quantidade de água igual a um terço da massa da cal virgem era regada sobre ela, o que provocava uma reação exotérmica, fazendo o material expandir e se tornar pó, aumentando seu volume;
- b) imersão: a cal era colocada num cesto, que era imerso na água por um período apropriado de tempo, até a completa hidratação;
- c) hidratação pelo ar: a cal era deixada exposta ao ambiente para capturar a umidade do ar e, assim, ser hidratada.

Se pouca ou muita água fosse usada neste processo, as propriedades da cal hidratada não seriam adequadas para os propósitos construtivos, pois, com muita água, ela não endureceria e, com pouca água, ela não seria suficientemente plástica para ser usada (ERDOGAN¹⁴, 2002, apud KIRCA, 2005, p. 88).

Para criar a argamassa com a cal hidratada, os romanos antigos adicionavam areia e água numa proporção adequada. Três eram os métodos de dosagem (MCKEE, 1971, p. 21 apud KRUMNACKER, 2001, p. 12):

- a) misturar a cal hidratada seca, areia e água;

¹² O processo de hidratação da cal virgem, também chamada de extinção, consiste em fornecer a quantidade de água suficiente para que a cal virgem (CaO) combine-se quimicamente com a água (H₂O), numa reação fortemente exotérmica, formando hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), ou cal extinta.

¹³ MCKEE, H.J. **Early American masonry materials in walls, floors and ceilings**: notes on prototypes, sources, preparation and manner of use. New York: Syracuse, 1971.

¹⁴ ERDOGAN, T.Y. **Materials of construction**. Ankara : METU Press, 2002.

- b) misturar a pasta de cal com areia, adicionando mais água conforme a necessidade;
- c) misturar a cal virgem pulverizada com água e areia, usando a argamassa ainda quente.

A argamassa podia ser estocada por longo período de tempo (por até três anos), desde que convenientemente armazenada, isto é, selada do contato com o ar¹⁵. Para ser usada, essa argamassa armazenada era batida com uma pá de madeira ou metal até atingir a consistência adequada para ser usada na construção. Este procedimento fazia a argamassa endurecer rapidamente, tornar-se menos propensa a fissurar e adquirir maior resistência quando endurecida (NICHOLSON¹⁶, 1850, p. 130 apud KRUMNACHER, 2001, p.14).

As construções remanescentes de diferentes povos da Europa, Ásia e África, que usaram a argamassa de cal nessas edificações, atestam suas qualidades como material construtivo, demonstrando as habilidades e os conhecimentos possuídos pelos artesãos responsáveis pelas obras. Este era um tipo de conhecimento empírico e sistemático, adquirido pelo acúmulo no tempo de variadas tentativas experimentais. Segundo Lazell¹⁷ (1915, p. 9 apud KRUMNACHER, 2001, p. 1, tradução nossa) :

[...] a tecnologia da argamassa é uma das mais remotas instâncias do poder do raciocínio indutivo do homem, porque construir é argamassar; primeiramente, como os pássaros, com barro; mas, muito cedo os homens descobriram um método mais durável e confortável, sendo os primeiros esforços da civilização voltados a ele.

Apesar de este tipo de conhecimento empírico e sistemático ser comumente classificado como tradicional, ou seja, pertencente a povos antigos ou tradicionais, em estágio de desenvolvimento técnico anterior ao estágio de desenvolvimento moderno, este calcado na ciência moderna, suas credenciais científicas são

¹⁵ A cal extinta endurece em contato com o ar por recombinação do gás carbônico (CO₂) com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), formando carbonato de cálcio, cujos cristais ligam-se de forma permanente aos grãos de areia da argamassa. Esse endurecimento processa-se com lentidão, ocorrendo de fora para dentro, o que requer certa porosidade da argamassa que permita, por um lado, a evaporação da água em excesso e, por outro, a penetração do gás carbônico do ar para promover a reação de carbonatação.

¹⁶ NICHOLSON, P. **Encyclopedia of architecture**: a dictionary of the science and practice of architecture, building, carpentry, etc., from the earliest ages to the present time, v.1, v.2. New York: Johnson, Fry & Co., 1850.

¹⁷ LAZELL, E. W. **Hydrated lime**: history, manufacture and uses in plaster- mortar- concrete. [S.I.]:1915.

atestadas textualmente por Lazell (1915, p. 9 apud KRUMNACHER, 2001, p. 1). Segundo ele (ibid.), «alguns dos trabalhos mais antigos com argamassa que chegaram até nós excedem, em sua composição científica, as composições das argamassas usadas no tempo presente, contando-nos sobre eras de tentativas experimentais». Ele exemplifica que a argamassa usada nas pirâmides do Egito, há quatro mil anos, compete em durabilidade com as pedras usadas na construção. Por outro lado, as construções romanas, que fizeram uso da argamassa de cimento e do concreto, como o Panteão de Roma, estão ainda em uso depois de mais de dois mil anos.

Excessos à parte, o que Lazell parece afirmar apropriadamente é que o conhecimento adquirido pelos povos antigos sobre a preparação e o uso da argamassa, em relação ao qual os romanos dominaram especificamente a tecnologia da argamassa de cimento¹⁸, longe de ser considerado um conhecimento pré-científico, é, na verdade, um tipo de conhecimento científico, evidentemente diferente do conhecimento científico moderno, mas, ainda sim, científico, no sentido de ser o resultado consolidado do acúmulo de experiências com a preparação e uso de argamassas por diferentes povos, conhecimento que foi transmitido e desenvolvido sistematicamente ao longo de gerações. Esta visão sobre o conhecimento tradicional enquanto um tipo possível de conhecimento científico coaduna-se com a posição de Hugh Lacey sobre a ciência enquanto qualquer tipo possível de conhecimento empírico e sistemático (LACEY, 2010, pp. 277-278), posição mais compatível com seu modelo das interações entre as atividades científicas e os valores, porque possibilita que vários tipos de conhecimentos tradicionais possam ser caracterizados como instâncias do pluralismo multiestratégico postulado para a ciência.

O modelo teórico de referência abre-se para a possibilidade de algumas formas de conhecimento tradicional constituírem-se em base suficientemente sólida para o desenvolvimento tecnológico e científico da humanidade, ilustrando essa possibilidade com a evolução do conhecimento local e tradicional relacionado à seleção de sementes na agricultura (LACEY, 2008, passim., pp. 207/211). Segundo

¹⁸ Em contraste com a cal, que endurece pela secagem e pela ação do dióxido de carbono (carbonatação), o cimento endurece ao reagir quimicamente com a água (hidratação), devido à presença de pozolanas em sua composição (Cf. notas 6 e 8). Por isso, as propriedades do cimento de se estabelecer, endurecer e não se dissolver sob a água (hidraulicidade), desenvolvendo uma resistência bem maior quando curado na água do que quando curado no ar.

a argumentação, o conhecimento local e tradicional, que informa determinada cultura, pode e deve ser considerado como científico, sendo extensivamente usado pela ciência moderna (como nas pesquisas biotecnológicas) e passível de ser articulado, sistematizado e avaliado empiricamente, segundo uma pluralidade de estratégias, que podem ou não estarem associadas às estratégias descontextualizadoras da ciência moderna (LACEY, 2010, *passim.*, pp. 186/200-201). Assim, o modelo laceyano abre-se para novas formas de investigação empírica e sistemática, realizadas segundo estratégias alternativas ao conjunto de estratégias hoje predominantes na ciência moderna (de tipo materialista, reducionista e descontextualizador), como sendo científicas (LACEY, 2010, pp. 246-248).

O presente capítulo almeja estender em algum grau o modelo laceyano, cujos argumentos, pertencentes ao campo da filosofia da ciência, mas referentes às práticas alternativas da agroecologia, constituem-se em crítica concreta às práticas dominantes nas pesquisas científicas em agricultura (*ibid.*, pp. 199-200), para o campo da pesquisa tecnocientífica sobre o cimento. Com este propósito geral, mostraremos neste capítulo: como os conhecimentos tradicionais sobre preparação e uso de cales e cimentos, de caráter público, foram progressivamente incorporados ao conhecimento técnico-industrial de sua fabricação, de caráter privado; como as perspectivas de valor do progresso tecnológico e do capital e mercado estavam por detrás das investigações teóricas sobre o cimento, direcionando as pesquisas científicas para atender aos interesses comerciais e políticos de produção e uso do cimento; e como a influência dessas perspectivas de valor dominantes acabaram por consolidar as estratégias predominantes de restrição e seleção no campo da química do cimento, de tipo materialista e descontextualizador, em pesquisas tecnocientíficas comercialmente orientadas.

2.3 O cimento usado na construção do Farol de Eddystone

As pozolanas caíram em desuso com o fim do Império Romano. Apenas localmente elas continuaram a ser usadas após o século V, notadamente na região próxima ao Rio Reno, onde depósitos de pozolanas denominadas *Rhenish trass* foram descobertas pelos antigos romanos (COWAN ; SMITH, 1988, p. 114).

Voltaram à cena as cales, hidráulicas ou não¹⁹. Na Idade Média, certas rochas calcárias impuras foram usadas para produzir cal hidráulica (ADAMS; KNELLER²⁰, 1988, pp. 1019-26 apud MOROPOULOU; BAKOLAS; ANAGNOSTOPOULOU, 2005, p. 296). Os tratados dos períodos renascentista, iluminista e neoclássico resgataram as lições aprendidas por Vitruvius em relação à escolha e preparação de materiais construtivos, com pequenas divergências quanto às proporções de composição das misturas e às técnicas de aplicação. Nesses tratados podem-se observar referências ao uso da cal branca, sem propriedades hidráulicas, e da cal escura, com tais propriedades, esta última usada na fabricação de argamassas em substituição às pozolanas (ibid., p. 296).

Davey (1961, p. 103) registra um tipo de cimento pozolânico, conhecido como argamassa de “trass”, usado na Holanda e na Bélgica na construção de defesas marítimas e de estruturas aquáticas. Na Holanda, as *Dutch Trass* eram misturadas com um tipo de cal hidráulica encontrada próxima ao Rio Scheldt. Uma camada desta cal era espalhada no chão e misturada com água, sendo, então, coberta com uma camada de “trass”, numa mesma proporção. Depois de dois ou três dias, os materiais eram completamente misturados e bem batidos, sendo deixados para repousar por mais dois dias antes de seu uso (ibid.).

Depois de ter visitado as defesas marítimas e obras aquáticas da Bélgica e Holanda, em 1755, John Smeaton (1724-1792), encarregado da reconstrução do Farol de Eddystone, próximo ao porto de Plymouth, um dos portos ingleses mais movimentados da época, voltou convencido de que a argamassa de “trass”, com partes iguais de cal hidráulica e pozolana, era o tipo adequado para a reconstrução (ibid.). Isto porque uma de suas maiores dificuldades na construção do Farol foi superar a incapacidade da argamassa de cal ordinária usada na Inglaterra naquela época de endurecer sob a água (RANKIN, 1916, p. 749).

John Smeaton iniciou sua carreira como um fabricante de instrumentos científicos, em Londres. Seu primeiro invento de sucesso foi uma bomba para criar vácuo, em 1749, muito superior a qualquer outra em sua época. Seu

¹⁹As rochas calcárias variam enormemente em sua composição, desde as puras, que produzem as cales aéreas, sem propriedades hidráulicas, até as com uma grande proporção de argilas, capazes de gerarem as cales hidráulicas (Cf. nota 5).

²⁰ADAMS, J. E.;KNELLER, W. A. Thermal analysis of medieval mortars from Gothic cathedrals of France. In: MARINOS, P.; KOUKIS, G. (editors). **Proceedings engineering geology of ancient works, monuments and historical sites**,Rotterdam, Balkema, 1988.

desenvolvimento do compasso de marinheiro valeu-lhe uma apresentação do instrumento na *Royal Society*, em 1750, e a obtenção de sua aprovação pela Marinha, que o adotou como padrão. Seu conhecimento de matemática e filosofia natural, e suas habilidades em mecânica levaram Charles Cavendish a propor sua candidatura para membro da *Royal Society*, em 1752. Ele foi eleito no ano seguinte (TURNER; SKEMPTON, 1981, pp. 10-11).

Seus experimentos relacionados com a força da água e dos ventos e sua invenção de um novo sistema de roldanas e cordas para levantar pesos foram seus primeiros passos em direção à engenharia. Em 1753, obteve sua primeira comissão para construir um moinho de água, em Halton, Lancashire. No ano seguinte, construiu seu segundo moinho de água, em Wakefield, lugar onde também construiu um moinho de vento. Neste período, Smeaton fez também seus primeiros projetos de pontes de pedra e desenhos de sistemas de drenagem. Versado nos famosos livros dos Países Baixos sobre moinhos e na reconhecida obra de Belidor (“Arquitetura hidráulica”), uma das maiores autoridades em construções hidráulicas dessa época (LEA²¹, 1970 apud ZAMPIERI, 1989, pp. 7-8), que deram a ele uma visão completa da engenharia civil como praticada na primeira metade do século XVIII, Smeaton decidiu, em 1755, fazer uma viagem aos Países Baixos e à França para conhecer de perto as obras vistas nos livros. Logo após sua viagem um evento o colocaria no topo de sua profissão: inquirido por Robert Weston, principal acionista de um grupo de detentores da concessão do Farol de Eddystone, recentemente destruído por um incêndio, sobre quem poderia ser encarregado de reconstruí-lo, o presidente da *Royal Society*, Lorde Macclesfield, recomendou prontamente que a tarefa fosse entregue à Smeaton (TURNER; SKEMPTON, 1981, pp. 12-14).

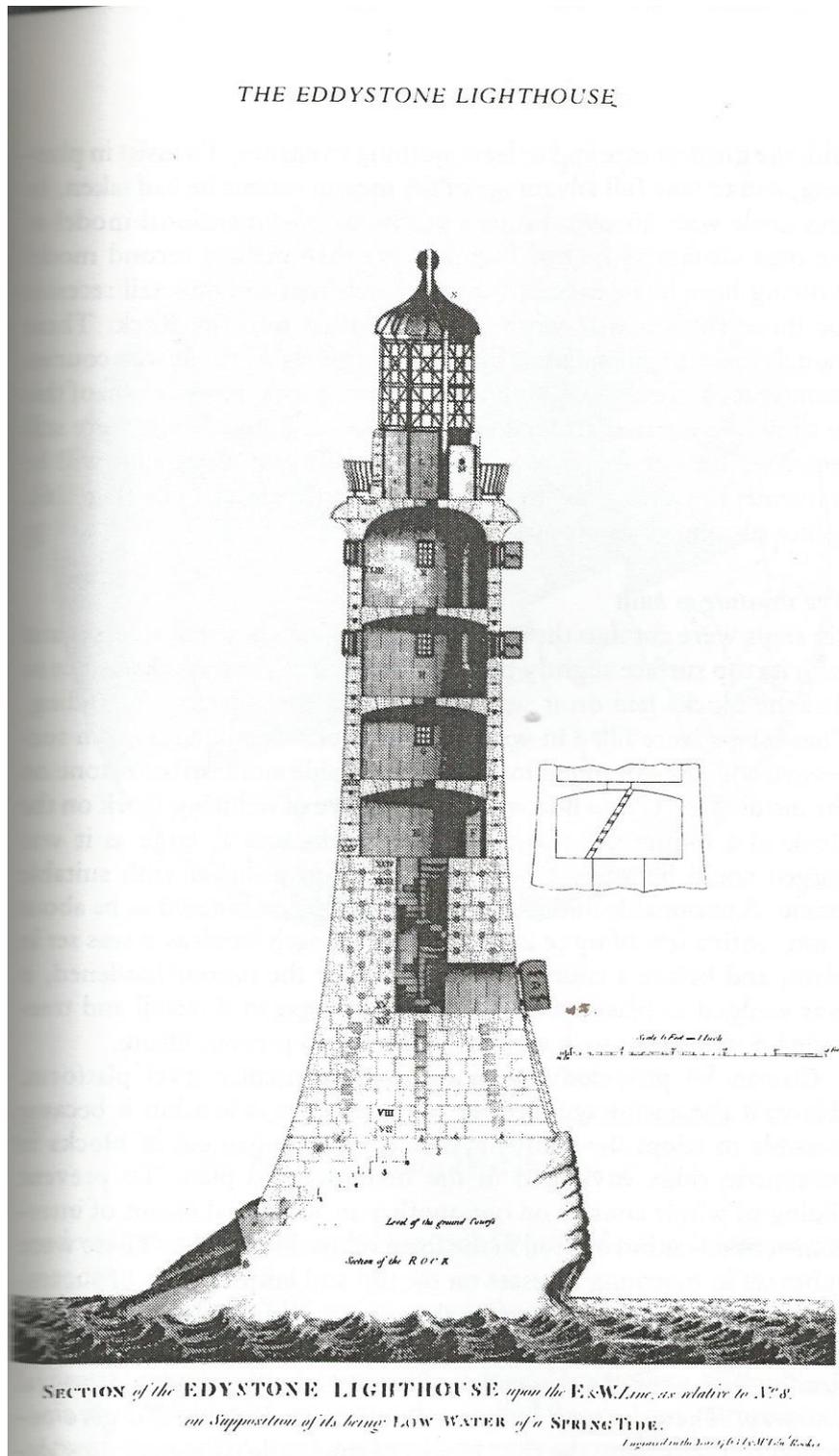
A tarefa era intimidadora devido às condições ambientais locais. O arrecife de Eddystone, aproximadamente a 22 quilômetros de Plymouth, era um grande infortúnio às navegações que adentravam ou saíam do Porto. Ele era encoberto pelas águas durante as marés altas e, nas marés baixas, as águas marítimas continuamente se moviam ameaçadoramente ao seu redor. Sua superfície tinha um forte declive a oeste e, sendo a rocha formada basicamente de gnaisse, era dificultoso cortá-la, devido à sua tendência de se partir ao longo dos grãos. Exposta aos fortes ventos vindos de todas as direções, as condições do mar, algumas vezes,

²¹ LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**. 3ed. London: Edward Arnold, 1970.

tornavam o desembarque impossível por semanas, inclusive nas únicas estações do ano durante as quais o trabalho podia ocorrer (outono e verão) na rocha (MAINSTONE, 1981, pp. 83-84).

O primeiro farol sobre a rocha foi construído por Winstanley, em 1699, durando apenas quatro anos, quando foi varrido por uma tempestade. O segundo, construído por Rudyerd, em 1709, resistiu até 1755, quando foi consumido pelo fogo. Estudando os desenhos e modelos dos faróis anteriores construídos na rocha, Smeaton pode constatar que o farol de Winstanley tinha uma forma não usual e detalhes arquitetônicos e construtivos que pareciam convidar o mar a fazer o pior. Já o farol de Rudyerd tinha uma forma bem simples, sendo sua estabilidade garantida pela interconexão entre as peças de madeira, a fixação das camadas de madeira da base com a rocha por meio de peças metálicas e seu lastro por meio de uma camada de rochas, impedindo que essas madeiras da base fossem levantadas com a subida da maré. A avaliação de Smeaton foi que a construção do farol em madeira, além de sujeita ao alto risco de incêndio, estava mais propensa à deterioração, requerendo manutenções mais frequentes do que a construção do farol em pedra. Por durar mais e requerer menos manutenção, ele propôs a reconstrução do Farol de Eddystone em pedra (Figura 1), o que foi aceito pelos acionistas, apesar do maior custo e do maior tempo para sua construção (ibid., pp. 84-85).

Figura 1. Farol de Eddystone, 1759, xilogravura de Edward Rooker a partir de desenho de Smeaton



Fonte: Skempton (1981).

Com vistas a diminuir o trabalho no arrecife de Eddystone, as 1493 pedras foram cortadas no canteiro de obras no continente para que pesassem, no máximo, duas toneladas. Suas formas obedeciam um plano para que se encaixassem perfeitamente entre si e com a rocha do arrecife, de modo a assegurar a estabilidade da construção. As juntas horizontais e verticais entre as pedras foram ‘grouteadas’ com uma argamassa de cimento especialmente desenvolvida para o propósito da construção, conferindo a solidez necessária ao Farol (MAINSTONE, 1981, pp. 95-96).

Smeaton empreendeu uma série de experimentos com diferentes cales e diversos materiais pozolânicos, com a intenção de obter seu cimento. Ele examinou rochas calcárias por todo país, descobrindo que a rocha de Aberthaw e Watchet eram as mais apropriadas para produzir cal hidráulica. Em seguida, pesquisou qual o tipo de pozolana mais apropriada para ser misturada com essas cales. Foram feitos testes com argamassas contendo pedras pomes, resíduos de tijolos, escória de forjas de ferreiros e várias outras substâncias que pudessem ser usadas para conferir propriedades hidráulicas às argamassas. Os resultados dos testes indicaram que as substâncias mais eficientes para serem misturadas juntamente com a cal de Aberthaw e Watchet eram as *Civita Vecchia* pozolanas e as “trass” alemães. O custo de importação das “trass” era menor do que o das pozolanas, mas, em sua sondagem mercadológica, Smeaton veio a saber que um mercador de Plymouth detinha uma grande quantidade de pozolana da Itália, por ter sido frustrado em fornecê-la para a construção da Ponte de Westminster, em Londres. No final, o uso dessa pozolana acabou sendo mais vantajoso economicamente na construção do Farol de Eddystone (ELLIOTT, 1992, pp. 150-151).

Sobre o cimento feito com *Civita Vecchia Pozolana*, testado com a imersão de bolas feitas com ele na água, Smeaton relatou em seu trabalho *A narrative of the building and a description of the construction of the Edystone Lighthouse*:

Com respeito àquelas bolas mantidas constantemente dentro da água, elas parecem não experimentar nenhuma mudança de forma, mas apenas adquirir gradualmente dureza, de modo que não tenho dúvida de que este cimento se igualará, em solidez e durabilidade, à melhor rocha Portland²² comercializável (SMEATON, 1793, p. 109, tradução nossa).

²²A semelhança estabelecida por Smeaton entre seu cimento e a rocha de Portland, tipo de rocha muito usada na época na construção por suas qualidades superiores, foi a origem do nome ‘cimento

O grande feito de Smeaton foi mostrar como um farol deveria ser construído numa rocha no meio das forças das ondas, mantendo-se ereto e funcional contra furiosas rajadas de vento, num ambiente carregado de umidade. Sua durabilidade foi atestada nos procedimentos do Departamento de Ciência Mecânica da Associação Britânica, que, em 1877, informou que o Farol de Eddystone seria desmantelado, não por causa de seu estado de deterioração, mas sim por causa do enfraquecimento da rocha sobre o qual ele se assentava (REID, 1877, pp. XVII-XVIII), o que poderia causar seu colapso. Nas palavras de Henry Reid, que dedicou seu livro *The science and art of the manufacture of Portland Cement* (1877) a Smeaton, seu trabalho foi um monumento ao gênio, invenção e sucesso da engenharia inglesa (ibid., p. XVI). Com ele concorda Skempton (1981, p. 1, tradução nossa), ao afirmar:

John Smeaton foi o primeiro grande engenheiro civil britânico e o primeiro a obter a distinção de cientista em engenharia. Deve-se ainda a ele, mais do que a qualquer outra pessoa, o crédito de lançar as fundações da profissão da engenharia civil neste país; fundações sobre as quais seus sucessores, notavelmente Thomas Telford, construíram a superestrutura.

O reconhecimento ao feito de Smeaton para a engenharia inglesa aconteceu cem anos após a construção do Farol, na forma de sua figura e de sua obra aparecerem na moeda “Britannia”, de 1860 a 1970. No entanto, apesar de ter descoberto um material com excelentes propriedades construtivas, ele não foi nunca usado largamente, em razão da circunstância histórica da época de as pozolanas serem encontradas apenas em poucas regiões vulcânicas (RANKIN, 1916, p. 749).

2.4 As investigações de Smeaton

Smeaton (1793, p. 102, tradução nossa) inicia o quarto capítulo de seu livro informando-nos de que :

[...] estava familiarizado com o fato de que duas medidas de cal hidratada, em pó, misturada com uma medida de Duch Trass, sendo ambos os materiais bem batidos, com o uso da menor medida de água possível, até a consistência de uma pasta, era a composição mais comum, geralmente usada na construção dos melhores trabalhos na água com pedras ou tijolos.

Portland', dado por Joseph Aspdin ao seu produto patenteado em 1824, que é usado até os dias de hoje para designar os tipos de cimentos mais usados na construção.

Denotando espírito científico, Smeaton relata que, apesar de os construtores da época afirmarem que, quanto mais ‘dura’ a rocha calcária (*hardness of the stone*) da qual a cal provinha, mais ‘dura’ seria a argamassa (*strength of the lime*) feita com ela, ele questionou se esse princípio não valeria apenas para as composições ordinárias de cal comum (sem propriedades hidráulicas) e areia usadas na maior parte das construções em sua época, ou se ele poderia ser estendido também para as argamassas de “trass”, com propriedades hidráulicas (SMEATON, 1793, p. 103). Seu questionamento baseava-se na sua experiência de que, no caso das argamassas de “trass”, secar e endurecer eram propriedades distintas, não mutuamente dependentes. Diz Smeaton que (ibid.) :

[...] embora a argamassa de “trass”, feita com água marinha, possa ser sensível à umidade quando usada para o mesmo propósito que a argamassa comum, feita somente com areia, ainda assim esta circunstância não afetará sua dureza (*hardness*), ou sua firmeza de adesão, na qual a secagem completa não é esperada.

Com essa observação, Smeaton parece estar consciente de que as reações químicas para o endurecimento da cal e do cimento são de naturezas bem distintas²³.

Seu legado para o desenvolvimento tecnocientífico do cimento foi descobrir, por meio de experimentos simples, que as rochas calcárias mais puras e mais duras não eram as melhores para se produzir cal hidráulica. Ele estabeleceu, por volta de 1756, que a causa das propriedades hidráulicas de cales e cimentos era uma combinação de argila com calcário. Também assegurou por meio de procedimentos de análise química muito simples que sempre havia uma proporção de argila em todas as rochas calcárias naturais que, calcinadas, desenvolviam propriedades hidráulicas, sem as quais as paredes expostas à água desagregavam e as expostas ao ar e ambiente desenvolviam uma resistência comparativamente inferior. Em

²³As cales aéreas são de dois tipos: as com apenas um estágio de endurecimento, por secagem, que promove o contato íntimo entre as partículas de cal, formando, com os grãos de areia, uma matriz sólida, que perde sua dureza e consistência ao entrar em contato com a água; e as com dois estágios de endurecimento, a secagem e a carbonatação, sendo este último processo a combinação do gás carbônico do ar com o hidrato de cálcio, formando o carbonato de cálcio, que aumenta consideravelmente a resistência da argamassa e faz com que ela não se altere com a presença de água (CHATELIER, 1905, pp. 32-33). Essas cales aéreas com dois estágios de endurecimento (cales gordas) eram confundidas desde a Antiguidade com as cales hidráulicas (CHATELIER, 1905, p. 39), cujos processos de pega e endurecimento eram decorrentes da combinação de seus componentes com a água. Smeaton, ao distinguir secagem e endurecimento como processos independentes, parece ter intuído, por meio de suas experiências como construtor, que os dois tipos de argamassas (de cal gorda e de cal de “trass”) eram bastante distintos.

razão disso, Smeaton desfez os erros assumidos por mais de dois mil anos, desde Vitruvius, de que a superioridade da argamassa dependia da dureza e da brancura da rocha da qual provinha (PASLEY²⁴, 1838 apud REID, 1877, p.3).

Os experimentos de Smeaton (1793, p. 104) consistiram em:

- a) tomar quantas partes de cada material quanto desejado para ser testado;
- b) preparar a quantidade tomada de cal para que adquirisse, com a adição necessária de água e com seu amassamento, certa consistência;
- c) adicionar gradualmente a quantidade intencionada de pozolanas, “trass” ou outro material, amassando, com a água necessária, o cimento a cada adição, para que ficasse com determinada consistência;
- d) deixar as bolas de aproximadamente cinco centímetros de diâmetro adquirir uma tal dureza que fosse incapaz de suportar a pressão dos dedos;
- e) imergir essas bolas na água, de modo que ficassem totalmente encobertas pela água;
- f) julgar o que acontecia com as bolas sob a água com relação às suas propriedades relacionadas aos seus propósitos construtivos.

Por meio desse procedimento, Smeaton fez diversas descobertas. Ele constatou que as bolas feitas apenas de cal e areia dissolviam-se na água. Sendo assim, a despeito da argamassa de cal e areia ser excelente para as construções mais comuns, pela dureza adquirida por ela ao secar (*hard it might become by being gradually dried*), essa argamassa era inapropriada para ser usada na construção do Farol de Eddystone. Ele verificou que as bolas de argamassas de “trass”, segundo a composição comum de duas partes de cal para uma parte de pozolana (2:1), nem sempre passavam no teste da imersão, mas que as bolas com iguais partes de cal e “trass” (1:1), quase sempre permaneciam intactas (SMEATON, 1793, pp. 104-105).

Smeaton, testando bolas de argamassas de “trass”, feitas com a cal de rochas de gesso, considerada como a rocha mais fraca (*weakest*), e com cal do mármore de Plymouth, considerada como a rocha mais forte (*strongest*), nas proporções de 2:1 e 1:1, constatou não haver diferença aparente na resistência

²⁴ PASLEY, C. W. **Limes, calcareous cements, mortars, stuccos and concrete**. London : John Weale, Architectural Library, 1838.

dessas bolas²⁵, concluindo que a resistência da cal deve depender de outra qualidade que não seja a 'dureza' da rocha, e assim, revelando ser falacioso o princípio assumido por milênios de que a cal mais 'dura' era a obtida da rocha mais 'dura' (ibid.).

Por meio do mesmo experimento, Smeaton descobriu que não havia diferença aparente entre as bolas feitas com água doce e água marinha, de modo que ele não precisaria se preocupar em carregar água doce para fazer a argamassa usada na construção do Farol. Com isso, na maior parte dos experimentos, Smeaton usou água marinha para a confecção das bolas a ser testadas. Ele também constatou que as bolas feitas com a pedra de Aberthaw, em Glamorganshire, na proporção de duas medidas de cal para uma medida de "trass" excedia consideravelmente em 'dureza', após 24 horas, as bolas feitas com uma medida de cal comum e uma medida de "trass"; já as bolas feitas com a cal de Aberthaw e pozolanas na proporção de 1:1 excedia em 'dureza' a mistura desses componentes na proporção de 2:1. Smeaton chegou à cal de Aberthaw por ser de conhecimento comum que essa cal tinha propriedades hidráulicas semelhantes às argamassas de "trass" (ibid.).

O conhecimento tradicional e ordinário foi testado por ele também quanto ao procedimento de preparo das argamassas, sendo comum acreditar que quanto mais a argamassa fosse batida, mais forte ela seria. Ele preparou um conjunto de bolas com a cal de Aberthaw nas proporções de 1:1 e 2:1, sendo que uma parte delas passou por cura²⁶, sendo a cada dia, durante três dias, despedaçada e batida novamente, e a outra parte batida apenas uma vez. Smeaton percebeu que nas bolas com composição em partes iguais, não havia diferença perceptível quanto ao modo de preparo da argamassa, havendo, porém, uma diferença pouco notável nas bolas nas quais a cal predominava. No entanto, os experimentos com a cal comum mostraram a maior preferência pelas bolas com argamassa preparada através de repetidas batidas, na proporção de 2:1. Concluiu Smeaton que, apesar da prática dos trabalhadores na construção estar correta quanto à composição comum das argamassas, ela não se aplica às argamassas produzidas com a cal de Aberthaw e

²⁵Smeaton informa, numa nota de rodapé, que o resultado de seu experimento com as argamassas de "trass" é sustentado pelos experimentos do Dr. Higgins com diferentes tipos de cales (SMEATON, 1793, p. 105).

²⁶A cura é o processo de fornecer ao cimento a quantidade de água necessária para possibilitar sua completa hidratação.

as “trass” na proporção de 1:1, dosagem que pareceu para ele mais adaptada para o propósito de construção do Farol (SMEATON, 1793, p. 106).

Um construtor prático se daria por satisfeito com essas conclusões, parando de fazer outras experimentações. Mas a diferença nas propriedades das cales produzidas com diferentes tipos de rochas calcárias excitou a curiosidade de Smeaton. Ele ficou desejoso para tentar descobrir algumas das ‘qualidades racionais’ que provavelmente ocasionariam a diferença de certas argamassas terem propriedades hidráulicas, enquanto outras, não. Para isso, ele seguiu o seguinte procedimento de análise química de sua época (ibid., p. 107):

- a) uma certa quantidade de rocha calcária era convertida em pó;
- b) sobre ela era despejada água forte²⁷ numa quantidade suficiente para que a efervescência cobrisse a vasilha onde estava o pó de cal;
- c) após a efervescência cessar, mais água forte era adicionada até que nenhuma ebulição ocorresse;
- d) por fim, a solução era deixada a repousar até atingir uma coloração transparente;
- e) se dessa solução nenhum ou pouco sedimento decantava, o calcário testado podia ser considerado como puro, como era o caso da rocha de gesso;
- f) se da solução uma quantidade de matéria era depositada na forma de lama, isto indicava uma quantidade de material não calcário na composição da rocha;
- g) quando essa lama ganhava certa consistência, ela era separada do restante;
- h) a esta lama endurecida era adicionada água, sendo a mistura agitada e, depois, deixada para endurecer novamente – esse procedimento era repetido várias vezes;
- i) por fim, a lama aquosa, sem ter tempo para endurecer novamente, era transferida para outro vasilhame;

²⁷Água forte, ácido nítrico ou ácido azótico é um ácido de elevado grau de ionização e volátil à temperatura ambiente, com fórmula molecular HNO₃.

- j) se algum material arenoso fosse deixado para trás no processo de transferência de um vasilhame para outro, como frequentemente acontecia, isto indicava a quantidade da presença desse material que conferia hidraulicidade às argamassas na composição da rocha calcária;
- k) essa lama era deixada a secar, sendo que, quando ela ficasse com a consistência da argila, com ela era feita uma bola, para exame posterior.

Com esse teste químico, Smeaton foi capaz de determinar que o mármore de Plymouth e a rocha de gesso eram completamente dissolvidos no ácido, sendo formados por calcário puro; já a rocha de Aberthaw, por resultar num pequeno depósito de material arenoso, na quantidade de um oitavo do total, era formada, além do calcário, por um tipo de argila escuro-azulada muito compacta. Esse material argiloso, ao ser queimado, produzia um tijolo avermelhado compacto, pesando três quartos do material original usado, sendo que a cor avermelhada resultava do ferro contido em sua composição (SMEATON, 1793, pp. 107-108).

Com base nesses experimentos, Smeaton concluiu que a rocha calcária formada por uma proporção de argila era a mais apropriada para ser usada na fabricação de argamassa para obras hidráulicas, sendo a presença da argila, numa certa proporção, na composição da rocha calcária o traço distintivo para as propriedades hidráulicas da cal feita a partir dela (ibid., 1793, p. 108).

Sabendo que as “trass” eram adequadas para argamassas usadas em construções hidráulicas, mas que tinham certas desvantagens, como não conferir a mesma dureza a essas argamassas em relação àquelas compostas apenas de cal e areia, quando obtinham sua resistência por meio de sua exposição gradual ao ar, ou perder parcialmente sua resistência quando expostas novamente ao ar após terem adquirido sua resistência por meio de sua imersão na água, Smeaton resolveu experimentar outros tipos de materiais similares às “trass” na tentativa de encontrar um melhor substituto para seus propósitos construtivos (SMEATON, 1793, pp. 107-108).

Ele notou a superioridade das pozolanas, mencionadas pelo construtor Belidor e pelo arquiteto Vitruvius, em suas respectivas obras. Segundo Smeaton, as pozolanas excediam em dureza qualquer composição comumente usada nas construções secas e, em relação às construções permanentemente úmidas ou

intercaladamente úmidas e secas, sua dureza era bem superior à de qualquer composição que ele havia testado. Isto porque, quando as bolas de argamassa com pozolanas eram mantidas imersas na água, elas aparentavam adquirir dureza progressivamente, e quando eram retiradas da água, apesar desse progresso ser suspenso, a dureza adquirida era retida (ibid., p. 109).

Smeaton enfatiza em seu relato ter repetido todos os experimentos, sendo que os mais importantes foram feitos diversas vezes. Com base nos resultados desses experimentos, ele concluiu que a combinação de cal de rochas calcárias do tipo da de Aberthaw²⁸ com as pozolanas, na proporção de 1:1, produziria um cimento capaz de unir as pedras de granito a serem usadas na construção do farol numa única massa sólida de pedra (ibid., p.110-112).

2.5 Traços metodológicos das investigações de Smeaton

As pesquisas relacionadas com as cales e os cimentos pozolânicos feitas por Smeaton revelam alguns traços característicos que vão ao encontro das teses e conceitos do modelo teórico de referência. O objetivo desta seção é especular em qual extensão o modelo das interações entre as atividades científicas e os valores pode ser aplicado para lançar luz sobre certos componentes que poderiam estar presentes nas investigações realizadas por Smeaton, mas que podem ter passado despercebidos nos relatos subsequentes feitos.

Primeiramente, vimos que essas investigações foram empíricas e sistemáticas. Partindo de alguns princípios ou hipóteses estabelecidas entre os construtores da época quanto à melhor proporção entre cal e pozolanas e à melhor rocha a ser usada na fabricação da cal, Smeaton concebe diversos experimentos para testar tais princípios, que podem ser entendidos como pertencendo ao conhecimento tradicional sobre a cal e o cimento, porque dizem respeito tanto ao conhecimento relacionado à fabricação e ao uso de cales e cimentos advindo dos textos romanos antigos (PASLEY, 1838 apud REID, 1877, p.3), quanto à experiência acumulada e transmitida de construtores em lidar na prática com as argamassas em suas obras (SMEATON, 1793, p. 103). Revela-se neste procedimento experimental

²⁸As rochas calcárias de Aberthaw eram do tipo comumente conhecido como rochas de estratos azuis ("blue lyas"), encontradas em diversos países, sendo que, para a construção do Farol de Eddystone, Smeaton fez uso do enorme suprimento desse tipo de rocha próximo ao porto de Watchet, em Somersetshire (SMEATON, 1793, pp. 111-114).

conduzido por Smeaton um aspecto eminentemente científico dessas investigações: a oposição ao dogmatismo, à aceitação de princípios sem uma base empírica sólida e consistente.

Por meio de seus experimentos com bolas de argamassas, cuidadosamente preparadas e imersas em água para serem curadas e testadas, Smeaton pode verificar, com base nos resultados, o caráter falacioso de dois princípios comumente aceitos pelos construtores em sua época: a melhor composição das argamassas para construções hidráulicas não era a comumente usada de duas medidas de cal para uma medida de “trass”, mas sim a de uma medida de cal para uma medida de “trass”; e o uso da rocha mais ‘dura’ para a fabricação de cal não redundou numa argamassa mais forte com relação à argamassa que usou a cal produzida de uma rocha fraca (ibid., pp. 104-105).

Com base nesta mesma metodologia experimental, Smeaton pôs em questão outras hipóteses sobre a preparação e uso das argamassas de cimento, vigentes em sua época, o que demonstra mais uma vez o caráter sistemático de suas pesquisas: a de que o uso de água doce era preferível ao uso de água marinha; a de que a argamassa de “trass” com a cal da rocha de Plymouth era superior a qualquer outra; a de que quanto mais tempo a argamassa de “trass” fosse guardada e quanto mais ela fosse batida, mais forte ficaria; a hipótese de que a cal feita de conchas marinhas queimadas ou com o plastificante de Paris²⁹ era excelente para se fazer argamassa hidráulica (SMEATON, 1793, pp. 105-106). Além disso, por meio do mesmo procedimento experimental, ele pode constatar que a pozolana vinda da Itália era preferível às “trass”, que as pozolanas e as “trass” eram preferíveis a outros tipos de materiais testados na composição do cimento pozolânico, e pode chegar na melhor consistência do cimento a ser usado na construção do Farol de Eddystone (ibid., pp. 109-112).

Por seu caráter experimental e sistemático, essas pesquisas devem ser caracterizadas como científicas, segundo o que foi exposto no primeiro capítulo (LACEY, 2010, p. 17). Nelas já se vislumbram traços da metodologia científica

²⁹Plastificante de Paris: pó branco que, misturado com água, torna-se muito duro quando seco, usado para fazer cópias de estátuas, constituído de $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (sulfato de cálcio hemidratado ou hemidrato), hoje denominado *plaster of Paris* ou *plâtre* em francês, que, em mistura com a água, forma o sulfato de cálcio dihidratado ou gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

moderna, como a centralidade do experimento no teste de hipóteses, o controle e o isolamento de parâmetros sob avaliação e o valor cognitivo da adequação empírica.

Lacey não endossa a distinção comumente aceita entre procedimentos empíricos e procedimentos científicos, ao não restringir os procedimentos científicos à condição de serem explicados por uma teoria com estrutura matemático-dedutiva ou que envolva representações de leis matematicamente formuláveis (*ibid.*). Segundo essa visão restritiva sobre a natureza da ciência, os procedimentos empíricos e sistemáticos adotados por Smeaton, seja os para testar as melhores combinações de calces e pozolanas (pesquisa aplicada), seja os para tentar descobrir as causas das diferentes propriedades observadas dessas combinações (pesquisa teórica), não poderiam ser considerados como científicos, pois careciam de uma teoria apropriada para explicar os fenômenos sob análise. Por isso, eles deveriam ser tidos como pré-científicos ou simplesmente como procedimentos empíricos³⁰. No entanto, o papel decisivo dos experimentos para a validação ou não de hipóteses (centralidade dos experimentos), o isolamento de variáveis sobre as quais recai o interesse do pesquisador dos humores humanos nos momentos da experimentação e da avaliação (condições de intersubjetividade e replicabilidade impostas aos experimentos) e o julgamento dos resultados com base no valor cognitivo da adequação empírica são suficientes para caracterizar as investigações de Smeaton como científicas. A ausência de uma teoria explicativa e preditiva para os fenômenos estudados é uma lacuna circunstancial do momento específico do desenvolvimento do entendimento científico sobre o cimento, que será devidamente preenchida subsequentemente por meio de outras investigações e outros pesquisadores, que basearam seu trabalho nos procedimentos e resultados das pesquisas de Smeaton.

³⁰ Terry Shinn e Pascal Ragouet fazem uma distinção entre regime disciplinar e regime utilitário na história da ciência moderna, atribuindo ao regime disciplinar o desenvolvimento de disciplinas científicas, como a química, e ao regime utilitário o desenvolvimento da aplicação do conhecimento produzido no regime disciplinar (Shinn e Ragouet, 2008, pp. 140-143). Esta dissertação não faz tal diferenciação na análise dos episódios históricos, por diversas razões: em primeiro lugar, porque em alguns episódios não se constituiu ainda uma disciplina científica a partir da qual o conhecimento gerado nela é aplicado a um problema técnico particular (é o caso do episódio de desenvolvimento do cimento pozolânico por Smeaton, ocorrido na época em que a química, enquanto disciplina científica moderna, estava em estágio de constituição); e em segundo lugar, porque não é possível distinguir claramente entre um regime e outro, tendo em vista que, em alguns episódios, o que parece pertencer ao regime utilitário é apropriado pelo regime disciplinar e o que parece ser uma pesquisa típica do regime disciplinar guarda traços do regime utilitário (como veremos à frente, ao analisar as pesquisas de Vicat, Le Chatelier etc.). Por isso, esta dissertação, sem entrar no mérito desta diferenciação, assume, com vistas aos seus propósitos já enunciados, o conceito lato de ciência (qualquer tipo de conhecimento empírico sistemático) e o conceito de tecnociência (a imbricação entre ciência e tecnologia, entre pesquisa teórica e pesquisa prática, de modo a não ser possível diferenciar seus limites), já devidamente justificados no primeiro capítulo.

Como disse Pasley no prefácio de sua obra “Observações sobre cales e cimentos para fazer um cimento hidráulico artificial”, datada de 1838:

O novo princípio estabelecido por Smeaton, cuja verdade foi recentemente admitida pelos mais esclarecidos químicos e engenheiros da Europa, foi a base das tentativas feitas pelo Dr. John, em Berlim e por M. Vicat (o engenheiro), na França, para fabricar uma cal hidráulica artificial, em 1818, e da minha tentativa para fabricar um cimento hidráulico artificial, em Chatham, em 1826, em relação à qual eu fui motivado pelas observações de Smeaton, sem conhecer os trabalhos prévios desses senhores do continente nem do Sr. Frost, o reconhecido imitador de M. Vicat neste país (REID, 1877, pp.3-4, tradução nossa).

Pela descrição dada por Smeaton sobre seus experimentos com as bolas de argamassa, podemos afirmar que, além de serem rigorosamente controlados, especificando as medidas dos materiais usados e os procedimentos padrão para o preparo dos corpos de prova, para seu teste e para sua avaliação (SMEATON, 1793, p.104), parâmetros que asseguravam a condição de intersubjetividade dos experimentos, eles foram repetida (ibid., p. 110) e sistematicamente realizados para se descobrir os materiais mais apropriados, bem como sua proporção, para serem usados na confecção de uma argamassa adequada na construção do Farol de Eddystone (ibid., p. 112). Seu objetivo com esses experimentos foi a de encontrar a melhor formulação da argamassa para ser usada numa situação construtiva bem específica, dentro de um contexto político, econômico, social e cultural bem estabelecido. Como pesquisas científicas aplicadas essas investigações foram atravessadas por valores não cognitivos (valores culturais, sociais, econômicos e políticos), mas conservaram sua natureza propriamente científica por preservarem a imparcialidade em seus procedimentos de avaliação das hipóteses.

As variáveis independentes nos experimentos com as bolas eram os tipos de materiais que entrariam na composição do cimento, bem como sua proporção uns em relação aos outros. Essas variáveis eram minuciosamente controladas por meio da medida exata com as quais eram tomadas para a fabricação das bolas de argamassa (ibid., p. 104). É importante notar que, apesar de a água ser também um dos componentes das argamassas, ela não era quantitativamente controlada, como o eram as cales, as “trass”, as pozolanas e os outros materiais usados em substituição às “trass” e pozolanas na época (materiais cimentícios suplementares). Este fato demonstra que Smeaton aceitou passivamente, sem questionamentos, a

maior parte do conhecimento tradicional relativo à fabricação da cal hidratada e à consistência de argamassas de cal e cimento usadas na construção, no qual o controle da quantidade de água que entrava na composição era feito de modo qualitativo, com base na observação dos sintomas das reações e das misturas, como a efervescência da cal hidratada e a consistência da argamassa. Por extensão, ele aceitou também todo o conhecimento tradicional relativo à caracterização e extração das rochas calcárias apropriadas para a fabricação da cal, e os procedimentos desta fabricação, como a moagem da rocha e sua calcinação. Isto porque o objeto principal de suas pesquisas empíricas e sistemáticas com as bolas de argamassa foi verificar se os princípios construtivos válidos para as cales comuns (aéreas) eram também aplicáveis para as cales e os cimentos hidráulicos, tendo em conta que as reações químicas, num caso e no outro, pareciam a ele como distintas (SMEATON, 1793, p. 103). Este foi seu objeto de suas investigações, que definiu um domínio de fenômenos a serem investigados.

Esse cuidado com as variáveis de entrada dos experimentos, por meio de procedimentos quantitativos, no caso das cales, pozolanas e materiais cimentícios suplementares, e por meio de procedimentos qualitativos padronizados, no caso da água, é uma medida efetiva de controle dessas variáveis. O controle desses parâmetros procura isolar as variáveis independentes (quantidades de cales, pozolanas e outros materiais cimentícios suplementares) das variáveis mantidas constantes (quantidade de água) nos experimentos, com vistas a estudar o comportamento das argamassas (suas propriedades construtivas, as variáveis de saída ou variáveis dependentes) em função das variadas combinações das variáveis independentes. Com isso, Smeaton revela a atitude fundamental que embasa suas investigações experimentais: o desejo profundo do pesquisador de controlar as variáveis de entrada dos seus experimentos (quantidades de matérias-primas das argamassas) para obter o controle das variáveis de saída (as propriedades construtivas almejadas dessas argamassas). No fundo, o que motiva as investigações, para além dos seus propósitos mais imediatos e práticos, é o valor social do controle humano dos objetos naturais – numa formulação mais ampla, o domínio do homem sobre a natureza. Este propósito fica ainda mais claro com o prosseguimento dos experimentos, por meio da análise química das argamassas, na qual Smeaton busca pela causa da hidráulidade (SMEATON, 1793, p. 107). Sua motivação foi encontrar as quantidades certas de cal e de argila que, combinadas

apropriadamente, resultariam nos cimentos hidráulicos artificiais (ibid., p. 120), dispensando a empresa humana de ter de encontrar, explorar e transportar a rocha calcária impura adequada para a fabricação de cal e cimento hidráulicos. Sendo assim, é possível especular que as pesquisas de Smeaton estavam envoltas pela perspectiva da valorização moderna do controle (LACEY, 2010, pp. 37-38), já predominante nas sociedades ocidentais industrializadas. Devido aos procedimentos grosseiros das análises químicas de sua época dos componentes das argamassas, incapazes de determinar com precisão os componentes químicos presentes nas cales e cimentos hidráulicos, Smeaton não teve sucesso nesta empreitada de produzir cimento artificial (SMEATON, 1793, p. 120).

Essa busca por uma ordem subjacente aos fenômenos com o intuito de controlá-los, uma ordem subjacente caracterizada independentemente dos contextos geográficos, geológicos, sociais e culturais dos fenômenos estudados é mais uma característica típica dos experimentos de análise química feitos por Smeaton explicada pelo modelo laceyano, que os aproxima dos procedimentos científicos modernos, apontando para o tipo de teoria e de hipóteses que parecem ser almejadas pelo pesquisador: teorias que explicam a ordem subjacente aos fenômenos em abstração aos contextos nos quais esses fenômenos possam estar inseridos, caracterizadas predominantemente por relações quantitativas. Essa visão parece ser endossada por Reid (1877, pp. 2-3, tradução nossa) ao fazer a seguinte afirmação:

Passou-se um longo tempo antes de os homens da ciência confirmarem esse enunciado do engenheiro inglês [que a rocha calcária mais pura e mais dura não era a melhor], ou corrigirem as ideias sobre o endurecimento das argamassas hidráulicas, as quais foram então necessariamente confundidas em razão do estado imperfeito da química daquele tempo. Como poderia a ciência manter-se subsequentemente em dia com o progresso prático, se ainda no presente, embora tenhamos por quase meio século as mais excelentes argamassas hidráulicas, ainda não podemos explicar completamente seu processo de endurecimento?

Essa afinidade especulada entre as investigações de Smeaton e os procedimentos científicos modernos, apesar das características metodológicas até aqui apontadas (centralidade do experimento, suas condições de intersubjetividade e replicabilidade, relações mutuamente reforçadoras entre a perspectiva do progresso tecnológico e a estratégia descontextualizadora de restrição e seleção

pressupostas) não é ainda completa. As variáveis dependentes nos experimentos com as bolas de argamassas, tendo em vista os propósitos construtivos do pesquisador, eram o tempo de pega, a firmeza, a consistência, a 'dureza' e a consolidação de forma do corpo de prova com o tempo. Não se encontra no relato dos experimentos nenhuma menção à medida dessas variáveis nem uma definição clara delas, entendidas como pertencendo ao senso comum do círculo de construtores da época. Sua avaliação é sempre relativa, com o uso de expressões como "mais ou menos rápida, firme, consistente, dura", e feita de modo qualitativo, com base na comparação das aparências e no julgamento de sua conveniência para os propósitos construtivos a que seriam destinadas. Deste modo, é possível afirmar que os princípios construtivos em voga na época de Smeaton foram testados empiricamente tendo como base uma forma de adequação empírica de tipo qualitativo entre as hipóteses e os dados empíricos. Esses aspectos dos experimentos de Smeaton destoam dos procedimentos científicos modernos, que buscam o controle quantitativo de todas as variáveis envolvidas nas experimentações (LACEY, 2008, pp. 90-91). No entanto, podemos novamente conjecturar que essa adequação empírica de tipo qualitativo é circunstancial aos aspectos relativos ao estágio de desenvolvimento da ciência dos materiais na época de Smeaton, atrelados ao nível de desenvolvimento técnico e tecnológico da época.

Essas constatações relativas à adequação empírica podem ser estendidas para os procedimentos de análise química feitos por Smeaton na tentativa de descobrir as causas subjacentes aos fenômenos observados com os experimentos com as bolas de argamassa, especialmente a causa material da hidraulicidade. A avaliação de se havia na rocha calcária material não calcário e se este era composto por argila foi feita com base na simples observação ou não de material sedimentado na solução com ácido nítrico e na sua posterior caracterização, por similaridade, com a argila (SMEATON, 1793, p. 107). Novamente aqui se observa o valor cognitivo da adequação empírica de tipo qualitativo determinando a escolha entre hipóteses testadas nos experimentos. Para se determinar a proporção de argila presente na rocha calcária, as massas dos materiais foram medidas, numa tentativa de se determinar a proporção entre o calcário e a argila para se obter cal ou cimento hidráulico (ibid.), numa aproximação de seus procedimentos dos mais rigorosos procedimentos científicos modernos de sua época. Como vimos os métodos

disponíveis de análise química da época não permitiram a Smeaton chegar a medidas precisas dos componentes das rochas calcárias impuras.

Não há no relato de Smeaton sobre seus experimentos com as argamassas a enunciação de qualquer regra de inferência. Podemos especular que tanto raciocínios dedutivos (das hipóteses gerais construtivas sob avaliação para enunciados singulares descritivos das constatações observacionais feitas a partir dos experimentos) quanto indutivos (dos enunciados singulares descritivos das constatações observacionais feitas a partir dos experimentos para hipóteses gerais construtivas) podem ter sido usado na correlação entre observações e hipóteses. Independentemente de Smeaton ter recorrido a um ou outro, o que transparece em seu relato, como vimos, é o valor cognitivo da adequação empírica de tipo qualitativo. Além dele, Smeaton lança mão também do valor cognitivo da consistência, ao comparar os resultados de seus experimentos com as bolas de argamassa com os resultados dos experimentos do Dr. Higgins com diferentes tipos de cales. Vemos, assim, que parece haver um diálogo, ainda que incipiente devido aos escassos recursos midiáticos da época, entre membros da comunidade de pesquisadores voltados aos estudos das argamassas.

A estratégia que guiou os experimentos de Smeaton com as bolas de argamassa era reproduzir em condições laboratoriais controladas os fatores intervenientes locais dos momentos de construção e operação do Farol de Eddystone, com vistas a obter uma argamassa que lidasse bem com esses fatores (SMEATON, 1793, *passim.*, p. 105-106/108-110). Sua pesquisa tinha uma motivação na aplicação que poderia gerar, sendo fortemente influenciada pelos valores associados a essa aplicação, que determinaram os rumos da investigação. De um lado, a escolha dos materiais a serem usados na construção do Farol e sua proporção não foram feitas aleatoriamente, mas foram determinadas historicamente pelo conhecimento tradicional, pelo domínio técnico sobre esses materiais e pelo seu emprego bem sucedido nas construções em geral e nas construções hidráulicas em especial, que foram aperfeiçoados pelos conhecimentos gerados a partir dos experimentos de que Smeaton lançou mão. De outro, essa escolha dos materiais foi influenciada por seus preços comparativos e pela sua disponibilidade nas imediações da construção ou pela viabilidade de seu transporte por rotas e por meios então vigentes. Seus experimentos com materiais cimentícios suplementares

em substituição às “trass” e pozolanas tinham como propósito o ideal político de alcançar a autossuficiência de seu país na fabricação de cimento, sem a necessidade de importação de matérias-primas (SMEATON, 1793, p. 114). Dessa forma, o contexto histórico, com seus valores econômicos, culturais, políticos e sociais, determinou as possíveis escolhas do investigador quanto aos materiais usados nos experimentos, ou seja, quanto às possibilidades investigadas neles (possibilidades de interesses, uma vez que eram possibilidades do mundo em associação com planos de intervenção humana). Além disso, como vimos, a perspectiva de valor do progresso tecnológico embasou, em última instância, esses experimentos, cujos desdobramentos foram as análises químicas em busca das causas subjacentes da hidráulidade (nas quais é possível vislumbrar, como vimos, o recurso ainda tímido às estratégias descontextualizadoras, ou seja, o interesse de Smeaton recaiu, nesta análise química das cales, nas possibilidades abstraídas do mundo). Todos esses valores sociais constituíram as condições de contorno do domínio de possibilidades investigadas nos experimentos, dentro do qual eles foram realizados (LACEY, 2010, p. 77).

O modelo laceyano aponta também para o forte entrelaçamento entre as pesquisas teóricas e práticas nas investigações de Smeaton. Numa visão em retrospectiva do relato feito por Smeaton sobre seus experimentos com argamassas e cales, é possível conjecturar que sua investigação tinha o interesse específico de tentar entender o fenômeno do endurecimento do cimento e suas implicações para as práticas construtivas vigentes em sua época. Havia, assim, motivações teóricas e práticas entrelaçadas, já que a expectativa do pesquisador seria encontrar a causa subjacente da hidráulidade (pesquisa teórica) para informar consistentemente as práticas construtivas vigentes, sobretudo, a prática de fabricar cales e cimentos hidráulicos, que poderia ter sido revolucionada no século XVIII, se Smeaton tivesse tido sucesso em discriminar as proporções necessárias de cal e argila para a fabricação de cimento artificial (pesquisas aplicadas). Em razão desse entrelaçamento entre a pesquisa teórica e a pesquisa prática, as investigações de Smeaton se caracterizam como pesquisas tecnocientíficas. Ademais, entre as motivações práticas dessas investigações, destacamos o interesse de Smeaton na formulação de um cimento mais econômico, apontando para o caráter comercialmente orientado dessas pesquisas tecnocientíficas. Esse caráter será

maiormente realçado com o uso dos resultados dessas investigações para informar o patenteamento do cimento natural.

A distinção entre o nível das possibilidades investigadas e o nível das decisões quanto às escolhas feitas com base nos resultados dos experimentos é outra tese do modelo laceyano que pode ser suposta nas pesquisas científicas de Smeaton (LACEY, 2008, pp. 103-104). O domínio das possibilidades a serem investigadas, situado no nível da escolha dos materiais e de sua combinação, ou seja, no nível das variáveis de entrada, aí inclusas as variáveis independentes, está sujeito, como vimos, às influências externas de todo tipo, na forma de valores sociais de matizes políticos, econômicos, sociais e culturais. Sendo assim, a autonomia de Smeaton em sua investigação científica, se existiu, foi bastante restrita, uma vez que sua pesquisa estava condicionada aos materiais construtivos então em uso em seu país e fora ele, nos países vizinhos, à sua disponibilidade para a construção do Farol e aos seus preços de mercado. Sobretudo, sua autonomia de pesquisa parecia subjugada aos desígnios do reino e dos acionistas, razão pelo qual Smeaton buscou, por meio de suas investigações, produzir sua argamassa hidráulica com os melhores materiais do seu país e ao menor custo possível, reduzindo ao máximo o uso de materiais importados em sua composição (SMEATON, 1793, p. 114).

Já, no nível da avaliação dos resultados de suas pesquisas, isto é, no nível das variáveis de saída dos experimentos, o julgamento de Smeaton mostrou-se isento de valores sociais, sendo baseado de modo exclusivo no valor cognitivo da adequação empírica, que, como vimos, era de tipo qualitativo, e nos dados empíricos de suas investigações. Foi exclusivamente com base na constatação observacional das propriedades das argamassas e das cales testadas, tendo como referência seus propósitos construtivos, que Smeaton decidiu sobre qual argamassa de cimento usar e como melhor prepará-la. As evidências empíricas colhidas por ele de seus experimentos reforçaram algumas hipóteses em vigor (como as que diziam respeito à preparação da cal hidratada e à consistência da argamassa a ser usada na construção), refutaram outras (como as que diziam que a melhor cal provinha da rocha calcária mais dura e mais pura) e reformaram as demais (como a que estabelecia que a melhor proporção para a argamassa era de 2:1, sendo que Smeaton descobriu que, para a argamassa hidráulica, a melhor proporção entre cal e pozolanas era de 1:1). Com isso, podemos dizer que o julgamento de Smeaton

quanto às hipóteses construtivas em estudo, quanto à escolha e preparo da argamassa para a construção do Farol de Eddystone e quanto à causa material da hidraulicidade foi calcado na imparcialidade de sua pesquisa, por se basear exclusivamente em valores cognitivos, sendo este um aspecto essencial que a caracterizaria como científica (LACEY, 2008, pp. 83-87).

2.6 O patenteamento do cimento natural

O esforço realizado para desenvolver uma argamassa hidráulica utilizável na construção foi parte do desenvolvimento técnico e científico generalizado ocorrido a partir da segunda metade do século XVIII em alguns países da Europa, como a Inglaterra, conhecido como Revolução Industrial. Os anos de 1750 a 1850 viram desenvolvimentos tecnológicos que afetaram profundamente os padrões civilizatórios, com a mudança da relação entre o homem e os recursos naturais, primeiramente no Reino Unido, em seguida na Europa Continental e na América do Norte e, por fim, na maior parte do resto do mundo (SINGER et al., 1958, p. v). Além do uso cada vez maior de máquinas, a ciência tornou-se paulatinamente uma força essencial na indústria como um todo durante este período, como base do desenvolvimento tecnológico, afetado crescentemente pelas novas idéias científicas surgidas principalmente nas áreas da física e da química modernas (ibid.).

Segundo Dorfman (2003, pp. 9-10), a « busca por novos materiais de construção, dentro da qual se insere o desenvolvimento do cimento e do concreto, foi decorrência da necessidade de obtenção de meios capazes de responder às novas necessidades surgidas no bojo da Revolução Industrial ». Essas novas necessidades diziam respeito à construção de canais, rodovias, pontes, túneis, docas e portos, para escoar a produção, bem como indústrias, usinas geradoras de energia, estações de trem, exigindo que prédios e obras fossem construídos numa escala e numa velocidade sem precedentes. Por sua vez, materiais tradicionais, como a madeira, cada vez mais escassos na Europa, eram inadequados às novas condições surgidas com a industrialização, devido aos riscos de incêndio. Nas regiões industriais e nas cidades cada vez mais densas tornava-se urgente à necessidade de adoção de materiais resistentes ao fogo.

Desde o Grande Incêndio de 1666, exigia-se que as edificações em Londres tivessem paredes e coberturas não combustíveis, sendo o exemplo da metrópole

seguido pelas cidades provincianas. Nos vilarejos e pequenas cidades inglesas, onde as rochas para construção podiam ser facilmente extraídas e transportadas, as construções em pedra eram tradicionais. Já nos locais com vastas quantidades de madeira, as construções em madeira persistiram durante o século XVIII. No entanto, o desflorestamento de largas áreas para a agricultura ou para a produção de carvão diminuiu progressivamente tais áreas onde a madeira era o recurso principal para construção. Nos locais onde a rocha e a madeira não estavam disponíveis, o tijolo de argila era o material mais comum para construção de paredes das edificações e casas no Reino Unido. A escolha do tipo de material para construção repetia-se na França, diferentemente da Holanda, Bélgica e norte da Itália, onde a construção com tijolos era a tradição (SINGER et al., 1958, p. 446).

A substância ativa mais comum usada nas argamassas para assentar as construções de pedra e tijolos na Europa era a cal, cujas propriedades aglomerantes variavam de acordo com a natureza das impurezas encontradas nas rochas calcárias. Algumas das cales escuras eram preferidas pelos construtores por ter a propriedade hidráulica, a capacidade de endurecer em locais úmidos ou ainda sob a água. Por outro lado, os construtores europeus da época sabiam que as pozolanas adicionadas a cales não hidráulicas podiam formar uma mistura com propriedades hidráulicas, bem como pós de pedaços de telhas, “trass” holandesas e escórias de fornos de ferreiros (ibid., 1958, p. 447).

Na busca por uma argamassa hidráulica aplicável ao novo contexto de industrialização e urbanização na Inglaterra, James Parker, em 1796, patenteou um cimento natural³¹ obtido da calcinação de nódulos de calcário impuro contendo argila³². Os nódulos de calcário eram encontrados em vários locais da Inglaterra, sendo conhecidos como septarias ou pedras de cimento (do latim, *caementu*, que designava uma pedra natural de rochedos na Roma Antiga). Eram pedras de forma arredondada que continham veios e um núcleo de material argiloso. Para produzir o então nomeado por Parker “Cimento Romano”, esses nódulos eram despedaçados com marretas e carregados para fornos em forma de garrafa com capacidade para até 30 toneladas. Após três dias, a rocha, já suficientemente queimada, era retirada

³¹Os assim chamados cimentos naturais são feitos de minérios nos quais os constituintes calcários e argilosos estão presentes em proporções grosseiramente adequadas para produzir, quando calcinados e moídos, cimentos (COWAN; SMITH, 1988, p. 114).

³²A argila é composta principalmente de caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que, aquecida, dá origem aos compostos: alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2).

pela parte de baixo do forno, e mais rocha e carvão eram adicionados no topo do forno. A rocha calcinada era moída³³ e peneirada antes de ser acondicionada em barris para expedição (ELLIOTT, 1992, p. 152). A patente de Parker especificava que, para se obter o cimento romano³⁴ na sua forma mais eficaz para ser aplicada na construção, isto é, com a maior resistência possível no menor espaço possível de tempo, era preciso misturar cinco partes do pó de cimento com duas partes de água, sendo que o tempo de pega³⁵ era de dez a vinte minutos (patente nº 2120).

Essa patente de Parker para produzir cimento natural é um dos mais antigos marcos citados nas fontes voltadas ao surgimento do cimento moderno, sendo o resultado de uma série de tentativas realizadas na segunda metade do século XVIII na Inglaterra e na França para obter uma argamassa com propriedades hidráulicas. Seu ponto de partida foram as experiências de John Smeaton durante a construção do Farol de Eddystone, publicadas em sua obra de 1791, que exerceu importante influência sobre o desenvolvimento posterior rumo à invenção do cimento moderno (DORFMAN, 2003, pp. 10-11).

O cimento de Parker foi testado por um engenheiro da *British Society for Extending the Fisheries and Improving the Sea Coasts of This Kingdom*, Thomas Telford (1757-1834), especialista na construção de canais e estruturas portuárias. O relatório favorável de Telford e a venda da patente para Samuel e Charles Wyatt fizeram a fábrica da família prosperar até 1810, quando a patente de Parker expirou (ELLIOTT, 1992, p. 152). Outras iniciativas empresariais para produzir cimento natural foram feitas por toda a Inglaterra, na França e, inclusive, nos Estados Unidos.

Quando da construção do Canal Erie na cidade de Nova York, nos Estados Unidos, a argamassa de cal usada no assentamento das rochas em 1818 mostrou em pouco tempo sinais de deterioração. Seus fornecedores, ao queimarem uma rocha local, descobriram que a cal produzida a partir dela não se desmanchava

³³Diferentemente da cal (hidráulica ou não), convertida em pó pelo processo de extinção, o cimento natural não pode ser extinto, sendo este um dos traços característicos que distingue atualmente o cimento da cal; por isso, para ser usado, o cimento necessita ser finamente moído por meio de processos mecânicos.

³⁴O cimento natural, obtido da calcinação de certas rochas calcárias impuras contendo argila, passou a ser comumente chamado, após a patente de Parker e a comercialização de seu produto, de cimento romano.

³⁵Pega refere-se ao grau de consistência da argamassa no qual se torna impossível modificar sua forma sem fraturá-la; o tempo de pega é uma medida muito usada na construção, que se refere ao período de tempo decorrido até a pega da argamassa ou do concreto.

debaixo da água, sendo que testes comprovaram que, quando essa rocha era queimada, moída e misturada com areia e água, ela endurecia sob a água. Ao investigar o material produzido, Canvass White (1790-1834), um dos assistentes na construção do Canal Erie, obteve a patente em 1820 para o primeiro cimento natural a ser manufaturado nos Estados Unidos, um tipo de cimento feito de uma pedra composta por calcário, sílica e alumina numa proporção capaz de produzir cimento hidráulico (ELLIOTT, 1992, p. 160).

O cimento hidráulico foi usado na construção de outros canais nos Estados Unidos, como no Canal de Delaware e no Canal de Hudson, que motivaram a abertura de uma área de produção de cimento natural em Rosendale, em Nova Iorque, responsável, no final do século XIX, por 42% da produção de cimento natural nos Estados Unidos. Essas plantas de cimento eram favorecidas economicamente pelo largo e duradouro mercado de construção de canais, pela construção de edificações e de estradas para o oeste do país, que lhes garantia a estabilidade econômica necessária para prosperarem.

Até a metade do século XIX, o termo 'cimento' foi usado geralmente para se referir ao cimento natural, denominado enganosamente de cimento romano³⁶ (assim denominado para mercadologicamente se parecer ao cimento produzido pelos romanos antigos, supostamente produzindo argamassas e concretos tão duros e duráveis como os espécimes legados pelo Império Romano), feito a partir da calcinação de rochas calcárias impuras de diversas regiões da Europa e dos Estados Unidos, com composições muito variáveis, contendo usualmente entre 45 e 65% de carbonato de cálcio e acima de 55% de argila e outros compostos (DAVEY, 1961, pp. 105-106).

As pesquisas para se produzir cimento romano revelam outra faceta do desenvolvimento tecnológico desse material, ligada ao seu contexto econômico: essas investigações eram muitas vezes conduzidas por pesquisadores práticos para a obtenção de cimentos patenteados, isto é, com a finalidade de se obter um produto comercializável sobre o qual seu inventor detinha os direitos de produção e comercialização. Neste sentido, pode-se dizer, em termos contemporâneos, que algumas pesquisas sobre o cimento a partir da Revolução Industrial visavam, não

³⁶Como vimos o cimento romano, diferentemente do cimento natural, era produzido a partir da cal hidratada (cal extinta) misturada com cinzas vulcânicas ou outros materiais pozolânicos, sendo mais apropriadamente caracterizado como cimento pozolânico.

conhecer mais sobre a composição do material, mas sobretudo obter inovações, ou seja, invenções rentáveis, produtos tecnológicos com valor comercial (FREEMAN³⁷, 1974, p.22 apud OLIVEIRA, 2012, p. 2471).

Essas pesquisas tecnocientíficas comercialmente orientadas (LACEY; MARICONDA, 2014, p. 668; LACEY, 2014, p. 683) apossaram-se do conhecimento vigente sobre o modo de fabricação do cimento, seja de tipo tradicional, seja de tipo científico, de caráter público e resultado de iniciativas empíricas e sistemáticas ao longo dos séculos, transmitidas de geração a geração, de pesquisador a pesquisador. Este parece ter sido o caso das pesquisas feitas por Parker sobre as septarias para a fabricação de cimento natural, cujo ponto de partida foram as revelações de Smeaton, que aperfeiçoaram, como vimos, o conhecimento tradicional em voga sobre as argamassas de cimento.

O patenteamento de alguns dos resultados dessas pesquisas indica que elas se alijaram de contribuir com a continuidade dos esforços coletivos para a aquisição de mais conhecimentos sobre os materiais, os modos de produção e de preparo de argamassas hidráulicas, que remontam a tempos imemoriais, restringindo-se meramente ao caráter privado e comercial que as guiaram. Essa transição do caráter público para o caráter privado do conhecimento científico vai marcar também o próximo estágio de desenvolvimento do material – a produção dos cimentos artificiais³⁸ e se constituirá numa tendência em ascensão a contrabalançar os esforços públicos e abertos das investigações no campo das pesquisas sobre o cimento.

2.7 Os experimentos para produzir cimento artificial

Era de conhecimento geral dos engenheiros da época que as obras marinhas e em contato com a água, feitas de cimento natural não duravam por muito tempo, sem que fossem feitos frequentes e custosos reparos para sua manutenção. No prefácio de “Um tratado prático e científico sobre argamassas e cimentos calcários”, Vicat afirma que :

³⁷FREEMAN, C. **The economics of industrial innovation**. Harmondsworth: Penguin Books, 1974.

³⁸Os cimentos artificiais são produzidos por meio da junção e da mistura de proporções empiricamente determinadas de calcário e argila, de modo a resultar num aglomerante com propriedades hidráulicas.

[...] uma enormidade de barragens, vertedouros e aquedutos, de construção recente, já exibem todas as características da idade, sem outra possibilidade de se atribuir essas dilapidações inesperadas a qualquer outra causa que não seja a qualidade ruim das argamassas e cimentos usados (Vicat, 1837, p. ii, tradução nossa).

Como diretor da construção da ponte sobre o rio Dordogne, na França, o primeiro grande projeto do período no qual as fundações foram construídas com concreto sem uso de pozolanas, Louis Joseph Vicat (1786-1861) voltou-se, em suas pesquisas sobre cales, cimentos e argamassas em 1812, aos fatores responsáveis por suas propriedades hidráulicas (ELLIOTT, 1992, p. 155). Seu propósito era pôr um fim à insuficiência do conhecimento na arte de fabricação de cales e cimentos para obras hidráulicas ou marinhas, submetidas a palpites e obscuras analogias (VICAT, 1837, p. i).

Antes de prosseguir é necessário fazer um pequeno esclarecimento. Os relatos do imenso número de experimentos feitos por Vicat sobre cales, cimentos e argamassas, cujos resultados foram compilados em 25 tabelas, foram publicados, em 1818, na sua obra "Traite pratique et theorique de La composition des mortiers, ciments et gangues a pouzzolanes". No entanto, apesar do acesso fácil à obra, a ausência de versões em português ou inglês não permitiu a consulta a essa fonte primária. Para contornar essa barreira, fiz uso de uma obra posterior de Vicat sobre o mesmo assunto, a referida obra de 1837, traduzida para o inglês pelo capitão J. T. Smith, presidente da Sociedade Filosófica de Edinburgo, membro da Royal Society e da Instituição de Engenheiros Civis. Uma transcrição de trechos da obra de 1818 pelo "The Franklin Journal and American Mechanics' Magazine", na sua edição de 1826, foi usada como fonte secundária de informação para compor esta seção.

Partindo do princípio de que as características físicas que serviam para distinguir os diferentes tipos de rochas calcárias falhavam em dar qualquer indicação das qualidades da cal produzida a partir delas, Vicat propõe um método de ensaio das rochas calcárias para classificá-las quanto à sua hidraulicidade (VICAT, 1837, p. 3). Esse método consistia em calcinar por quinze a vinte horas as amostras de diferentes tipos de rochas calcárias e deixá-las esfriar dentro de uma garrafa hermeticamente fechada. Em seguida, essas amostras eram imersas por cinco segundos em água pura. Durante sua secagem diferentes tipos de fenômenos relacionados à extinção da cal, com variados tempos iniciais e com distintas

intensidades, podiam ser notados: ruídos, vapores quentes, fissuração, volume e redução a pó poderiam ocorrer instantaneamente, após cinco minutos, meia hora, uma hora e em períodos muito variáveis, com intensidades que variavam em proporção inversa ao tempo decorrido para seu início (VICAT, 1837, pp. 3-5).

Ainda durante a extinção era adicionada mais água às amostras dos diferentes tipos de cal, que eram mexidas até a mistura adquirir uma consistência dura. Essas amostras eram deixadas a repousar e esfriar por cerca de duas a três horas. Caso a cal não fosse extinta, era preciso que fosse reduzida mecanicamente a pó, sem a adição de água, antes de prosseguir conforme descrito a seguir. Na sequência, adicionava-se mais água às amostras até que adquirissem a consistência da argila pronta para ser usada na fabricação de potes. Essas amostras assim preparadas eram imersas sem demora na água, tomando-se o cuidado de registrar o dia e a hora da imersão. Com base nas observações feitas aplicando-se esse método de ensaio às amostras de rocha calcária do Reino Unido durante 14 anos, Vicat propôs o seguinte sistema de classificação das cales (VICAT, 1837, pp. 5-8):

- a) cales ricas são aquelas cujo volume dobra na extinção e cuja consistência se mantém igual ao primeiro dia após anos de imersão, dissolvendo-se até o último grão na água pura;
- b) cales pobres têm seu volume pouco aumentado na extinção, mantêm sua consistência e deixam um resíduo insolúvel após anos de imersão;
- c) cales moderadamente hidráulicas adquirem pega em quinze ou vinte dias após a imersão e continuam a endurecer, sendo que, após um ano adquirem a consistência de um sabão duro; elas se dissolvem na água pura, mas com grande dificuldade; sua expansão na extinção é variável, sendo que frequentemente atinge os limites alcançados pelas cales pobres;
- d) cales hidráulicas adquirem pega após seis ou oito dias de imersão e continuam a endurecer principalmente durante os seis primeiros meses; após esse período sua dureza pode ser comparada com as das rochas menos duras, sendo que a água cessa de agir sobre elas; sua expansão na extinção é pequena, como a das cales pobres;

- e) cales eminentemente hidráulicas adquirem pega do segundo ao quarto dia de imersão e, após um mês, já estão muito duras e insolúveis; após seis meses, elas parecem com as rochas calcárias; sua expansão na extinção é sempre pequena, como a das cales pobres.

Vemos que a pega das amostras em primeiro lugar e o tempo de pega em segundo lugar são os parâmetros da classificação das cales proposta por Vicat. Não ocorrendo a pega, as cales são não hidráulicas, podendo ser ricas ou pobres a depender do grau de sua expansão na extinção. Já, com a ocorrência da pega, o tempo medido para seu estabelecimento determinará se as cales são mais ou menos hidráulicas. Na obra de 1837, Vicat já faz referência a um aparato criado por ele para testar a pega de argamassas: uma agulha de costura com 0,12 cm de diâmetro, com a extremidade em contato com a argamassa achatada e a outra extremidade recebendo um peso de 0,3 kg. Segundo o autor essas especificações eram correlacionadas ao estado da argamassa resistindo à pressão de um dedo com a força média do braço e à impossibilidade de essa argamassa alterar sua forma sem ser fraturada (VICAT, 1837, p. 9).

Por meio da análise química dessas diferentes categorias de cales, Vicat foi capaz de determinar com precisão sua composição, passo importante para sua formulação da fabricação de cimento artificial (ibid., pp. 9-10):

- a) as cales ricas são principalmente as formadas por calcário puro ou contendo uma mistura de 1% a 6% de sílica, alumina, magnésia, metais e outras substâncias, tomadas separadamente ou duas a duas, três a três etc.;
- b) as cales pobres são as rochas calcárias associadas com sílica na forma de areia, magnésia, óxidos de ferro ou manganês, em variadas proporções, limitadas entre 15 a 30% no conjunto;
- c) as cales moderadamente hidráulicas são rochas calcárias unidas à argila, magnésia, metais ou manganês, em proporções variáveis não excedendo de 8% a 12% do todo;
- d) as cales hidráulicas são rochas calcárias contendo sílica, alumina, magnésia, metais ou manganês, em proporções variáveis entre 15 e 18% do total, com a

predominância de sílica, independentemente das outras substâncias aparecerem separadamente ou combinadas;

- e) as cales eminentemente hidráulicas são as rochas calcárias contendo sílica, alumina, magnésia, metais ou manganês, em diferentes proporções, mas limitadas entre 20 e 25% do total, com predominância da sílica, algumas vezes na extensão de formar mais da metade das impurezas.

As conclusões gerais do pesquisador com base nos resultados de sua análise química das diferentes cales foram: não existe argamassa perfeitamente hidráulica sem sílica; e todas as cales hidráulicas contêm argila, constituída de sílica e alumina em proporções similares ao que constitui as argilas comuns (VICAT, 1837, p. 11).

O procedimento experimental proposto por Vicat para testar empiricamente se as misturas em proporções adequadas de calcário e argila resultariam em cimento hidráulico, sem a necessidade do uso de pozolanas, era similar àquele que Smeaton havia utilizado para testar suas misturas de cal e pozolanas (DORFMAN, 2003, p.12). Ele preparou esferas feitas com diferentes tipos de calcário e argila, em variadas proporções, que, depois de secas, eram calcinadas numa temperatura moderada. Essas bolas eram mergulhadas no fundo de uma vasilha cheia de água pura, para serem testadas (JONES, 1826, p. 372).

Se depois de oito a dez dias, esses corpos de prova ficassem duros, resistindo à pressão dos dedos, era a prova de que o cimento produzido ou a argamassa produzida com ele tinha propriedades hidráulicas (ibid.). Por meio desses experimentos, Vicat pode constatar que usualmente vinte partes de argila seca e oitenta partes de cales ricas, ou quinze partes de argila e oitenta e cinco partes de cales hidráulicas eram suficientes para produzir cimento hidráulico artificial (VICAT, 1837, pp. 21-22). Adicionalmente, ele constatou que se a quantidade de argila usada ficasse entre 33 e 40%, o cimento obtido não se pulverizaria por meio da adição de água, mas poderia ser facilmente pulverizado por meio mecânico, sendo que a argamassa feita com ele endureceria prontamente sob a água³⁹ (ibid.).

³⁹A descoberta de Vicat de que a proporção de argila em relação à cal ou rocha calcária implicava diferentes modos de pulverização do aglomerante formado a partir da mistura originou dois métodos de produção de cimento artificial (em um a cal rica era extinta antes de ser misturada com argila para ser calcinada, por isso a cal era duplamente queimada; no outro a rocha calcária era triturada antes de ser misturada com a argila para ser calcinada); como o método que se disseminou na produção do cimento artificial foi este último, por usar uma maior variedade de calcários e por ser mais econômico

Sua explicação para o fato de a mistura de cal e argila produzir cimento hidráulico era de que sob a ação do fogo os princípios essenciais descobertos na análise das cales hidráulicas eram intimamente unidos, numa operação de síntese. Por isso (VICAT, 1818, p. 7 apud JONES, 1826, p. 372, tradução nossa):

Não deve ser suposto que a argila calcinada separadamente e adicionada posteriormente à cal comum, nas proporções mencionadas, terá os mesmos resultados observados quando as duas substâncias são misturadas antes de serem calcinadas. O fogo modifica uma substância pela outra e faz surgir um novo composto, que possui novas propriedades.

Vicat relata que o cimento mais comumente usado em sua época na Inglaterra tinha tempo de pega menor do que o cimento hidráulico artificial composto por 80% de cal e que diferia deste por não ser extinto. Isto acontecia por ele possuir maior quantidade de argila. A análise química do cimento patenteado de Parker revelou que ele continha 45% de argila e 55% de cal. Já, o cimento de Yorkshire continha 34% de argila, o de Sheppy, 32%, e o de Harwich, 47%. Apesar do menor tempo de pega dos cimentos naturais, segundo ele:

[...] as propriedades químicas de matérias-primas aparentemente similares podem ser tão diferentes que uma formulação para o cimento hidráulico numa região possa não servir, com igual sucesso, para outra região, servindo apenas de pista da direção a ser tomada pelos experimentos similares com novos materiais à nossa disposição (VICAT, 1837, pp. 21-23, nota de rodapé d, tradução nossa).

Por isso, para Vicat a mistura artificial de calcário e argila em relação à sua mistura natural para a produção de cimento era mais vantajosa, uma vez que tal procedimento permitia manter sob um controle mais uniforme e definido as propriedades do produto final a partir da regulação das proporções das matérias-primas que entram em sua composição (BOGUE, 1947, p. 8).

Vicat chegou a dirigir uma fábrica de cimento hidráulico artificial em Meudon, região próxima à Paris, estabelecida por Brian e Saint Leger. Essa fábrica usava o processo mais barato de fabricação. Ao contrário do mais caro, que fazia uso de cales ricas extintas misturadas com argila, o processo mais barato usava quaisquer substâncias calcárias fáceis de serem pulverizadas mecanicamente com água, em substituição às cales extintas. Esse cimento produzido por Vicat ganhou a medalha

(VICAT, 1837, p.21), o cimento passou, desde então, a ser distinguido da cal hidráulica pelo processo de sua redução a pó.

de ouro numa exposição de produtos engenhosos em 1827 (VICAT, 1837, p.21 e nota de rodapé c).

2.8 Comparação entre as pesquisas de Vicat e de Smeaton

O método de ensaio de rochas calcárias, a análise química das diferentes categorias de cales e os experimentos com as misturas de cal e argila, feitos por Vicat, compartilham de algumas características metodológicas levantadas na análise filosófica das investigações de Smeaton. Em primeiro lugar, são pesquisas empíricas e sistemáticas para testar princípios e hipóteses em voga acerca das argamassas de cales e cimentos relativos às suas propriedades hidráulicas: enquanto o método de ensaio proposto por Vicat atestou cabalmente que as características físicas usualmente reconhecidas por distinguir as rochas calcárias não serviam como indicativos da qualidade da cal derivada delas quanto à sua hidráulidade, a análise química de cales e sua síntese química a partir de cal e argila corroboraram definitivamente que a causa da hidráulidade de cales e cimentos estava na formação de compostos químicos advindos de reações químicas entre a cal e a argila. Por seu caráter empírico e sistemático, as pesquisas de Vicat caracterizam-se, como as pesquisas de Smeaton, como científicas.

Em segundo lugar, as pesquisas de Vicat estão baseadas na centralidade de experimentos, caracterizados pelo controle rigoroso e isolamento de parâmetros sob avaliação, no sentido de manter as condições de intersubjetividade e replicabilidade dos experimentos. No caso do método de ensaio de rochas calcárias, esse controle e isolamento de parâmetros de entrada consistem na mensuração de tempo de calcinação das amostras de rochas calcárias, tempo de sua imersão em água para sua extinção e tempo em que as amostras eram deixadas imersas em água após sua extinção. Já, no caso da análise e síntese química, o controle e isolamento de parâmetros de entrada consistiam na pesagem dos produtos resultantes da análise e na pesagem das matérias-primas que entravam na síntese. Tal como Smeaton, Vicat também fez um controle qualitativo da quantidade de água usada tanto no método de ensaio de rochas calcárias quanto no experimento de síntese química, aceitando passivamente parte do conhecimento tradicional relativo à fabricação de

cal hidratada e à consistência de argamassas de cal e cimento usadas na construção, que não eram objetos de sua investigação.

Com relação ao controle e isolamento dos parâmetros de saída, Vicat avalia quantitativamente o volume da cal hidratada, tempo inicial para a ocorrência de fenômenos relacionados à extinção, tempo de pega das amostras imersas, tempo para que essas amostras imersas adquirissem certa consistência e tempo para que elas adquirissem certa dureza no método de ensaio de rochas calcárias. E avalia qualitativamente, como fez Smeaton, a consistência, a dureza e a solubilidade em água. Por isso, o valor cognitivo da adequação empírica que fundamentou a avaliação de hipóteses conservou parcialmente o caráter qualitativo já revelado e comentado quando da análise filosófica das pesquisas de Smeaton. Vale destacar que os experimentos de Vicat buscaram, na medida do possível para o nível técnico e tecnológico de sua época, a maior caracterização quantitativa das variáveis de saída dos experimentos, em relação às pesquisas feitas por Smeaton. É sintomática neste aspecto a invenção por Vicat de um aparelho de medida da pega de argamassas, cuja avaliação deixa de ser qualitativa para ser quantitativa. Neste sentido, podemos conjecturar que o valor cognitivo da adequação empírica, de Smeaton para Vicat, experimentava na comunidade científica voltada aos estudos das argamassas e cimentos uma transição de seu caráter eminentemente qualitativo para o caráter quantitativo característico das práticas da ciência moderna.

Além dessa diferença metodológica na avaliação dos parâmetros de saída entre as pesquisas feitas por Smeaton e por Vicat, que aponta para uma maior aproximação das investigações de Vicat das práticas científicas modernas (maior aproximação que será melhor discutida na próxima seção), outra característica que explica o sucesso das pesquisas de Vicat em ter provado a causa material da hidraulicidade e em ter produzido cimento artificial foi o fato de elas terem sido informadas pelos conhecimentos e procedimentos consolidados da química moderna, com os quais Vicat estava familiarizado (VICAT, 1837, pp. 150-152).

Até o fim do século XVII a maioria dos químicos postulava que o número de elementos constituintes da matéria era quatro (fogo, ar, água e terra) ou três (sal, enxofre e mercúrio), não reconhecia a existência de diferentes gases e não se importava com as mudanças de peso que ocorriam nas reações químicas. Apesar disso, o químico Johann Baptista Van Helmont (1577-1644) já havia proposto uma

nova e importante classe de substâncias que compunham o ar, que ele denominou de gases, tendo, inclusive, mostrado que o gás carbônico, obtido da queima de carvão, podia ser obtido da fermentação de líquidos açucarados e era encontrado no ar. Por sua vez, a publicação em 1661 de “O químico cético”, por Robert Boyle (1627-91), obra que atacava as velhas ideias relativas aos elementos, propondo que esses fossem todas as substâncias que não podiam ser decompostas em outras substâncias, não ganhou muitos defensores na época. Isto porque, por um lado, a noção substituía esquemas simples e elegantes por uma multiplicidade de possíveis elementos sem fornecer os meios analíticos de investigação, e, por outro, não parecia aos seus contemporâneos ter qualquer propósito prático. (SINGER et al., 1958, pp. 214-215).

Esse panorama veio a mudar no século XVIII a partir das descobertas e progressos feitos por uma série de pesquisadores. Em 1756, o químico Joseph Black (1728-99) publicou um artigo intitulado “Experimentos com magnésio, cal e algumas substâncias alcalinas”, no qual ele explicou a relação química entre o calcário, a cal e o dióxido de carbono como resultado de uma análise quantitativa cuidadosa das reações químicas, assumindo a conservação da matéria em sua argumentação. Essa lei da conservação da matéria foi assumida também por Antoine Lavoisier (1743-94) em seu experimento para testar a explicação de Boyle para o fato de as cinzas de um metal calcinado serem mais pesadas do que o próprio metal. Boyle creditava o fato à passagem do calor, entendido como uma substância material, através da vasilha do fogo para o metal. Lavoisier raciocinou que, se assim fosse, uma quantidade de metal introduzida numa vasilha fechada hermeticamente e submetida ao fogo, após a calcinação e sem abri-la, teria seu peso aumentado pela quantidade de calor absorvido durante sua calcinação. No entanto, ao calcinar uma quantidade conhecida de estanho num frasco hermeticamente fechado por algumas horas até que nenhuma calcinação parecesse estar ocorrendo e procedendo à medida do peso do frasco, Lavoisier constatou que nenhuma mudança ocorria. Mas, ao abrir o frasco, ele ouviu o som da entrada de ar e, ao medir novamente seu peso, constatou um ligeiro aumento, que foi atribuído ao peso do ar que entrara. Este peso adicional era igual ao aumento sofrido pelo estanho ao se transformar em cinzas. Com tal experimento e raciocínio, Lavoisier concluiu que a calcinação era uma combinação do metal com ar ou com gases que formavam o ar, explicação que contrariava a teoria do flogisto, teoria dominante na

época, que explicava a combustão como sendo a decomposição dos combustíveis em seus elementos constituintes: o flogisto, princípio responsável pela combustão, e as cinzas (SINGER et al., 1958, pp. 218-220).

A teoria do flogisto sofria nessa época com uma série de anomalias advindas de investigações empíricas. Uma dessas anomalias havia sido observada, em 1774, por Joseph Priestley ao queimar cinzas de mercúrio. Priestley surpreendeu-se ao constatar a formação de mercúrio e de um gás com propriedade de combustão, como produtos de seu experimento. Ao tomar conhecimento dos resultados do experimento de Priestley, Lavoisier chegou a duas hipóteses complementares: o mercúrio aquecido moderadamente combina com a porção ativa do ar, aquela parte do ar que entra na reação de combustão; e as cinzas de mercúrio calcinadas se decompõem em seus elementos constituintes – o mercúrio e a porção ativa do ar. Para testar suas hipóteses, ele concebeu um experimento, no qual, aquecendo o mercúrio em contato com um volume limitado de ar, ele pode medir uma diminuição no volume do ar enclausurado após o encerramento da combustão; ao coletar as cinzas do mercúrio calcinado e aquecê-las, recolhendo o gás desprendido do processo de calcinação, Lavoisier constatou que seu volume era igual à diminuição do volume medido anteriormente e que esse gás propiciava uma melhor combustão do que o ar comum. Misturando os dois gases, o produto resultante não se distinguia do ar comum (ibid.).

Lavoisier acabara de provar, por meio dos procedimentos de análise e síntese química, que o ar atmosférico era um composto e que a combustão ou calcinação era a combinação de um gás presente no ar, que ele chamou de oxigênio, com corpos combustíveis.

Pouco tempo depois de ter proposto sua famosa teoria moderna da combustão, Lavoisier, baseando-se nos experimentos de Henry Cavendish (1731-1810) com o hidrogênio e oxigênio, foi capaz de sintetizar água a partir da explosão resultante da combinação entre esses dois gases, e, por meio de um outro experimento, foi capaz de liberar o hidrogênio contido na água. Dessa forma, Lavoisier havia estabelecido a natureza composta de dois elementos clássicos – o ar e a água (SINGER et al., 1958, pp. 220-221).

Essas descobertas revolucionárias desencadearam um desenvolvimento extraordinário do repertório das substâncias químicas conhecidas e do campo das

análises químicas. Isto fez com que a elaboração de uma nova nomenclatura, bem organizada e sistemática, das substâncias fosse necessária. A tarefa coube a Lavoisier, Guyton de Morveau (1737-1816), Claude Berthollet (1748-1822) e Antoine François de Fourcroy (1755-1809). Os princípios para sua organização foram que tal nomenclatura tivesse as vantagens de indicar as várias substâncias, defini-las, lembrar suas partes constituintes, classificá-las segundo sua composição e chamar a atenção para a relação entre suas proporções e a variação em suas propriedades. O trabalho dessa comissão encerrou-se com a publicação de um dicionário contemplando os nomes novos e antigos de cerca de 700 substâncias, no qual foi estabelecido a ideia de individualidade química, tão estranha para os alquimistas (SINGER et al., 1958, pp. 221-223).

Essa individualidade química dos elementos e das substâncias foi assumida na teoria atômica de John Dalton (1766-1844) alguns anos depois, que postulava: ser a matéria composta por um vasto número de partículas extremamente diminutas – os átomos, sendo a análise e síntese química mera separação e reunião desses átomos, que não podiam ser criados nem destruídos (postulado teórico que sustentava a lei da conservação da matéria); ser cada elemento químico um tipo distinto de átomo e cada composto uma combinação distinta desses tipos de átomos. Com base nesses postulados, Dalton foi capaz de, por meio da química quantitativa em pleno desenvolvimento, estabelecer os pesos relativos entre os elementos químicos e entre os compostos conhecidos. Ele foi o primeiro a perceber a conveniência de ter uma notação simbólica dos elementos químicos e de usar essa notação em fórmulas para representar os compostos químicos. Seu símbolo para os elementos representava apenas um átomo, possuindo uma significação quantitativa precisa, enquanto que sua fórmula para os compostos apontava, por suposição, sua estrutura molecular e, por meio da análise química, a proporção em peso de seus elementos constituintes. Sua notação foi modificada, por volta de 1814, por Jacob Berzelius (1779-1848), para facilitar a expressão de fatos e da experiência na química, sendo usada, com algumas modificações e extensões, até os dias de hoje (SINGER et al., 1958, pp. 223-226).

2.9 Análise filosófica das pesquisas de Vicat

Foi neste contexto de consolidação dos fatos, princípios, métodos e teorias da química moderna que Vicat realizou seus experimentos com as argamassas de cimento. Tal como Lavoisier e seus seguidores, Vicat buscou os princípios materiais e leis quantitativas que pudessem explicar a síntese de cales hidráulicas a partir dos resultados obtidos por meio da análise química dessas cales.

O caminho da pesquisa sobre a hidraulicidade das cales e cimentos desde o achado de Smeaton, em 1756, de que as cales hidráulicas sempre apresentavam uma proporção de argila até o estabelecimento preciso dessa proporção e de que os componentes responsáveis pela propriedade deveriam ser a sílica e a alumina presentes na argila por Vicat, em 1818, não foi cumulativo e nem dirigido em todos seus momentos pelo espírito científico.

As observações de Smeaton sobre as cales hidráulicas passaram despercebidas ao químico sueco Torbern Bergmann (1735-1784), que, ao analisar as cales hidráulicas de Lena, encontrando nelas uma porcentagem significativa de manganês, atribuiu sua hidraulicidade a essa substância. Guyton de Morveau analisou as principais cales hidráulicas da França para pôr à prova as ideias de Bergmann. Apesar de ter encontrado argila em todas elas e manganês em apenas uma das cales analisadas, Morveau não ousou contrariar a autoridade de Bergmann, mantendo como causa da hidraulicidade das cales a presença do manganês. Tal postura anticientífica foi também a de Nicolas-Théodore de Saussure (1767-1845) que, tendo analisado as cales da Suíça e não encontrado manganês em nenhuma delas, declarou que o manganês era a causa da hidraulicidade, adicionando timidamente que a argila poderia substituir completamente o manganês nessa função, apesar de ser inferior a ele (LE CHATELIER, 1905, pp. 39-40).

Esse breve relato tem o propósito de mostrar o quanto as atividades pretensamente científicas podem estar sendo influenciadas por valores não propriamente científicos (no caso ilustrado, os valores sociais da autoridade e reputação do pesquisador) – na terminologia laceyana, por valores não cognitivos -, muitas vezes escondidos por trás de procedimentos propriamente científicos (LACEY, 1999, p. 12). As investigações para testar a teoria de Bergmann são particularmente interessantes para ilustrar isto. A teoria foi fundamentada na

aplicação equivocada de procedimentos químicos consagrados (BATES, 1922, p. 291). Bergmann aplicou os procedimentos consagrados de análise química de sua época a um número muito limitado de amostras, não representativo da diversidade de cales e cimentos produzidos regional e mundialmente. Com isso, a despeito das evidências empíricas com respeito à presença do manganês nas cales hidráulicas pesquisadas, sua hipótese sobre a causa da hidraulicidade se baseou numa generalização indutiva apressada. Podemos afirmar, tendo por base o modelo teórico de referência, que Bergmann, apesar de lançar mão do valor cognitivo da adequação empírica na avaliação de hipóteses sobre as causas da hidraulicidade de certas cales, não o fez apropriadamente, segundo os mais altos padrões de avaliação disponíveis em seu tempo: não houve por parte dele a consideração da relevância dos dados empíricos obtidos para a confrontação crítica entre hipóteses ou teorias rivais nem a avaliação de confiabilidade dos dados empíricos e das generalizações empíricas derivadas deles (LACEY, 1999, pp. 62-66). Por isso, segundo o modelo laceyano, as pesquisas de Bergmann não poderiam ser caracterizadas como científicas.

Por outro lado, Bergmann não viu necessidade de cotejar os resultados de sua pesquisa com os resultados de outras pesquisas sobre cales hidráulicas fabricadas em diferentes regiões, inclusive os resultados obtidos por Smeaton em suas investigações.

Essas insuficiências argumentativas e cognitivas presentes nas pesquisas de Bergmann não foram contestadas por um período de cinquenta anos por seus pares, devido à sua reputação, que parece ter feito às vezes dos valores cognitivos da adequação empírica e da consistência requeridos das hipóteses de pesquisa pelo método científico e pelos mais altos padrões de avaliação científica (LACEY, 1999, pp. 62-64).

A despeito das evidências empíricas contrárias, químicos de formação foram capazes de se render aos valores do prestígio, do reconhecimento e da autoridade de um de seus pares. Os casos relatados apontam para a influência indevida dos valores não cognitivos no momento da atividade científica no qual apenas os valores cognitivos, como a adequação empírica e a consistência, deveriam se fazer valer nos julgamentos a serem formados (momento de avaliação de hipóteses sobre as causas da hidraulicidade nas argamassas de cales). Esses casos são representativos da ausência de imparcialidade na formação do juízo científico,

segundo o modelo laceyano sobre as relações entre os valores e as atividades científicas (LACEY, 1999, p. 226).

Foi o engenheiro de minas e professor de química da École des Mines, Hippolyte-Victor Collet-Descotils (1773-1815), o primeiro a desfazer os enganos cometidos no juízo científico quanto às causas da hidraulicidade nas cales. Em 1813, ao analisar as rochas calcárias e as cales de Senonches, ele notou que a sílica das cales era solúvel em ácidos, ao contrário da sílica das rochas calcárias, o que, para ele, demonstrava que durante a calcinação deveria haver uma combinação entre a sílica e a cal. Em razão disso, Collet-Descotils atribuiu as propriedades hidráulicas da cal aos compostos formados durante sua calcinação (LE CHATELIER, 1905, pp. 40-41).

Finalmente, Vicat, tomando como referência as observações de Smeaton e generalizando as observações de Collet-Descotils, demonstrou, em 1818, por meio de numerosas análises que todas as cales hidráulicas são originárias de rochas calcáreas argiláceas e inversamente que todas as rochas calcáreas contendo uma quantidade adequada de argila podem servir para a fabricação de cales hidráulicas. Por outro lado, por meio de síntese química de cal e argila, Vicat teve sucesso em obter cales hidráulicas (ibid., p. 41).

Por meio de análise e síntese químicas, Vicat chegou às proporções de 20:80 de argila e cal rica e de 15:85 de argila e cal hidráulica para produzir cimento hidráulico artificial (VICAT, 1837, pp. 21-22). Os refinamentos dos métodos de análise química e os conhecimentos dos compostos químicos em sua época permitiram ainda que ele concluísse que a chave para explicar a hidraulicidade de algumas cales e dos cimentos naturais e artificiais estava na sílica e na alumina presentes nas argilas (ibid., p. 11). Ele estabeleceu que o máximo de hidraulicidade era obtido quando a soma de silício e alumínio era aproximadamente igual à porcentagem de óxido de cálcio (ZAMPIERI, 1989, p. 12).

Sendo assim, além de se basear apropriadamente no valor cognitivo da adequação empírica para se decidir entre princípios e hipóteses testadas por seus experimentos, Vicat levou em conta também o valor cognitivo da consistência entre os resultados de seus experimentos, os resultados dos experimentos de outros pesquisadores e os conhecimentos de química moderna e lógica vigentes em sua época. Apesar de ele se ocupar quase inteiramente das cales hidráulicas em suas

pesquisas, seu método de trabalho e de raciocínio foi referência para muitos pesquisadores e seguido por anos (BATES, 1922, p. 291). Isto deve ter acontecido, segundo o modelo laceyano, porque Vicat havia aplicado os procedimentos científicos de análise e síntese química segundo os mais altos padrões de avaliação dos valores cognitivos das hipóteses em voga em sua época.

Desse modo, ele demonstrou de maneira apropriadamente científica que a causa da hidraulicidade de cales era exclusivamente a quantidade relativa de argila contida nessas cales e refutou a teoria de Bergmann sobre a função do óxido de manganês, teoria ainda em voga naqueles tempos, apesar das numerosas contradições advindas da experiência (LE CHATELIER, 1905, p. 41). Por fim, Vicat rompeu definitivamente com a tese de Smeaton de que as rochas calcárias naturais relativamente impuras eram as únicas potencialmente adequadas à obtenção de cales hidráulicas (ZAMPIERI, 1989, p. 11).

Em razão de suas descobertas, Le Chatelier reconhece que Vicat foi o responsável pela maior parte do desenvolvimento do conhecimento teórico e experimental das argamassas até seu tempo, atribuindo-lhe o título de criador da indústria de cimento tal como a conhecemos hoje (ibid.). Isto porque as pesquisas empíricas e sistemáticas de Vicat apontaram para o fato de que a produção de cimento hidráulico, ao invés de recair na seleção dos tipos mais vantajosos de matérias-primas, como feito por Smeaton e por outros que o sucederam na fabricação de cimento natural, estava no planejamento das misturas, principalmente compostas por cal, argila e gesso, em proporções variadas que resultavam em diferentes tipos de cimentos (ELLIOTT, 1992, p. 155). Afirmou o pesquisador francês:

[...] vemos que por meio de nossa capacidade de regular as proporções, nós podemos dar à cal artificial qualquer grau de energia que queremos e causar que ela se iguale ou supere as cales hidráulicas naturais (VICAT, 1837, p. 21, tradução nossa).

Vemos na afirmação que por trás de suas investigações teóricas e experimentais sobre as cales e cimentos estava o objetivo social de controlar a natureza, usufruindo dela como meio para atender às necessidades humanas (LACEY, 2008, pp. 159-160). O objetivo principal das pesquisas de Vicat era entender a ordem subjacente aos fenômenos investigados (hidraulicidade de cais e cimentos), independentemente dos contextos econômicos, sociais, culturais, políticos e geográficos desses fenômenos, para poder controlar seus componentes

(cal e argila) e leis (proporções entre os componentes), e assim, obter, por meio do controle e planejamento das misturas, produtos aglomerantes otimizados, que servissem bem aos propósitos construtivos em geral, balizados por valores econômicos, sociais, culturais e geográficos. Nesta análise acabamos por contemplar várias teses do modelo das interações entre as atividades científicas e os valores.

Em primeiro lugar, as pesquisas de Vicat foram conduzidas segundo um tipo de estratégia descontextualizadora, dado seu interesse em buscar uma ordem subjacente aos fenômenos, ontologicamente independente do contexto onde ocorriam esses fenômenos. Em segundo lugar, as pesquisas foram motivadas, por um lado, pela perspectiva social de valor do progresso tecnológico (a obtenção de cales, cimentos e argamassas com melhores propriedades hidráulicas) e, por outro, pela perspectiva social de valor do capital e do mercado (a obtenção do melhor custo/benefício na produção de cales, cimentos e argamassas, com o desenvolvimento de um produto construtivo inovador, padronizado, patenteado e competitivo). Em terceiro lugar, notamos as relações mutuamente reforçadoras entre a estratégia descontextualizadora dessas pesquisas e as perspectivas do progresso tecnológico e do capital e mercado de seu contexto. Em quarto lugar, por seu caráter simultaneamente teórico e prático, essas pesquisas caracterizam-se como tecnocientíficas comercialmente orientadas. Diferentemente das pesquisas sobre a hidraulicidade de cales e cimentos realizadas por diversos pesquisadores anteriores a ele, o trabalho de Vicat não objetivou apenas desenvolver um produto, mas sobretudo entender o que era o material pesquisado e o que havia neste material que causava que ele reagisse com a água (BATES, 1922, p. 291). Sua pesquisa era assim tipicamente tecnocientífica, voltada a entender as causas relativas ao fenômeno da hidraulicidade de cales e cimentos, para, assim, controlar essas causas e, por fim, usá-las em favor de projetos na área da construção civil. Vicat fez a previsão de que, com o avanço no conhecimento da química do cimento, o uso do cimento natural cederia cada vez mais lugar ao uso do cimento artificial, com características construtivas planejadas e superiores (ELLIOT, 1992, p. 155).

Em quinto lugar, a despeito de suas motivações teóricas e práticas entrelaçadas, essas pesquisas mantêm a separação entre o nível das possibilidades investigadas (influenciado por valores não cognitivos) e o nível da avaliação das

hipóteses e teorias (marcado exclusivamente pelos valores cognitivos). Em outras palavras, as pesquisas de Vicat preservaram, ao contrário das pesquisas de Guyton e Saussure, o ideal da imparcialidade.

2.10 A invenção do cimento moderno

Às experiências de Vicat seguiram-se várias outras similares, conduzidas por pesquisadores práticos na Inglaterra, França e Alemanha, nas quais se testavam as mais variadas misturas de calcários e argilas para a produção de cimento artificial. Todas elas se limitavam a calcinar as misturas até o limite de temperatura tido como recomendado pelos produtores de cimento natural da época. Essa temperatura era a capaz de reduzir o peso da rocha ao mínimo, pois o melhor cimento romano era o de peso específico menor (REID, 1877, pp. 20-21). Um dos produtos resultantes desses experimentos e que se tornou bastante conhecido nessa época é o “Cimento Britânico”, patenteado por James Frost, em 1822 (DORFMAN, 2003, pp. 12-13).

A patente do “Cimento Britânico” (*British Cement*), obtida por James Frost em 1822, especificava a composição do produto a partir de rochas calcárias e de 9% a 40% de sílica ou de sílica e óxido de ferro, que eram finamente moídos e calcinados até que todo o ácido carbônico fosse expelido. Em seguida, o material calcinado era moído e empacotado. Segundo a patente, o “Cimento Britânico” devia ser usado prontamente após sua mistura com água, pois em poucos minutos ele já adquiria resistência suficiente para a impressão de um dedo. Dependendo da quantidade de óxido de ferro usado na composição do cimento, ele aparentaria uma cor mais clara ou mais escura, sendo que a patente recomendava o uso do cimento claro em construções em condições secas e o cimento escuro em construções em condições úmidas (patente nº 4679).

Frost foi o primeiro a estabelecer uma fábrica de cimento artificial, em 1825, em Kent (REID, 1877, p. 19). Seu Cimento Britânico logo ganhou reputação na Inglaterra e na América (DAVEY, 1961, p. 106).

O cimento artificial mais famoso nessa época era o cimento Portland, patenteado, em 1824, pelo construtor de Wakefield, Joseph Aspdin (1779-1855). Queimando calcário e argila, finamente moídos e misturados, em altas temperaturas, Aspdin obteve um tipo de cimento artificial hidráulico, denominado Portland por se

supor que o concreto feito com ele seria um substituto aceitável da rocha mais usada na construção à época na Inglaterra, extraída das jazidas nas imediações da cidade de Portland, na costa sul da Inglaterra (SINGER et al., 1958, p. 448). Ele estabeleceu uma fábrica de cimento no subúrbio de Leeds, com fornos em forma de garrafa, construídos em alvenaria, com aproximadamente 12m de altura e 5,6m de diâmetro na base. Seu filho, William, abriu outras fábricas de cimento Portland em Thames, em 1843, e em Gateshead, em 1851.

A expansão vertiginosa da construção de estações de trem na Inglaterra no século XIX demandava fortemente o cimento romano, colocando sob risco de esgotamento os suprimentos de septaria. Essa situação econômica foi revertida com a produção em larga escala do cimento Portland, que atendeu prontamente essa demanda (DAVEY, 1961, pp. 106-107).

Segundo Elliott (1992, p. 152, tradução nossa) :

[...] é duvidoso que o cimento produzido sob a patente de 1824 concedida a Aspdin fosse queimado numa temperatura alta o suficiente para produzir clínqueres, e sua patente não estabelecia as proporções de ingredientes a serem empregados, de modo que não podemos identificá-lo com certeza com o verdadeiro cimento Portland na sua definição moderna.

Para produzir o cimento Portland moderno, o calcário e a argila que entram em sua composição precisam ser calcinados numa temperatura suficiente para levá-los à vitrificação ou sinterização, formando o clínquer (clínquerização), que é subsequentemente moído. É uma questão não resolvida dizer quando e quem produziu cimento deste tipo pela primeira vez (DAVEY, 1961, p. 106).

Singer et al. (1958, p. 448) atribuem a descoberta ao próprio Aspdin, que deve ter deliberada ou acidentalmente obtido o clínquer num dos processos de fabricação do cimento Portland, notando a superioridade do cimento produzido a partir dele em relação ao cimento patenteado. Para os autores, a razão de Aspdin não patentear o novo produto foi a de manter sua descoberta em segredo (*ibid.*).

Para Davey (1961, p. 107) e Dorfman (2003, pp. 13-14), quem parece ter primeiramente apreciado a importância da vitrificação na queima das matérias-primas para a produção de cimento foi Isaac Charles Johnson (1811-1911), diretor da firma White & Sons. Segundo Dorfman, até a descoberta de Johnson, não se buscava a vitrificação das misturas de calcário e argila, pois as temperaturas no processo de calcinação não ultrapassavam os 1300°C. Em suas experiências,

Johnson resolveu, ao invés de rejeitar uma das esferas que haviam sofrido temperaturas acima das comumente praticadas, moê-la e testar a argamassa feita com ela, constatando a superioridade de sua resistência em relação à resistência das argamassas de cimento feitas até então (DORFMAN, 2003, pp. 13-14).

Foi somente na década de 1840, que a J.B. White & Sons e a Robin & Aspdin Company tiveram amostras de seus cimentos testados em prensas hidráulicas de 75 toneladas, com resultados obtidos que parecem indicar que essas companhias haviam produzido o cimento Portland em sua formulação moderna, isto é, em fornos com temperaturas suficientemente altas para a obtenção do clínquer. Segundo Elliott (1992, p. 152, tradução nossa) :

[...] porque esses testes eram similares àqueles feitos em 1860-1862 na construção do Sistema de Drenagem de Londres, conhecidos por usar amostras do verdadeiro cimento Portland, parece razoável assumir que em 1848 o cimento Portland já era produzido pelas duas companhias e, talvez, pelas quatro companhias cimenteiras concorrentes na Inglaterra.

De acordo com Reid (1877, p. 22), o ímpeto dado pelo uso do cimento Portland moderno no sistema de drenagem de Londres estabeleceu de uma vez por todas, na Inglaterra, a superioridade construtiva deste cimento em relação ao cimento romano, então bem estabelecido entre os engenheiros e arquitetos da época.

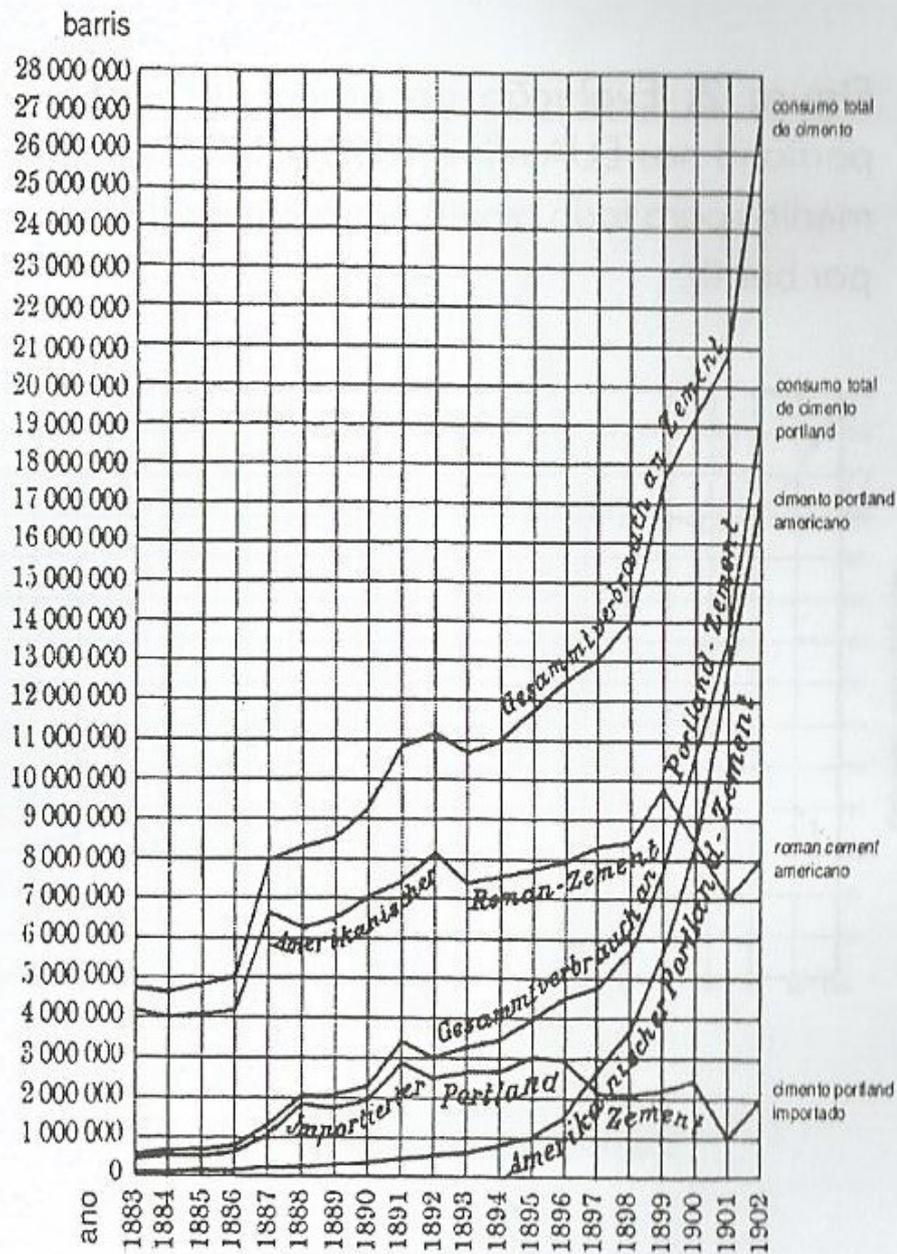
Apesar das qualidades superiores do cimento moderno, os fabricantes norte-americanos permaneceram por muito tempo desmotivados a aprender sobre esse cimento produzido na Europa e que chegava aos Estados Unidos como lastro nos porões dos navios, bem como a fazer investimentos nos métodos de produção do cimento natural. Consequentemente, o cimento natural produzido nos Estados Unidos variava enormemente de acordo com a variedade química das rochas que compunham as jazidas a partir das quais era feito, sendo sua qualidade questionada em razão dos métodos arcaicos empregados na sua fabricação, inclusive relativa aos fornos verticais usados (ELLIOTT, 1992, p. 161).

Foi apenas em 1871, em Lehigh River, na Pensilvânia, que a Coplay Companhia de Cimento começou a produzir cimento Portland, a partir da patente obtida por David Saylor, um de seus proprietários. Seu cimento ganhou o mais alto prêmio do Centenário da Independência dos Estados Unidos, sendo especificado

por engenheiros do governo para a construção de píeres no delta do Rio Mississippi (ibid.).

Pelo final do século XIX, a produção de cimento natural praticamente desapareceu na Europa, cedendo lugar para o cimento Portland. Em contrapartida, nos Estados Unidos a produção de cimento Portland perfazia apenas 28% da produção nacional em 1896, sendo este montante o dobro do cimento Portland importado pelo país da Europa (Gráfico 1). Já, em 1923, a produção de cimento Portland nos Estados Unidos havia crescido mais de noventa vezes e se diversificado pelo país, principalmente a oeste do Rio Mississippi (ELLIOTT, 1992, p. 162).

Gráfico 1 – Consumo, importação e produção de cimento Portland nos Estados Unidos entre 1883 e 1902



Fonte : Dorfman (2003, p. 19).

Dois fatores determinaram a evolução da indústria e do mercado de cimento Portland nos Estados Unidos: do lado da demanda, o programa de grandes obras públicas que vinha sendo realizado desde o século XVIII garantia o crescimento significativo e permanente da produção do produto; do lado da oferta, o impulso decisivo foi dado com a introdução do forno rotatório na indústria cimenteira norte-

americana. Segundo (DORFMAN, 2003, pp. 19-22), enquanto a produção média de um forno vertical ficava em torno de 20 barris diários, o primeiro forno rotatório que funcionou satisfatoriamente nos Estados Unidos era capaz de produzir entre 160 e 300 barris diários. Por isso, a produção de cimento ampliou-se rapidamente a partir de 1890, com a queda de seu preço até o início da Primeira Guerra Mundial (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Evolução do preço do cimento Portland nos Estados Unidos entre 1893 e 1913 – preços médios para todo o país, em centavos de dólar por barril



Fonte : Dorfman (2003, p. 20).

Argumenta Dorfman (2003, pp. 23-24) que a diferença de velocidade com que ocorreu a substituição dos fornos verticais pelos fornos rotatórios nos Estados Unidos e na Europa é representativa da diferença nas condições de industrialização num contexto e noutro. Os Estados Unidos eram um mercado unificado em expansão acelerada, com abundância de capitais e matérias-primas, por um lado, e escassez de mão de obra, por outro, condições ideais para a introdução de um recurso técnico-industrial de alto rendimento e de alto consumo de energia. Por sua

vez, cada país europeu constituía-se em um mercado relativamente fechado e pequeno, com abundância de mão de obra e escassez relativa de capitais e matérias-primas. Além disso, os Estados Unidos eram recém-chegados ao processo de industrialização, condição adicional que lhes permitia adotar o que havia de mais desenvolvido no setor industrial, ao contrário da Europa, que teve que realizar um processo de substituição de equipamentos instalados e de conhecimentos adquiridos.

O considerável aumento nos volumes de produção do cimento moderno (Portland) e a redução de custos e de preços correspondentes forneceram as condições para a difusão do cimento Portland e de suas técnicas construtivas no mundo, com os Estados Unidos consolidados na liderança do setor no século XX (ibid.).

A superioridade do cimento Portland⁴⁰ dizia respeito ao fato de a argamassa feita com ele ser muito superior em resistência e durabilidade a qualquer outro tipo de argamassa comumente usada na construção na época, tornando fixa a ideia de que não havia nenhuma possibilidade de se produzir um cimento ainda melhor (RANKIN, 1916, pp. 753-754). A ponto de fazer com que o valor das investigações teóricas sobre o cimento fosse diminuído, na medida em que elas fizeram pouco progresso por um tempo após as investigações de Vicat (ibid.). Segundo Rankin (1916, p. 748), o contínuo desenvolvimento da qualidade do cimento Portland neste período foi promovido quase inteiramente pelo desenvolvimento dos equipamentos mecânicos e dos métodos industriais usados na fabricação do produto, devendo muito pouco a novas ideias sobre como fabricar cimento Portland com base no conhecimento do que ele realmente era (ibid.).

Esse desenvolvimento tecnológico dos equipamentos mecânicos e dos métodos industriais usados na fabricação do cimento moderno não será tratado neste trabalho de dissertação, pois foge do escopo de seus objetivos, limitado

⁴⁰ Pelo exposto nesta seção, fica patente que esta superioridade do cimento Portland em relação aos cimentos naturais então produzidos é relativa ao tipo de desenvolvimento socioeconômico perseguido pelos países europeus e, posteriormente, pelos Estados Unidos, desde a Revolução Industrial na Inglaterra, isto é, um desenvolvimento calcado na progressiva industrialização e urbanização desses países, no qual a qualidade de vida das populações é vista como um corolário do desenvolvimento industrial e econômico dos países. Nos termos do modelo teórico de referência, este desenvolvimento socioeconômico pode ser analisado como decorrente das perspectivas de valor do progresso tecnológico e do capital e mercado. Neste quadro histórico e social, o cimento Portland e o concreto feito com ele são materiais construtivos com as características mais adequadas e almejadas para se construir as edificações e infraestruturas requeridas pelas formas de vida nas grandes cidades.

estritamente a expor neste capítulo os episódios mais marcantes historicamente das pesquisas tecnocientíficas relacionadas aos aglomerantes hidráulicos que desembocaram na produção e uso do cimento moderno. Vale como registro dizer que esse desenvolvimento tecnológico de equipamentos e processos industriais conseguiu obter, por um lado, um produto padronizado, com características finais pré-definidas que assegurassem a qualidade construtiva, e, por outro, objetivou aumentar a produtividade e competitividade de seus processos e produtos, com o correspondente aumento da produção de cimento Portland e diminuição de seus custos.

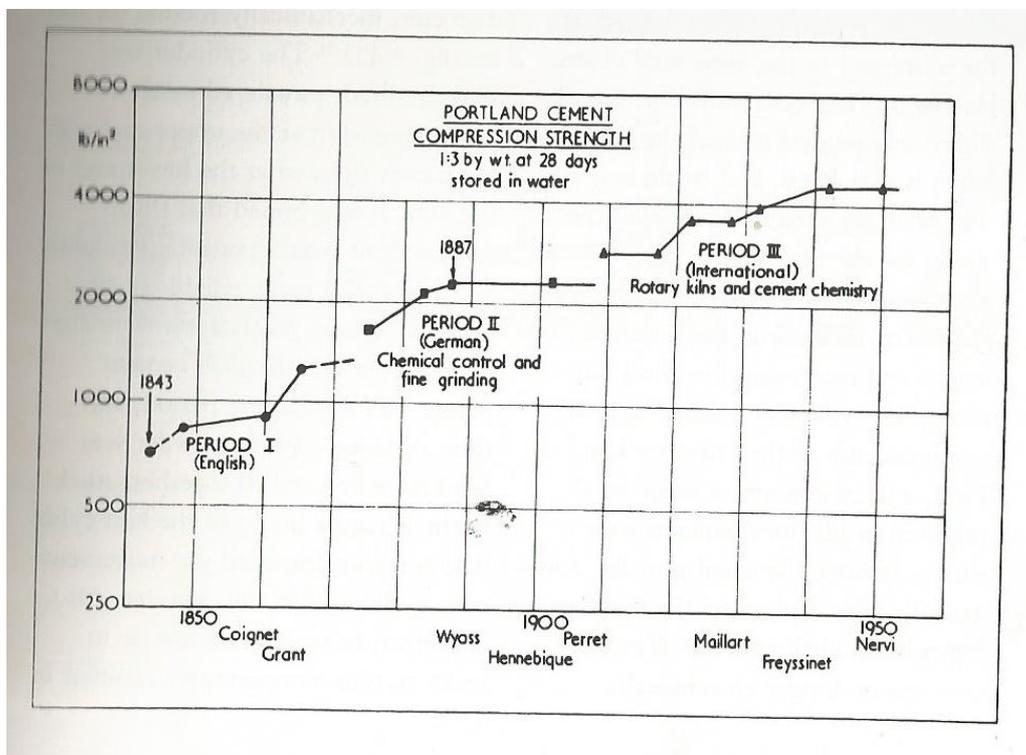
A constatação de Rankin de que o desenvolvimento do cimento Portland no período após as pesquisas de Vicat até o começo do século XX está principalmente associado ao desenvolvimento tecnológico da indústria cimenteira é também respaldada pelas especificações quanto à formulação e modo de produção do cimento artificial por duas associações técnicas no começo do século XX. A Associação dos Produtores Alemães de Cimento Portland especificava que as matérias-primas deveriam ser intimamente moídas, calcinadas a uma temperatura de clinquerização e reduzidas a uma finura adequada, sendo que o produto deveria conter, no mínimo, 1,7 partes de cal, em peso, para cada parte de sílica, alumina e óxido de ferro, além de que seu peso específico não deveria ser maior do que 3,10. Já, o Corpo de Engenheiros Oficiais do Exército dos Estados Unidos estipulava o cimento Portland como um produto obtido da calcinação próxima à fusão incipiente de misturas íntimas, naturais ou artificiais, de substâncias calcáreas e argiláceas, sendo que o produto resultante deveria conter 1,7 vezes mais cal do que os materiais que conferiam propriedades hidráulicas, em peso, ser finamente pulverizado após a calcinação e não conter mais do que 2% de adições ou substituições com o único propósito de regular certas propriedades do produto final (SABIN, 1907, pp. 4-5).

Numa expressão resumida do que foi exposto até aqui, podemos definir o cimento Portland como o produto resultante da mistura artificial de materiais calcáreos com materiais argiláceos, queimada numa temperatura de fusão incipiente, que produz clínquer, moído mecanicamente até se transformar num pó fino. Ele não se deteriora em nenhuma extensão apreciável em contato com o ar, mas endurece em contato com a água, sendo que a argamassa feita com ele, ao

endurecer, fissura muito menos que os outros tipos de argamassas (MOORE, 1947, p. 286).

A clinquerização da mistura de calcário e argila nos fornos a partir de temperaturas acima de 1400°C, a análise química sistemática das matérias-primas usadas na fabricação de cimento, o aumento da proporção do calcário na mistura, o controle do tamanho máximo dos grãos de clínquer e o aperfeiçoamento dos fornos, que aumentou a uniformidade de calcinação do cimento, foram fatores que fizeram a resistência à compressão do cimento Portland aumentar progressiva e continuamente desde 1850 (Gráfico 3) (ELLIOTT, 1992, pp. 156-158).

Gráfico 3 – Evolução da resistência à compressão do cimento Portland de 1850 a 1950, na qual três períodos de desenvolvimento são demarcados – sua fabricação artesanal na Inglaterra, sua produção mais qualificada na Alemanha, com a introdução da análise química qualificada das matérias-primas, e sua produção avançada no mundo, com a introdução do forno rotatório e das técnicas e conhecimentos advindos da química do cimento



Fonte: Elliott (1992, pp. 156-157).

Um novo salto qualitativo na fabricação do cimento será dado com o avanço nos conhecimentos relativos à sua composição química e ao papel dos seus compostos químicos no que diz respeito às suas propriedades hidráulicas, temas da próxima seção.

2.11 Estudos relativos à composição química dos constituintes do cimento

Portland

Os antigos acreditavam que a calcinação do calcário expelia o ar e a água contidos nele, sendo que sua recombinação com o ar e a água devolvia sua firmeza original. Essa concepção foi mantida até o século XIX com pequenas modificações. Johann Nepomuk Von Fuchs (1774-1856), num documento publicado pela Academia de Ciências de Hague, em 1832, defendeu que a calcinação dissociava a argila e o calcário, de modo que a sílica da argila era trazida para uma condição na qual poderia se recombinar com o calcário quando à cal era adicionada água. Georg Feichtinger sustentou a posição de Fuchs, desenvolvendo-a ao especular que a sílica e cal livre, formadas após a calcinação, fixavam a água no processo de endurecimento da cal e, em seguida, combinavam-se entre si, sendo que a cal livre hidratada restante dessas reações químicas combinava-se com o gás carbônico do ar (BOGUE, 1947, pp. 44-45).

Louis-Édouard Rivot (1820-1869) e Chatonney foram os primeiros a sugerir que a hidráulidade do cimento era causada pela formação de sais hidratados de silicato de cálcio, aluminato de cálcio e sílico-aluminato de cálcio, sob a ação da água, em 1856 (*ibid.*). Rivot, que substituiu Pierre Berthier (1782-1861) como professor de ensaios na Escola de Minas (*École des Mines*), continuou suas pesquisas sobre os compostos formados durante a calcinação de cal e argila para produzir cimentos. Berthier, que logo após a publicação das pesquisas de Vicat, as repetiu e as confirmou, buscou determinar a composição do silicato de cálcio formado durante a calcinação do cimento, calcinando no laboratório misturas de sílica (SiO_2) e cal (CaO) e usando a solubilidade da cal livre para separá-la do composto formado. Esse método não permitia um resultado certo, levando a

assinalar três diferentes fórmulas ao silicato de cálcio⁴¹ (LE CHATELIER, 1905, pp. 42-44). Rivot chegou a estabelecer que durante a calcinação do cimento dois compostos se formavam – $\text{SiO}_3 \cdot 3\text{CaO}$ e $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ – sendo que a pega e o endurecimento do cimento seriam o resultado da hidratação desses compostos, formando $\text{SiO}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ e $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (ibid.). Le Chatelier nos informa que essa teoria de Rivot era a mais aceita quando da publicação de sua tese, mas, segundo sua avaliação, ela era uma mera hipótese que devia seu valor ao nome de seu autor (ibid.).

As razões para isto estavam relacionadas às carências do método experimental seguido por Rivot, similar ao de Berthier, com a diferença de que aquele o aplicou aos cimentos comerciais da época, enquanto este o aplicou aos produtos calcinados ou aos produtos endurecidos em laboratório. Se, por um lado, Rivot evitou o inconveniente de analisar compostos incompletamente formados, já que em condições laboratoriais era impossível obter por calcinação os produtos da combinação integral de sílica e cal obtidos de sua queima nos fornos de cimento, por outro lado, ele teve que lidar com as dificuldades relativas à enorme variedade de minerais que geralmente ocorrem em argilas e calcários usados industrialmente. Além disso, os experimentos não podiam ser conclusivos devido à decomposição parcial e progressiva dos silicatos de cálcio na água, de modo que os resultados da análise química da composição do cimento variavam em função do tempo de lavagem das amostras ensaiadas (ibid.).

Dez anos depois, Edmond Fremy (1814-1894) publicou um famoso artigo no qual reivindicou ter produzido uma variedade de silicatos de cálcio, aluminatos de cálcio e duplos silicatos de cal e alumina (BOGUE, 1947, pp.44-45). Partindo do trabalho de Rivot, Fremy buscou verificar sinteticamente a precisão de uma teoria baseada exclusivamente no uso do método analítico. Ele falhou completamente em reproduzir um silicato de cálcio que se estabelecesse em contato com a água, mas foi bem sucedido neste quesito com relação ao aluminato de cálcio (LE CHATELIER, 1905, p. 44). Por isso, ele especulou que os silicatos não tinham propriedades hidráulicas, mas que os aluminatos tinham. Como resultado de seus experimentos, Fremy acreditava que o cimento Portland continha aluminatos e silicatos de cálcio, duplos silicatos de cal e alumina, além de cal livre, sendo que a hidratação do

⁴¹Berthier obteve, para o silicato de cálcio a fórmula $\text{SiO}_3 \cdot \text{CaO}$; Rivot, $\text{SiO}_3 \cdot 3\text{CaO}$; e Landrin, $\text{SiO}_3 \cdot 2\text{CaO}$.

cimento consistia na hidratação dos aluminatos e nas reações da cal livre hidratada com os silicatos e os duplos silicatos (BOGUE, 1947, pp.44-45). Essa teoria foi muito contestada pelo fato de as melhores cales hidráulicas da França não conterem mais do que 2% de alumina. Fremy foi bem sucedido, num trabalho posterior, em obter silicatos de cálcio que, apesar de não se estabelecer em contato com a água, o faziam na presença de cal em excesso, comportando-se como pozolanas, concluindo que a sílica nos cimentos formaria silicatos ao reagir com a cal livre (LE CHATELIER, 1905, p. 45).

Sendo assim, havia três tipos de teorias sobre a constituição do clínquer na segunda metade do século XIX (ibid.):

- a) o clínquer consistia numa mistura de cal anidra e sílica, que se combinavam na presença de água;
- b) a cal e a sílica combinavam-se no processo de clinquerização, formando silicatos de cálcio, além de restar do processo cal livre;
- c) o clínquer consistia de aluminato de cálcio, silicatos e cal livre.

Essas teorias eram os resultados de análises químicas sobre os cimentos comercializados, seus produtos de hidratação e os produtos resultantes da dissolução desses cimentos em soluções variadas. Esses resultados sobre os constituintes do cimento eram contraditórios, de modo que quaisquer dessas teorias careciam de uma aceitação geral (BATES, 1922, p. 292).

Pode-se dizer que, segundo o modelo laceyano, as atividades científicas relacionadas às investigações sobre os constituintes químicos da cal hidráulica e do cimento, bem como sobre as reações de hidratação desses compostos, careciam, até este momento, de uma estratégia fecunda de restrição e seleção, isto é, uma estratégia de pesquisa capaz de gerar crescentemente dados, procedimentos empíricos e teorias que, combinados, manifestassem os valores cognitivos no mais alto grau e os padrões mais rigorosos de avaliação disponíveis. Ao contrário, as estratégias de pesquisa adotadas pelos pesquisadores retornavam teorias e dados empíricos contraditórios. Faltavam no campo de investigação da química do cimento procedimentos experimentais exemplares, que retornassem, a cada vez que fossem replicados, dados empíricos consolidados, intersubjetivamente aceitos pelos membros da comunidade científica, que apontassem para a comunidade de

pesquisadores, segundo os mais altos padrões de avaliação disponíveis no campo de pesquisa, para o valor cognitivo de uma das teorias ou hipóteses sob disputa para o domínio de fenômenos investigado. Sendo assim, segundo o modelo laceyano, essas pesquisas, apesar de almejarem a imparcialidade, não eram capazes de atender ao grau demandado por este ideal regulador da atividade científica. Por isso, as teorias geradas não eram aceitas por unanimidade pela comunidade científica voltada ao tema da química do cimento.

Essas investigações sobre a química do cimento, decorrentes da tradição de pesquisa que se delineava e se desenvolvia desde Smeaton até Vicat, foram realizadas segundo os procedimentos metodológicos das análises e sínteses químicas à disposição, balizados pelos conceitos e leis da química moderna em vigor, que guiavam esses experimentos, como a lei da conservação da matéria. Elas levaram à formulação de teorias e hipóteses acerca das estruturas, seus componentes e suas leis, subjacentes aos fenômenos investigados (calcinação, hidratação e endurecimento dos cimentos), derivadas do léxico da química moderna, marcadamente formado por categorias quantitativas e mecanicistas (teoria atômica de Dalton). Por isto, os dados empíricos requeridos para serem postos em contato com essas teorias ou hipóteses deveriam dizer algo sobre a natureza quantitativa de suas categorias (fórmulas químicas dos compostos e análise quantitativa das reações químicas desses compostos com a água e o ar). Por essas características teórico-metodológicas, essas investigações especulativas em voga na época de Le Chatelier foram conduzidas segundo estratégias de restrição e seleção de tipo materialista ou descontextualizador, segundo o modelo teórico de referência (LACEY, 2010, pp. 67-68), vindas do campo da química moderna. Apesar da fecundidade dessas estratégias no campo mais geral da química, vemos no breve relato acima, que elas não se mostravam igualmente fecundas para o campo mais particular da química de cimentos, no qual buscaram investigar as possibilidades abstraídas dos fenômenos da calcinação e hidratação do cimento, independentemente de sua aplicação nos contextos industriais, econômicos e sociais. Essas estratégias precisarão ser desenvolvidas com a incorporação de procedimentos metodológicos pioneiros, como veremos a seguir, para se tornarem fecundas e gerarem teorias aceitas segundo a imparcialidade.

Como vimos uma estratégia específica restrições sobre as teorias vistas como admissíveis de considerações provisórias por uma comunidade científica e,

consequentemente, de eventual aceitação e, reciprocamente, critérios para os tipos de dados empíricos e de fenômenos a partir dos quais eles são obtidos por mensuração e observação, selecionados como adequados para o teste das teorias. Sendo assim, existem dois momentos claros e distintos de escolha no âmbito da metodologia de pesquisa científica: a escolha da estratégia a ser adotada nas práticas de pesquisa; e a escolha entre teorias provisoriamente consideradas que se ajustam às restrições da estratégia adotada. A escolha entre teorias ou hipóteses envolve juízos sobre qual delas manifesta em mais alto grau os valores cognitivos à luz dos dados empíricos disponíveis, sobre serem os dados disponíveis suficientes e sobre ser o grau de manifestação dos valores cognitivos bastante elevado para a aceitação da teoria com relação aos domínios relevantes de fenômenos (LACEY, 2010, pp. 66-67). No atual cenário em pauta, falta para o campo de pesquisa da química do cimento a estratégia capaz de gerar a teoria amplamente aceita.

A conclusão de Le Chatelier sobre o estado do conhecimento sobre os constituintes do cimento anteriormente à sua tese era de que os únicos fatos estabelecidos eram (LE CHATELIER, 1905, p. 46, tradução nossa):

A produção, durante a calcinação de cimentos e cales hidráulicas, de compostos de cal com sílica, e provavelmente com alumina, que possuem a propriedade de endurecer em contato com a água, sem qualquer conhecimento certo sobre a natureza desses compostos ou da ação da água.

Tendo em vista as limitações e dificuldades desses estudos químicos anteriores sobre a natureza dos compostos dos cimentos, Henri Le Chatelier (1850-1936) buscou estudar do ponto de vista químico e mineralógico os diversos compostos de cal com sílica, alumina etc., para determinar suas características e, assim, tentar reconhecê-los nos cimentos e cales hidráulicas (LE CHATELIER, 1905, p. 47). Ele percebeu que a análise química revelava muito pouco da natureza dos compostos formados durante a fusão e a cristalização do clínquer. Ele foi o primeiro a aplicar o microscópio consistentemente para elucidar os constituintes do cimento Portland. Ele usou o microscópio de luz polarizada como meio para identificar as fases cristalinas do clínquer. Além disso, seu procedimento científico incluiu também a preparação sintética dos compostos que ele acreditava haver identificado no clínquer (BOGUE, 1947, pp. 46-47).

Em seus artigos mais antigos, anteriores à sua famosa tese de 1887 (“Pesquisas experimentais sobre a constituição de argamassas hidráulicas”), Le Chatelier sustentou que o ortossilicato ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) era o principal, talvez o único, constituinte hidráulico do cimento Portland (ibid.). Esse composto era de especial interesse para Le Chatelier, pois ele apresentava a propriedade da desintegração espontânea, ou seja, o material formado por ele se transformava naturalmente em poeira com o tempo, perdendo sua consistência, notada pela primeira vez, em 1827, por Sefstroms (BATES, 1922, p. 292). A explicação de Le Chatelier para o fenômeno baseou-se na sua observação de cristais gêmeos no clínquer, cuja contração diferenciada de suas faces opostas durante o processo de resfriamento deveria ser a responsável pela desintegração observada (BOGUE, 1947, p. 46).

Num artigo posterior, Le Chatelier reportou que o ortossilicato não exibia propriedades hidráulicas, tendo verificado que uma pasta feita com o composto não exibia qualquer resistência após seis meses de sua preparação. Por isso, em sua tese, ele atribuiu ao dissilicato um papel negligenciável entre os outros constituintes descobertos no clínquer. Entre esses constituintes, predominava na análise química dos clínqueres bem calcinados que originavam cimentos de boa qualidade a proporção de cal e sílica para formar o silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$). Por isso, Le Chatelier passou a acreditar que o silicato tricálcico era o constituinte hidráulico principal do cimento Portland (ibid.).

Ao preparar seções finas de clínquer para serem observadas no microscópio de luz polarizada, ele descreveu os seguintes constituintes (BOGUE, 1947, pp. 47-48):

- a) cristais sem coloração, com refração dupla fraca, seções transversais quadradas ou hexagonais, em grande abundância;
- b) entre esses cristais, uma massa arredondada, de coloração escura, com refração dupla mais forte, sem contornos cristalinos;
- c) além desses dois constituintes principais, elementos acessórios eram frequentemente encontrados, variando de amostra para amostra, com destaque por sua presença quase constante a formas de seções cristalinas análogas à fase mais abundante, mas com coloração indo do amarronzado ao amarelado.

O estudo de Le Chatelier sobre os constituintes do clínquer de cimento Portland permitiu que ele chegasse à seguinte conclusão (BOGUE, 1947, p. 48, tradução nossa):

Este estudo químico de cimentos Portland calcinados apresenta, assim, que eles são formados essencialmente por um silicato de cálcio com pouca diferenciação da fórmula $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, sendo este o elemento ativo do endurecimento, que é produzido por sua precipitação química no meio de silicatos duplos derretidos, que agem como veículos para a combinação da sílica com a cal, mas que se mantêm sensivelmente neutros durante o endurecimento.

A despeito de sua conclusão, a existência do trissilicato no cimento não foi provada definitivamente por causa das suas tentativas infrutíferas para produzi-lo sinteticamente. Ao aquecer cal e sílica na proporção adequada para obter o composto, Le Chatelier obteve apenas uma mistura de silicatos de cálcio e cal livre. O pesquisador francês alegou ter produzido o trissilicato a partir da decomposição do clorossilicato por meio de vapor de água a uma temperatura acima de 450°C . No entanto, a reação de decomposição estabelecida por Le Chatelier era incompleta⁴² e o produto obtido dela não podia ser estudado ao microscópio por parecer amorfo, apesar dele parecer ter as propriedades de pega e de endurecimento similares às do cimento Portland (BOGUE, 1947, p. 47). Segundo o próprio pesquisador francês :

[...] sua tese não permitiu a formulação de conclusões capazes de resolver em definitivo o problema da constituição do cimento, mas fez conhecer um largo número de fatos novos que devem servir para estabelecer no futuro uma teoria completa sobre as argamassas hidráulicas (LE CHATELIER, 1905, p. 46, tradução nossa).

O reconhecimento dos achados de Le Chatelier ficou registrado no prefácio do tradutor à versão em inglês de sua tese de doutorado, publicada em 1905, onde Joseph Lathrop Mack declara que :

[...] seu trabalho clássico se sobressai hoje como o primeiro, o mais completo e bonito trabalho sobre a química do cimento Portland, e desde que a versão original não é facilmente obtida e todo o trabalho subsequente no assunto volta-se a essa tese, pensei que ela deveria estar disponível para todos os que se interessam pela manufatura e uso do cimento Portland (LE CHATELIER, 1905, p. V, tradução nossa).

Dois anos após a morte de Le Chatelier, Bogue prestou a seguinte homenagem ao pesquisador francês, hoje considerado o “pai da química do

⁴² $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{CaCl} + \text{H}_2\text{O} = 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + 2\text{HCl}$.

cimento”, no Segundo Simpósio sobre a Química dos Cimentos (BLEZARD, 1998, p. 2, tradução nossa):

Por meio de estudos químicos e microscópicos ele demonstrou que o clínquer contém um número de diferentes minerais, entre os quais o silicato tricálcico é o responsável por suas propriedades hidráulicas. Ele também demonstrou que o gesso, os aluminatos cálcicos e o cimento Portland obtém sua pega através do processo de cristalização a partir de soluções supersaturadas. Ele foi um dos homens que acreditou que não podemos inteligentemente controlar os processos industriais antes de conhecermos a natureza das coisas com as quais lidamos.

Ao introduzir o microscópio para o estudo dos constituintes do cimento, Le Chatelier deu mais um passo em direção à consolidação de uma estratégia de pesquisa no campo da química do cimento (conforme aponta Mack acima), que tinha por objetivo teórico entender mais aprofundadamente a natureza dos compostos químicos dos cimentos, suas propriedades e suas reações com a água, e por objetivo prático determinar e controlar a formação desses compostos, controlando, assim, as propriedades dos cimentos e, dessa forma, contribuir para o desenvolvimento tecnológico desse material (objetivos que podem ser depreendidos da homenagem de Bogue transcrita acima). Vemos, assim, que, apesar de metodologicamente a pesquisa sobre os constituintes do clínquer, realizada por Le Chatelier, ser feita dentro das restrições de uma estratégia descontextualizadora (descrição dos constituintes do clínquer e dos fenômenos relacionados à sua formação durante a calcinação e à formação de compostos hidratados durante seu endurecimento por meio da análise de amostras sob o microscópio), tal como fizeram seus predecessores no campo, ela mantém vínculos com seu contexto prático, uma vez que existe a esperança de que o entendimento teórico gerado tenha enorme potencial de ser aplicado na indústria cimenteira em desenvolvimento (esperança concretizada, uma vez que houve sua aplicação em processos industriais de fabricação de cimento comercial, como atestado no Gráfico 3). Esse vínculo da pesquisa teórica sobre o cimento com seu contexto tecnológico corrobora uma das teses centrais do modelo laceyano das interações entre as atividades científicas e os valores – a tese de que as pesquisas científicas puras mantêm relações mutuamente reforçadoras com o desenvolvimento tecnológico de seus objetos (LACEY, 2010, pp. 26-27).

Segundo Lacey (2008, pp. 172-174), na pesquisa conduzida pelas estratégias descontextualizadoras, os dados são obtidos tipicamente a partir dos fenômenos

observados no decorrer de práticas experimentais, que são práticas exemplares de controle. Existe, assim, a expectativa lógica de que sejamos capazes de generalizar essas práticas exemplares de controle para outras práticas de controle, como as práticas tecnológicas.

Apesar de estarem inseridas no interior de práticas de controle e serem produtos da ação intencional humana, as práticas experimentais descrevem os fenômenos materialisticamente (no caso em pauta: descrição dos fenômenos que ocorrem durante a calcinação e hidratação de cimentos em condições laboratoriais controladas, independentemente de seu contexto de aplicação), com a intenção humana interrompendo-se com a fixação das condições de contorno e com o estabelecimento das condições iniciais dos experimentos. Isto possibilita que os fenômenos de interesse sejam descritos por categorias isentas de valor, normalmente quantitativas, e sejam explicados satisfatoriamente em função de uma ordem subjacente (foco nas possibilidades abstraídas dos fenômenos estudados, como, no caso em pauta, as fórmulas químicas explicativas das reações químicas de formação dos compostos da calcinação e hidratação do cimento). A intencionalidade por trás desse procedimento metodológico reaparece quando o entendimento gerado a partir dele é generalizado para fenômenos similares em espaços naturais (como a combustão espontânea entre o calcário e o xisto formando jazidas naturais de compostos cimentícios) e tecnológicos (sua aplicação nos processos industriais de fabricação de cimento). Sendo assim, o experimento situa-se entre os espaços tecnológico e natural, proporcionando a ambos uma base para generalizações, um modelo do como as coisas são e um contexto para testes críticos das teorias e hipóteses (no caso em pauta, os ensaios não conclusivos de Le Chatelier). No experimento, alcançamos a identificação e a confirmação dos poderes da natureza dos quais podemos dispor para exercer controle sobre as coisas. Dessa forma, o entendimento obtido por meio da ciência moderna, caracterizada essencialmente como prática experimental, é um entendimento dos objetos do mundo na medida em que esses podem ser apreendidos na perspectiva das práticas de controle, razão pela qual o entendimento da ciência moderna tem afinidades recíprocas com o desenvolvimento tecnológico e outras práticas de controle (ibid.).

Dez anos após a publicação da tese de Le Chatelier, Alfred Elis Tornebohm (1838-1911), sem conhecer essa tese, identificou quatro constituintes cristalinos e um constituinte vítreo isotrópico, sem cor, quase sempre presente no clínquer. A substância mais abundante encontrada consistia de cristais sem cor, de fraca birrefração, de formato retangular ou hexagonal, denominada alita. A celita foi caracterizada como um magma a partir do qual a alita se separava em cimentos bem calcinados, e como bastões em clínqueres não devidamente calcinados, de cor amarelo-alaranjado escuro e com forte birrefração. Pequenos grãos arredondados sem forma cristalina definida, com cor amarelada e frequentemente estriada, foram denominados de belita. Já os grãos, frequentemente arredondados e, algumas vezes, alongados, usualmente estriados perpendicularmente ao seu alongamento, com forte birrefração, encontrados em quantidades variáveis, podendo estarem completamente ausentes, foram chamados de felita (BOGUE, 1947, pp. 48-49).

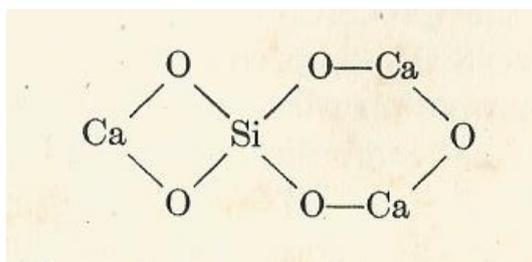
Apesar de ser possível encontrar uma concordância entre as classificações microscópicas de Le Chatelier e de Tornebohm quanto aos constituintes do cimento, eles não chegaram às mesmas conclusões quanto à constituição química dessas substâncias. Vimos que Le Chatelier considerou o $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ como o principal constituinte hidráulico do cimento, a partir de considerações teóricas e de seus estudos sobre a composição de nódulos parecidos com cimento obtidos de cales hidráulicas (*grappiers*). Por sua vez, Tornebohm acreditava que a alita era um composto complexo. Por meio da separação dos constituintes do cimento por meio de líquidos de alta massa específica, Tornebohm conseguiu separar a alita da celita, mas reconheceu que a separação não foi completa. Assumindo que 10% de celita permanecia, ele deduziu a composição da alita como 19,48% de SiO_2 , 7,83% de Al_2O_3 , 67,60% de CaO , 3% de MgO , 0,9% de Na_2O e 1,19% de K_2O . Assumindo que o MgO e os álcalis desempenhavam a mesma função do CaO na mistura e substituindo suas proporções equivalentes, Tornebohm chegou à seguinte fórmula para a alita: $9(3\text{CaO}.\text{SiO}_2) + 9\text{CaO}.2\text{Al}_2\text{O}_3$ (ibid.).

No período entre 1895 e 1900 diversos investigadores conduziram experimentos com os quais eles chegaram à conclusão de que a cal livre estava presente em grandes quantidades no clínquer de cimento Portland. A maioria dessas investigações estava voltada para estudar os fenômenos da hidratação, pega e endurecimento do cimento, sendo as conclusões relacionadas com a constituição do clínquer mais ou menos incidentais (BOGUE, 1947, pp. 50-52).

Zulkowski acreditava que o clínquer era uma mistura de cal livre e de duplo silicato de cal e alumina ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$). Este composto ternário foi chamado por ele de hidraulita, sendo por ele associado a alita de Tornebohm. Hart reportou 30% de cal livre no clínquer numa solução alcoólica de iodine, acreditando que essa cal era o agente ativo do endurecimento. Outros métodos empregando soluções aquosas foram usados, a despeito da admoestação de Michaelis de que os reagentes usados não podiam trazer resultados exatos e do relatório de Rohland de que a prova quantitativa da existência ou não da cal livre ou do hidróxido de cálcio não podia ser obtida por meio puramente químicos (BOGUE, 1947, pp. 50-52).

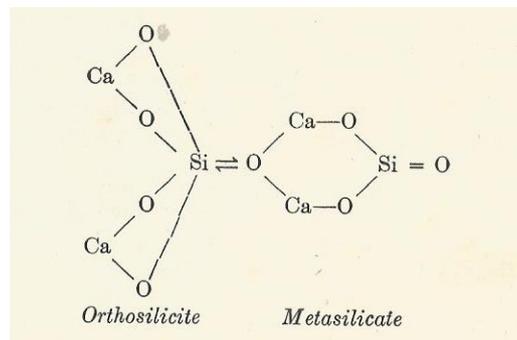
Por meio do exame microscópico e da avaliação dos efeitos trazidos pela presença da cal livre no cimento, Meyer concordou com Le Chatelier de que não havia evidências da existência de cal livre no cimento anidro devidamente calcinado. Ele apontou que a molécula de $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, com fórmula estrutural proposta representada na Figura 2, tinha a capacidade de se combinar com a molécula de água (anidrido), conferindo ao cimento suas propriedades hidráulicas. Meyer explicou a desintegração espontânea do silicato dicálcico devido à passagem de sua forma estrutural estável a altas temperaturas (metassilicato), como a temperatura dos fornos de cimento, para sua forma estrutural instável em mais baixas temperaturas (ortossilicato) – Figura 3. Segundo Meyer, a rapidez com a qual o cimento era esfriado determinaria se o silicato dicálcico se desintegraria ou não (ibid.).

Figura 2 – Fórmula estrutural assinalada por Meyer para o composto silicato tricálcico



Fonte: Bogue (1947, p. 51).

Figura 3 – Fórmulas estruturais assinaladas por Meyer para o composto silicato dicálcico



Fonte: Bogue (1947, p. 51).

J.W.Cobb conduziu uma série de experimentos sobre as reações entre silicatos e aluminatos, em 1910. Usando como matérias-primas os óxidos, carbonatos e sulfatos, ele estudou sistemas binários, ternários e quaternários dos componentes CaO , Al_2O_3 , SiO_2 e Na_2O . Essas misturas eram aquecidas em várias temperaturas por variados períodos de tempo, sendo que as combinações eram determinadas por meio da solubilidade dos compostos em soluções de carbonato de sódio e de ácido clorídrico. Ele descobriu por meio desses experimentos que a reação entre o CaO e o SiO_2 começava em torno de 800°C , sendo que misturas ricas em SiO_2 formavam $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ e misturas ricas em CaO produziam $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. Compostos de alumina deveriam também ser formados dependendo da composição original da mistura (BOGUE, 1947, pp. 50-52).

Como vimos, os procedimentos de análise química e petrográfica desde Le Chatelier, apesar de fazerem avançar o conhecimento sobre a química dos cimentos, não foram suficientes para dirimir as dúvidas relacionadas às hipóteses avaliadas (controvérsia em torno da composição química da alita e sobre a presença ou ausência de cal livre no clínquer), muito menos para sustentarem empiricamente uma teoria geral sobre a constituição dos cimentos e suas reações químicas de hidratação. Apesar de já estarem assinalados os principais componentes do clínquer, perdurou até o começo da década de 1910 a controvérsia sobre os compostos presentes no cimento e suas propriedades físicas e mecânicas ao tomarem curso as reações de hidratação. Como veremos faltava a essas pesquisas um elemento metodológico crucial, capaz de aglutinar os resultados disparatados e contraditórios que vinham sendo obtidos. Será este elemento metodológico o

responsável por inaugurar no campo da química de cimentos estratégias fecundas e úteis de restrição e seleção.

2.12 Programas experimentais sobre a constituição química do cimento

Portland

A expectativa de que a pesquisa científica pura sobre os constituintes do cimento Portland gerasse seu desenvolvimento tecnológico transparece em trecho do artigo de George Rankin sobre o estado da arte do entendimento sobre o material. Segundo Rankin (1916, pp. 755-757), a determinação dos componentes formados na calcinação do cimento Portland era essencial para melhorar suas qualidades construtivas, já que se sabia que suas propriedades eram principalmente decorrentes da presença de três óxidos (CaO , Al_2O_3 e SiO_2). Sabia-se que a cal, a alumina e a sílica, que constituíam, em média, mais de 90% dos cimentos Portland, em proporções adequadas, determinavam as propriedades de bons cimentos Portland, sendo que as misturas de outros óxidos exerciam, no limite, apenas uma influência secundária. Sendo assim, conhecendo os produtos formados a partir da cal, alumina e sílica, as propriedades que conferem ao cimento e as condições mais propícias para sua formação, seríamos capazes de controlar, com maior refinamento e num tempo menor do que o requerido por métodos puramente empíricos (nas palavras do pesquisador, métodos menos certos, por se basear em tentativas e erros, demandando, assim, tempo maior para se atingir os objetivos), as propriedades desejadas para o produto em cada uma de suas possíveis aplicações (ibid.).

As várias substâncias sólidas formadas no clínquer a partir de cal, alumina e sílica foram determinadas no Laboratório Geofísico da Instituição Carnegie em Washington, por volta do ano de 1910, no curso de uma investigação sistemática de todos os componentes formados quando qualquer mistura desses três óxidos é aquecida em altas temperaturas (ibid.). O sucesso do empreendimento experimental deveu-se à estratégia usada de baseá-lo no princípio da regra de fase, que consiste na aplicação das leis da termodinâmica às condições de um sistema heterogêneo, como o do clínquer em altas temperaturas, para tornar possível definir os compostos ou as fases produzidas na condição de equilíbrio. Essa condição é atingida quando

dois critérios são preenchidos: não se observa mudança no sistema com a passagem do tempo; e tal resultado pode ser observado quando a condição é atingida por outros procedimentos (BOGUE, 1947, pp. 207-208). Dessa forma, o estudo investigativo do Laboratório Geofísico da Carnegie consistiu no aquecimento das misturas sistematicamente variadas de cal, alumina e sílica, em várias temperaturas controladas, até que o estado de equilíbrio fosse atingido. Nesta condição de equilíbrio de fases, foram observadas as características ópticas dos produtos formados e suas relações (RANKIN, 1916, p. 756). Sem a aplicação da regra de fase, o efeito de variações de temperatura, pressão e concentração teria que ser separadamente considerado para cada condição investigada. Com a aplicação da regra a relação entre um largo número de fenômenos previamente não relacionados, que lidavam com mudanças envolvendo diferentes fases, tornou-se clara e inteligível (BOGUE, 1947, p. 207). A regra de fase aplicada ao estudo investigativo da química do cimento era o elemento metodológico que faltava para orientar esse campo de pesquisa. Com ela se consolidaram variadas linhas de pesquisa sobre a química do cimento, que trouxeram um entendimento mais abrangente sobre o material, redundando em sua evolução tecnológica, conforme atestado pelo Gráfico 3. Podemos, assim, dizer que a regra de fase consolidou estratégias descontextualizadoras fecundas e úteis no campo de pesquisa sobre a química do cimento, segundo o modelo teórico de referência.

Foi necessário para os propósitos do estudo experimental em vista que fossem investigadas cerca de 1000 diferentes misturas dos três óxidos, submetidas a 7000 tratamentos térmicos e exames microscópicos dos produtos resultantes. Cada mistura era convertida em pó muito fino e era aquecida num forno elétrico, sendo a temperatura cuidadosamente medida e controlada, até que todas as mudanças cessassem. Nesta condição de equilíbrio, a mistura era rapidamente esfriada e os produtos resultantes eram observados ao microscópio. Esse procedimento possibilitou que fossem determinadas as fases cristalinas presentes nas misturas em temperaturas a partir do início até a completa fusão das misturas (RANKIN, 1916, p. 757).

Segundo os resultados obtidos a partir do procedimento experimental, os compostos formados quando misturas de cal, alumina e sílica, em proporções adequadas para produzir bons cimentos Portland, são completamente fundidas e resfriadas, são o silicato tricálcico, o silicato dicálcico e o aluminato tricálcico. A

ordem de aparecimento desses produtos e suas proporções na mistura podem variar segundo as diferentes composições, mas o resultado final do processo é sempre a presença dos três compostos. No entanto, ao avaliar misturas de cal, alumina e sílica, em proporções satisfatórias para produzir bons cimentos Portland, mas não completamente fundidas (condição real presente na produção do cimento Portland da época do estudo), além dos três compostos principais, dois compostos minoritários apareciam: $5\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ e CaO (RANKIN, 1916, pp. 764-767).

As propriedades ópticas e cristalográficas desses compostos foram estudadas e mostraram-se peculiares e constantes para cada componente individualmente em todas as misturas analisadas. É importante registrar que, exceto o silicato tricálcico, os outros constituintes obtidos não apresentaram qualquer forma cristalina definida, aparecendo como grãos com formatos irregulares e mais ou menos indistintos. No entanto, como foi possível isolar cada um desses grãos para seu estudo sob o microscópio, as propriedades ópticas características deles foram determinadas (RANKIN, 1916, pp. 767-769).

Ao seguir as reações químicas que acontecem quando uma mistura com composição típica de um bom cimento Portland (68,4% de CaO , 8% de Al_2O_3 e 23,6% de SiO_2) é aquecida lentamente, os pesquisadores observaram que, com a liberação do CO_2 (contido no carbonato de cálcio, CaCO_3), a cal combina-se com os outros componentes para formar $5\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ e $2\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2$; na sequência, esses dois compostos combinam-se parcialmente com mais cal, formando os compostos $3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ e $3\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2$, reações facilitadas pela circunstância de que parte da carga aquecida se fundiu, agindo como um fluxo ou solvente. Esse fluxo surge a partir da temperatura de 1335°C e aumenta relativamente com o aumento gradual da temperatura de calcinação, sendo que a taxa de formação do aluminato tricálcico e do silicato tricálcico aumenta correspondentemente. A temperatura de 1650°C é requerida para formar os cristais $3\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ e $2\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2$ num tempo razoável, nas proporções de 45%, 20% e 35%. Enquanto a rapidez das reações para formar esses compostos é governada pela temperatura e pela quantidade de fluxo, essa quantidade de fluxo depende da finura das matérias-primas usadas na fabricação do cimento, na medida em que quanto mais finos os materiais que entram na composição, mais prontamente seus componentes irão se combinar. Por sua vez, a temperatura de fusão do clínquer requerida para promover as reações pode ser

reduzida para 1425°C pela presença de pequenas quantidades de impurezas, como FeO₃ e MgO. Vale registrar que, para o clínquer formado a partir de cal, alumina e sílica, a cal livre estará presente a uma temperatura de 1450°C, mas estará totalmente combinada a uma temperatura de 1650°C (RANKIN, 1916, pp. 770-775).

Segundo Bates (1922, p. 293), as publicações do Laboratório Geofísico em conexão com a investigação do sistema cal-sílica-alumina nos forneceu a real constituição do cimento Portland, cuja justeza das conclusões foi checada várias vezes no curso de trabalhos que incluíram não apenas aquelas composições típicas do cimento Portland, mas também todas aquelas relativas a este sistema ternário. A pesquisa elucidou quase consensualmente os principais constituintes do cimento Portland: os resultados foram aceitos nos Estados Unidos e no exterior, com exceção da Alemanha (BATES, 1922, p. 293). Segundo o que vimos descrevendo, a estratégia foi adotada inicialmente por promover um avanço exemplar no campo da química do cimento (a aceitação quase consensual dos compostos do cimento Portland) e continuou a ser seguida pelos pesquisadores por ter capacitado uma linha de investigação relevante (pesquisas sobre a cinética das reações químicas durante a calcinação, resfriamento, pega e endurecimento do cimento Portland), inaugurando uma tradição científica no campo de pesquisa, ao colocar o conhecimento sobre os cimentos numa base inteiramente nova (HEWLETT, 1998, p. 17).

Para aplicar em larga escala as generalizações feitas em alguns dos primeiros artigos publicados pelo Laboratório Geofísico, o Escritório de Padronização (*Bureau of Standards*) erigiu em Pittsburgh, em 1911, uma planta de cimento experimental, com um aparato completo para moagem e um forno rotatório a gás. Uma série de calcinações com largas variações na composição foram programadas. Depois da calcinação, análises químicas e petrográficas completas foram feitas nas variadas amostras de clínqueres. O clínquer formado era, então, moído e com ele foram feitos corpos de prova cilíndricos (6 cm x 12 cm) de cimento e concreto, rompidos em diferentes períodos de tempo. Essa investigação teve o propósito de mostrar como os vários constituintes do cimento afetavam sua resistência e como as variações desses constituintes influenciavam a resistência do cimento e do concreto (BATES, 1922, p. 294).

As investigações corroboraram as conclusões do Laboratório Geofísico e elucidaram a química do endurecimento: o silicato tricálcico apresentou todas as

propriedades de pega e endurecimento do cimento Portland ordinário; o silicato dicálcico, apesar de endurecer muito vagorosamente, se mantido em contato com a água por um período de duas a três semanas, gradualmente adquire dureza, sendo que, ao final de três ou quatro meses, sua resistência é similar à resistência do silicato tricálcico; e o aluminato tricálcico se hidrata quase instantaneamente sem adquirir qualquer pega ou endurecimento (ibid.).

Com essas conclusões novas questões surgiram: se o silicato tricálcico possuía todas as propriedades do cimento Portland, por que não fabricá-lo na ausência dos outros dois compostos principais? Teriam esses dois compostos funções essenciais na fabricação e uso do cimento Portland?

Segundo o artigo de Bates (1922, pp. 295-296) sobre a aplicação do conhecimento fundamental sobre o cimento Portland para sua manufatura e uso, o silicato tricálcico é obtido como uma fase primária no interior do sistema ternário cal-sílica-alumina, sendo a possibilidade de obtê-lo puro em quantidades e condições de temperatura dos fornos comercialmente vigentes, e ao custo para competir com o preço do cimento Portland, fora de questão. Não foram consideradas na análise as qualidades cimentícias do silicato tricálcico puro, no sentido de se avaliar se justificariam seu maior custo, mas apenas que o produto puro não tinha preço competitivo em relação ao preço do cimento Portland comercializado. Quanto ao silicato dicálcico, Bates relata que misturas de sílica e cal fornecem prontamente esse composto sob temperaturas comercialmente vigentes, sendo que a presença de uma pequena quantidade de alumina é responsável por formar o composto sob uma temperatura mais baixa. Por outro lado, o silicato dicálcico, apesar de sua hidratação lenta, após um mês, adquire resistência equivalente ao silicato tricálcico, com menor consumo de água (em torno de um terço do volume consumido pelo silicato tricálcico), sendo um composto mais estável do que os outros dois silicatos. Por sua vez, o aluminato tricálcico, em razão de sua rápida hidratação, é responsável por quebrar os aglomerados de clínquer e por aumentar discretamente o grau de hidratação dos silicatos. A presença de cal livre no cimento e de gesso, adicionado para regular sua pega, é capaz de reduzir a reação de hidratação do aluminato tricálcico e de dar a este composto algumas qualidades cimentícias (ibid.).

O programa experimental conduzido no forno rotatório do Escritório de Padronização foi importante para mostrar as variações nas quantidades dos

compostos formados no cimento Portland a partir das práticas em voga para sua fabricação e como essas variações afetam as qualidades do produto. No programa a composição de aproximadamente 50 tipos de cimentos foi testada, de modo que o conteúdo do silicato tricálcico variou de um simples traço na composição final até 51% dela, o silicato dicálcico variou de 12 a 74% e o aluminato tricálcico de 14 a 33%. O resultado mais impressionante, segundo Bates (1922, pp. 297-298), foi descobrir que a constituição do cimento nada revela sobre a qualidade final do material se não for considerado, para essa avaliação, o período necessário para seu endurecimento.

O relato de Bates sobre o programa experimental realizado pelo Escritório de Padronização aponta, por um lado, para a fecundidade da estratégia descontextualizadora de restrição e seleção adotada. Como vimos a estratégia teve sucesso em corroborar as principais generalizações feitas pelo programa experimental do Laboratório Geofísico quanto às propriedades hidráulicas dos três principais compostos do clínquer, mas foi além ao mostrar como a variação desses principais compostos altera as qualidades finais do produto. Neste sentido, a estratégia mostrou-se digna de adoção pela comunidade científica por ser fecunda, isto é, por se constituir em fonte de investigações de hipóteses e teorias, que, ao cabo de pesquisas experimentais, se mostram aceitas pela comunidade científica segundo os mais altos padrões científicos de avaliação (LACEY, 2010, p. 70).

Por outro lado, o programa experimental do Escritório de Padronização é um desdobramento do programa experimental do Laboratório Geofísico, no sentido de que aquele objetiva aplicar nos processos industriais de fabricação comercial de cimentos o entendimento teórico gerado a partir deste. Enquanto a relevância das pesquisas do programa experimental do Laboratório Geofísico se associa prioritariamente ao campo científico propriamente dito, ou seja, à solução de problemas teóricos que estimulam as investigações empíricas e sistemáticas (como os problemas da constituição do cimento Portland e dos papéis de cada constituinte nas reações químicas durante a calcinação e endurecimento), a importância das pesquisas do programa experimental do Escritório de Padronização está vinculada aos desenvolvimentos tecnológicos do cimento, advindos da aplicação do entendimento teórico do objeto investigado. Com esses programas, descobrimos, por um lado, os compostos do clínquer que asseguram as propriedades construtivas almejadas pelos fabricantes e consumidores para um bom cimento Portland e, por

outro, como promover seu devido proporcionamento no produto final, de modo a assegurar suas qualidades construtivas superiores, bem como o processo de sua manufatura deve ser conduzido em termos economicamente viáveis. Sendo assim, a adoção das estratégias de restrição e seleção foi respaldada também pela aplicabilidade do entendimento gerado a partir dela por meio das pesquisas realizadas. Como afirma Lacey (2010, p. 77):

Os fenômenos chamam a atenção da investigação científica básica, *não somente* a partir do desenrolar da própria tradição científica (como Kuhn sustenta), mas também a partir do domínio da experiência e da vida cotidianas, e das práticas sociais, isto é, a partir do “mundo em que nós vivemos” – e assim deve ser. A ciência visa prover entendimento dos fenômenos e, assim fazendo, dar sentido a nossas experiências e informar nossas práticas sociais. Estratégias dignas de adoção normalmente deveriam produzir teorias aplicadas a fenômenos significativos para a vida cotidiana atual e aplicáveis em práticas sociais correntes.

A teoria científica em construção sobre o cimento Portland foi aplicada em atividades tecnológicas relacionadas à fabricação e uso do material, com suas proposições informando assuntos práticos, como a avaliação dos índices usados na dosagem dos componentes químicos que entram na composição da mistura como critérios para a predição da resistência à compressão dos cimentos formado a partir dela (BATES, 1922, pp. 299-303). Ela informou que quando a razão molecular entre o silicato dicálcio e o silicato tricálcio for maior que 1,5, a resistência à compressão do concreto formado por este cimento será baixa no primeiro mês, sendo que para se atingir o melhor desempenho neste período ela deve se limitar a 1. Caso seja considerado um período mais longo (cinco anos), esse índice pode chegar a 2, sem comprometer a qualidade final esperada do cimento. Com relação à proporção molecular entre o fluxo (composto formado por aluminato tricálcio e por outros compostos de menor proporção) e o silicato tricálcio, ela não deve nunca ser superior a 1, em qualquer situação (ibid). Com isso, Bates concluiu que 2,33 vezes a porcentagem de sílica iguala a porcentagem de cal em massa nos melhores cimentos Portland, razão similar ao índice de Newsberry (2,5), comumente usado pela indústria para a fabricação de cimento. Como diz este autor (BATES, 1922, p. 303, tradução nossa), « é digno de nota que a investigação puramente científica, conduzida inteiramente do ponto de vista de sua constituição, devesse confirmar as práticas comerciais de manufatura do cimento Portland quanto ao uso atual de

componentes ». Essa teoria foi também aplicada a fenômenos significativos da experiência e da vida cotidianas, como os há muito tempo conhecidos fenômenos de hidraulicidade e endurecimento dos cimentos, sendo utilizada para representar suas categorias e princípios, gerando entendimento sobre eles (LACEY, 2010, p.76).

Por isso, os relatos dos programas experimentais do Laboratório Geofísico e do Escritório de Padronização são apropriados para ilustrar algumas teses centrais do modelo laceyano das interações entre as atividades científicas e os valores. A fecundidade e a utilidade das estratégias de restrição e seleção como condições necessárias e suficientes para sua adoção (LACEY, 2010, p. 77) é uma tese já ilustrada.

Outra tese que parece ser ilustrada pelos relatos é a da dialética entre os desenvolvimentos teórico e tecnológico (LACEY, 2008, pp. 170-171) relacionados ao cimento. Vimos que o entendimento teórico dos constituintes do clínquer e dos processos para sua manufatura foi circunscrito pela perspectiva de seu controle, com vistas ao melhoramento das qualidades construtivas dos cimentos (desenvolvimento tecnológico do cimento), que efetivamente ocorreu com a aplicação do entendimento teórico trazido pelo programa experimental do Laboratório Geofísico pelo programa experimental do Escritório de Padronização (índices de dosagem dos componentes da mistura como critérios para predição da resistência à compressão dos cimentos). Essas investigações e outras na mesma linha de pesquisa trouxeram a evolução das qualidades técnicas do cimento comercial em termos do aumento de sua resistência à compressão, conforme atesta o Gráfico 3, confirmando as relações dialéticas entre o entendimento teórico e o desenvolvimento tecnológico do cimento.

Podemos ainda supor que esse conhecimento teórico em seu desenvolvimento foi circunscrito pelas condições técnicas e tecnológicas vigentes, tanto na indústria de cimento (desenvolvimento dos maquinários e instrumentos de análise, que possibilitou a obtenção de misturas com matérias-primas mais finas, seu proporcionamento mais refinado no momento de carregamento dos fornos e a calcinação mais uniforme dessa farinha com o desenvolvimento dos fornos rotatórios) quanto no campo da química do cimento (o uso do microscópio nos estudos sobre o cimento deu acesso a fenômenos até então desconhecidos, como os relativos à caracterização e formação dos cristais no cimento, a aplicação da regra de fase aos experimentos laboratoriais trouxe inteligibilidade aos resultados

obtidos e o aperfeiçoamento de técnicas de análise química possibilitou uma melhor caracterização dos componentes das misturas). Tal suposição joga luz sobre mais um aspecto das relações mutuamente reforçadoras entre o conhecimento teórico e o desenvolvimento tecnológico do cimento.

Com isso, fazendo um balanço geral da exposição feita neste capítulo, podemos dizer que as relações mutuamente reforçadoras entre o tipo de entendimento científico formado no campo de pesquisa sobre os cimentos (baseado, como vimos, em pesquisas conduzidas sob estratégias descontextualizadoras de restrição e seleção) e os desenvolvimentos técnicos e tecnológicos associados tanto à sua investigação quanto à sua produção e uso (LACEY, 2008, pp. 170-171) foram mostradas na seção e no capítulo.

Num nível mais profundo de reflexão e análise filosófica, podemos dizer que essas relações mutuamente reforçadoras entre as estratégias descontextualizadoras consolidadas no campo da química dos cimentos e a perspectiva de valor do progresso tecnológico dominante nas sociedades industriais avançadas, delimitaram o campo de investigação às possibilidades de controle dos fenômenos, segundo o modelo laceyano (LACEY, 1999, pp. 118-120). No início desta seção, vimos no relato de Rankin a motivação das pesquisas realizadas pelo Laboratório Geofísico: apesar de se constituírem em pesquisas teóricas sobre os constituintes dos clínqueres, seu interesse último era o de obter o controle das propriedades finais dos cimentos Portland a partir do controle da mistura de cal, alumina e sílica e das condições de formação dos compostos do clínquer. Certamente, esse interesse prático no domínio da tecnologia de produção de cimento foi o que motivou a construção de uma planta piloto pelo programa experimental do Escritório de Padronização, que, como vimos, foi um desdobramento em termos aplicados da pesquisa teórica conduzida pelo Laboratório Geofísico.

Por sua vez, pelo viés assumidamente aplicado nessas investigações, podemos conceituá-las como pesquisas tecnocientíficas, tendo em vista que investigação teórica do Laboratório Geofísico sempre conservou a expectativa de ser aplicada, fazendo avançar a tecnologia do concreto. Em retrospectiva, podemos dizer que toda investigação teórica sobre o cimento exposta e analisada neste capítulo, desde Smeaton, passando por Vicat e Le Chatelier, até os programas experimentais do Laboratório Geofísico e do Escritório de Padronização, objetivou o

aperfeiçoamento tecnológico do produto em primeira ou última instância, caracterizando-se como pesquisa tecnocientífica (OLIVEIRA, 2004, pp. 243-246).

A tese de que a perspectiva de valor do progresso tecnológico é interpretada nas sociedades modernas à luz da perspectiva de valor do capital e do mercado (LACEY; MARICONDA, 2014, p. 657) parece ser confirmada no relato das investigações sobre o silicato tricálcio puro. Somos informados que essas investigações não avançaram porque as pesquisas realizadas pelo programa experimental do Escritório de Padronização constataram que sua produção nos fornos de cimento então vigentes não era competitiva em termos comerciais. Certamente, se valores comerciais e mercadológicos não estivessem influenciando as linhas de pesquisa no campo, investigações científicas sobre as qualidades cimentícias do silicato tricálcico puro e do silicato dicálcico puro não seriam negligenciadas pela comunidade de pesquisadores, como o foram sumariamente.

Podemos concluir esta seção extrapolando que a tradição de pesquisa no campo da química do cimento, que culminou nos trabalhos do Laboratório Geofísico e do Escritório de Padronização, vingou por se revelar fecunda e útil, mas sobretudo em razão de endossar a perspectiva do progresso tecnológico, perspectiva de valor sancionada e intensamente manifestada pelas instituições econômicas e políticas dirigentes das sociedades modernas atuais (LACEY, 2008, pp. 171-172). Por isso, essa tradição revela uma autonomia localizada, na medida em que aos cientistas do campo é facultada a liberdade para estabelecer compromissos aceitáveis com a perspectiva do progresso tecnológico, interpretado dentro da perspectiva do capital e mercado, perspectivas de valor que acabam por estabelecer as agendas de pesquisa, os problemas a ser investigados e os domínios de fenômenos a ser estudados no campo (LACEY, 1999, p. 11).

Por estar associada de modo exclusivo a uma perspectiva de valor, essa tradição de pesquisa no campo da química do cimento não é neutra, não atendendo às três condições estabelecidas para a neutralidade da ciência pelo modelo teórico de referência (ibid., pp. 240-241). Sendo assim, apesar das pesquisas nesta tradição atenderem à tese da imparcialidade (LACEY, 2008, p. 83), elas, por não serem conduzidas em seu conjunto por abordagens multiestratégicas, não limitadas às estratégias descontextualizadoras, não se constituem em tese em objetos de valor para qualquer complexo viável de valor, mas apenas em objetos de valor para os complexos viáveis de valor que assumem em seu cerne a perspectiva do progresso

tecnológico. Mesmo para esses complexos de valor, as teorias que têm sido produzidas dentro dessa tradição não são igualmente significativas e aplicáveis, já que essa tradição tem valorizado e encampado pesquisas tecnocientíficas comercialmente orientadas, negligenciando certas possibilidades abstraídas de investigação no campo, como as possibilidades perdidas que poderiam ser investigadas por estratégias descontextualizadoras não circunscritas aos valores comerciais e mercadológicos dominantes (pesquisas sobre os silicatos tricálcio e dicálcio puros).

No próximo capítulo, buscaremos mostrar como essa tradição tem influenciado a adoção de estratégias descontextualizadoras em pesquisas tecnocientíficas comercialmente orientadas que objetivam reduzir o impacto ambiental do setor cimenteiro.

3. A SUSTENTABILIDADE E AS ESTRATEGIAS DE PESQUISA SOBRE CIMENTOS E NOVOS AGLOMERANTES

A produção mundial de cimento quadruplicou de 1990 a 2016, atingindo quatro bilhões de toneladas, devendo esse montante crescer quase 50% até 2050. A maior parte dessa produção é usada na fabricação do concreto, segundo material mais consumido no mundo em termos de volume, perdendo apenas para o consumo mundial anual de água. O cimento e o concreto são os materiais construtivos das sociedades modernas, usados numa variedade de obras, que vão desde edificações residenciais, industriais e comerciais, passando por equipamentos urbanos com diversas finalidades, até obras de infraestrutura, imprescindíveis para oferecer qualidade de vida e bem-estar às populações que vivem em cidades e megalópoles.

Apesar de o processo de fabricação do cimento ter atualmente atingido um nível de maturidade e excelência, ele é ainda intensivo em recursos materiais e energéticos e emite gases poluentes e responsáveis pelo efeito estufa. Como vimos no capítulo anterior, a produção de cimento consiste fundamentalmente na descarbonatação do carbonato de cálcio presente na rocha calcária e requer altas temperaturas nos fornos para que as matérias-primas atinjam o estado de clinquerização. Esses dois fatores combinados são responsáveis por mais de 90% das emissões de dióxido de carbono advindas de todo o processo produtivo envolvido na fabricação de cimento.

Atualmente, as estimativas indicam que o setor cimenteiro mundial é responsável por cerca de 5% a 10% das emissões de gás carbônico e, com a perspectiva de aumento da produção mundial de cimento na primeira metade deste século, fica evidente que, a persistir o modelo atual de negócios no setor, essa participação tende a aumentar, considerando que outros setores conseguirão mitigar progressivamente suas emissões, tendo em vista os compromissos que vêm sendo recentemente adotados pelos atores de múltiplos níveis nas negociações multilaterais para se alcançar o desenvolvimento sustentável.

Felizmente, o setor cimenteiro tem também participado dessas negociações multilaterais e assumido compromissos para o desenvolvimento sustentável, em particular para reduzir as emissões mundiais de CO₂ e mitigar as mudanças climáticas em andamento. Na Conferência das Partes da Convenção sobre

Mudanças do Clima, realizada em 2015, em Paris (COP 21), na qual um novo acordo multilateral entre os países-membros da Organização das Nações Unidas (ONU) foi firmado para reduzir suas emissões de gases do efeito estufa, substituindo o malfadado Protocolo de Kyoto, o setor reunido na Iniciativa Cimenteira para a Sustentabilidade (CSI) se comprometeu a reduzir suas emissões em 25% até 2030. Esta meta assumida tem principalmente como lastro o mapeamento tecnológico realizado pelo setor em 2009, que buscou levantar as tecnologias disponíveis em vigor ou que começam a ser implementadas nas plantas de produção mais modernas, bem como estimar seu potencial de contribuição para o abatimento das emissões de CO₂ pelo setor na primeira metade deste século.

O objetivo deste capítulo é analisar e comentar criticamente essas iniciativas do setor cimenteiro para a sustentabilidade, em especial as estratégias de pesquisa tecnocientífica realizadas e em andamento que lhe dão suporte. Com base no modelo teórico de referência, exposto no primeiro capítulo e ilustrado no segundo capítulo em sua interface com as pesquisas sobre os aglomerantes (especialmente, o cimento Portland), buscamos discutir o modo como essas pesquisas incorporam o conceito de desenvolvimento sustentável e, dialeticamente, como esse conceito, num de seus significados, poderá oferecer uma nova perspectiva valorativa capaz de, em suas interações mutuamente reforçadoras com essas pesquisas, alterar o panorama atual no qual elas vêm sendo conduzidas.

Nosso foco não estará nas pesquisas sobre o cimento e os aglomerantes em si, mas nas estratégias de restrição e seleção que lhe dão origem e no interior das quais tais pesquisas são realizadas. Buscamos com isso avaliar os valores sociais que interagem com essas estratégias, mostrar suas finalidades e resultados obtidos com elas por meio das pesquisas que ensejam, e, por fim, comentar suas limitações no tocante à contribuição que possam ter para a sustentabilidade.

3.1 A emergência do valor da sustentabilidade

A seguir será feita uma retrospectiva do processo histórico que legitimou a sustentabilidade como um novo valor, que emergiu em 1980 e se consagrou em 1990, levando a mudanças de atitude no comportamento das pessoas e das instituições, no sentido de refletir uma nova visão de mundo na qual preservar e recuperar os sistemas ecossistêmicos que constituem a condição biogeofísica da

própria evolução da espécie humana e do progresso de suas sociedades são termos inegociáveis para o desenvolvimento humano (VEIGA, 2014, p. 7).

Nota-se que a caracterização de valor dada acima coaduna-se com a análise dos valores feitas por Lacey para conceituá-los e explicá-los em seu modelo (LACEY, 2008, pp. 47-82). Nesta análise, o conceito de valor é entendido, em seu aspecto pessoal, como um desejo de segunda ordem (desejo de que desejos de um determinado tipo, com certas qualidades avaliadas como positivas, venham caracterizar a vida de uma pessoa), funcionando como critério de escolha e de padrões de comportamento (mudanças de atitudes). Implícita nessa análise dos valores está a crença de que a qualidade apreciada (sustentabilidade) esteja ligada a uma vida plena, bem como uma concepção do que seja o florescimento humano (sua base consiste na preservação e recuperação dos sistemas ecossistêmicos). Em seu aspecto social, o valor da sustentabilidade, como veremos, está incorporado em instituições e na sociedade, estabelecendo condições para sua manifestação e articulação. Importa destacar que tanto na avaliação de Veiga sobre o valor da sustentabilidade quanto na análise de Lacey sobre os valores, eles são entendidos como constituídos na interação de suas modalidades (manifestação x articulação; pessoal x social; etc.), estando necessariamente em desenvolvimento, ao invés de serem simplesmente dados (ibid., p. 60).

Para o propósito de analisar em linhas gerais o valor da sustentabilidade tomou-se como referência o livro “A desgovernança mundial da sustentabilidade”, de José Eli da Veiga, professor do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo e do Programa de Pós-Graduação do Instituto de Relações Internacionais da USP, por trazer uma síntese crítica das discussões, avaliações e explicações em torno do descompasso entre a governança global do desenvolvimento e a governança ambiental global. Governança global é entendida como o conjunto de instituições e atividades que garantem que o mundo formado por estados-nação se governe sem que disponha de governo central (VEIGA, 2013, p. 13). O livro aponta para a importância relativa das consequências, projeções e previsões científicas da exploração excessiva das fronteiras ecológicas pelos homens no quadro das decisões multilaterais com respeito ao desenvolvimento sustentável. Outros textos do autor são também usados para esclarecer conceitos não tão bem desenvolvidos na obra de referência.

As questões da relação do homem com a biosfera e entre o desenvolvimento socioeconômico e a conservação do meio ambiente ganharam maior atenção da comunidade global a partir da segunda metade do século XX, com o aumento dos problemas ambientais relacionados com contaminação química e com poluição atmosférica em geral. Segundo Veiga (2013, pp. 83-84), foram a concentração de aerossóis⁴³ na atmosfera e a contaminação química em geral⁴⁴ « que estiveram na raiz da consciência ambiental que emergiu em meados do século XX, e igualmente foram os primeiros a ser combatidos por governos nacionais e regulados por inovadores instrumentos jurídicos internacionais para a conservação do meio ambiente ». Os governos dos países desenvolvidos logo perceberam que questões habitualmente tachadas de “ambientais” podiam se revelar tão ou mais importantes que as tradicionalmente classificadas como “sociais”, quando fossem fontes de ameaças ao desempenho econômico nacional (ibid., pp. 46-47).

Em relatório elaborado sob encomenda do Clube de Roma, organização não governamental que teve início em abril de 1968 como um pequeno grupo de empresários, diplomatas, cientistas, economistas e altos funcionários governamentais de dez países reunidos na Academia do Liceu de Roma, para tratar de assuntos relacionados ao uso indiscriminado de recursos naturais, os pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), Dennis Meadows, Jorgen Randers, Donella Meadows e William Behrens III, enfatizaram a existência de limites para o crescimento biogeofísico do sistema econômico. Os limites à expansão da economia se traduziam em limites às tendências verificadas com respeito ao uso de dezenove recursos naturais não renováveis em correlação com outras vinte variáveis que compuseram os vários cenários ou modelos mundiais de desenvolvimento (crescimento econômico, produção industrial, consumo de aço, consumo de energia, população, produção alimentar, terras aráveis, fertilizantes, concentração de dióxido de carbono, lixo atômico, etc.). Entre as principais

⁴³ Aerossol caracteriza-se pela suspensão de partículas finas sólidas ou líquidas num gás. O sentido aqui é o relativo à contaminação do ar pela fumaça e os particulados em geral.

⁴⁴ Contaminação química e concentração de aerossol atmosférico são duas das fronteiras ecológicas globais identificadas pelo grupo de pesquisadores coordenado por Rockström, ao lado de mudança climática, perda de biodiversidade, ciclo do nitrogênio, ciclo do fósforo, destruição da camada de ozônio, acidificação dos oceanos, uso global de água doce e mudanças no uso da terra. São assim chamadas porque delimitam um seguro espaço operacional para a humanidade, que garantiria que as atividades humanas não causassem mudanças ambientais inaceitáveis (ROCKSTRÖM et al, 2009).

conclusões do relatório “The limits to growth”, destacam-se (VEIGA, 2013, pp. 89-90):

- a) se as atuais tendências de crescimento da população mundial, industrialização, poluição, produção de alimentos e esgotamento dos recursos naturais continuarem inalteradas, os limites do crescimento neste planeta serão atingidos algum dia dentro dos próximos cem anos, com o resultado mais provável de um declínio repentino e incontrolável da população e da capacidade industrial;
- b) é possível alterar tais tendências de crescimento e estabelecer uma condição de estabilidade ecológica sustentável por muito tempo, sendo que o estado de equilíbrio global poderia ser projetado para que as necessidades básicas de cada pessoa na Terra sejam satisfeitas e que todas as pessoas tenham oportunidade de realizar seu potencial humano individual;
- c) se os povos do mundo decidirem lutar pelo segundo resultado, em vez do primeiro, quanto mais cedo começarem a trabalhar para alcançá-lo, maiores serão as chances de sucesso.

Foi neste contexto que alguns diplomatas suecos decidiram fazer oposição à realização da quarta conferência da Organização das Nações Unidas (ONU) sobre o uso da energia nuclear para fins pacíficos, apresentando como contraproposta a convocação da Conferência sobre o Meio Ambiente Humano (UNCHE). Realizada em junho de 1972, em Estocolmo, a UNCHE contou com a participação de 114 delegações nacionais, que aprovaram a Declaração de Estocolmo e a criação do Programa das Nações Unidas sobre Meio Ambiente (PNUMA, ou UNEP, em inglês).

Na avaliação de Veiga (2013, pp. 48-54), a Conferência de Estocolmo legitimou a tese da inexistência de conflito real entre o desenvolvimento e o meio ambiente, consagrando a fórmula de que esses seriam dois aspectos integrais e indivisíveis, a qual ajudou a destravar as negociações, dominadas pela suspeição dos países subdesenvolvidos de que a discussão de questões ambientais em fórum multilateral das Nações Unidas seria manobra para criar dificuldades às suas exportações ou pretexto para condicionar a ajuda tecnológica e financeira dos países desenvolvidos.

Os ecólogos foram pioneiros no debate da relação entre o homem e o meio ambiente, mas na década de 1960 eles construíram e alimentaram um discurso derrotista sobre essa relação (VEIGA, 2014, p. 17). Num discurso em 1968 na Universidade de Utah, Garret Hardin (1915-2003) proferiu seu discurso presidencial no encontro regional da Associação Americana para o Avanço da Ciência, no qual

alertou os presentes sobre a perspectiva da superpopulação como ameaça à capacidade de suporte da biosfera (VEIGA, 2014, p. 7). Nesta mesma linha argumentativa expressava-se Paul Ehrlich (1932-), para quem das catástrofes que nos espreitavam, algumas não poderiam mais ser evitadas, estando todas ligadas à superpopulação (ibid., p. 17), um dos problemas associados aos países subdesenvolvidos na época.

O vínculo entre desenvolvimento e meio ambiente já havia sido considerado na primeira reunião da UNCHE, em 1970, sob o comando de seu secretário-geral, Maurice Strong, e foi consensuado na 25ª Assembleia das Nações Unidas no mesmo ano. Outro passo importante para reduzir a desconfiança dos países do Terceiro Mundo quanto às discussões de questões ambientais foram os alertas feitos no relatório do Grupo de Peritos sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente, apresentado na Conferência de Founex, na Suíça, em 1971. O relatório chamou a atenção da comunidade internacional para o fato de que a degradação do meio ambiente nos países ricos decorria principalmente do modelo de desenvolvimento em vigor, enquanto os problemas do meio ambiente dos países subdesenvolvidos eram consequência do subdesenvolvimento e da pobreza.

Apesar da fragilidade institucional do PNUMA, que responde ao Conselho Econômico e Social (ECOSOC), que, por sua vez, responde à Assembleia Geral da ONU, e tem sua sede em Nairóbi, o que não contribuiu para que questões ambientais alcancem o topo da hierarquia das Nações Unidas, o Programa obteve alguns êxitos. Entre eles, a Declaração de Nairóbi, em maio de 1982, por ocasião do décimo aniversário da Conferência de Estocolmo, que deu origem à Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED) (Veiga, 2013, pp. 53-58). Presidida pela então primeira-ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland, a WCED apresentou à ONU, em 1987, o relatório “Nosso Futuro Comum”, que cunhou o conceito de desenvolvimento sustentável, ao alertar sobre a necessidade de uma nova era de crescimento – um crescimento vigoroso, ao mesmo tempo social e ambientalmente sustentável (VEIGA, 2013, p. 29). Motivava essa conclusão a recente tragédia de Chernobyl, ocorrida em abril de 1986.

A convenção mais exitosa do PNUMA foi a de Viena, de 1985, que resultou no Protocolo de Montreal sobre Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio, concebido e assinado por 23 delegações nacionais, em setembro de 1987. O problema dos buracos polares na camada de ozônio em decorrência da emissão de

clorofluorcarbonos (CFCs), halons, tetracloretos de carbono (CTCs) e hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) era conhecido internacionalmente desde a primeira declaração científica sobre o assunto em 1975, em conferência da Organização Meteorológica Mundial (WMO), custeada pelo PNUMA. Na rodada decisiva, realizada em Londres em 1990, o Protocolo de Montreal já contava com a ratificação de 58 países e da então Comunidade Econômica Europeia (CEE), conjunto que representava 99% da produção e 90% do consumo das substâncias responsáveis pelos buracos na camada de ozônio (VEIGA, 2013, pp. 53-57).

Foi importante também a parceria entre o PNUMA e a WMO, com a criação, em 1988, do Painel das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (IPCC), hoje reconhecido pelas Nações Unidas como o fórum mundial para lidar com as mudanças climáticas. A convocação de uma segunda cúpula mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento, e as rodadas de negociações das convenções sobre mudança do clima e biodiversidade biológica, para ser abertas para assinatura nessa segunda megaconferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Rio-92), foram outras ações da PNUMA.

A Cúpula da Terra (Rio-92), realizada no Rio de Janeiro, em 1992, foi importante para o processo de entendimentos da comunidade internacional sobre os cuidados exigidos na conservação do meio ambiente, gerando sete acordos até a virada do milênio, além de uma dúzia de protocolos ou adendos a tratados já existentes, entre os quais as convenções do clima e da biodiversidade (ibid., p. 60).

Nesta ocasião, os três principais autores do relatório “Limits to Growth” elaboraram sua primeira atualização (“Beyond the Limits”), enfatizando que a excessiva alteração ecossistêmica já configurava a transgressão dos limites. Na sua segunda atualização, em 2004, os autores procuraram evidenciar, em 12 gráficos referentes ao aumento das pressões antrópicas e 26 gráficos referentes aos limites biogeofísicos do planeta, que a humanidade já havia ultrapassado o marco do nível sustentável do desenvolvimento, sendo que suas projeções confirmaram os cálculos agregados feitos pela Rede Global da Pegada Ecológica, desde 1996 (ibid., pp. 94-95).

A Pegada Ecológica é um procedimento de avaliação de déficits ou saldos ecológicos pela comparação entre, de um lado, a pressão que os humanos exercem sobre os ecossistemas, em razão do consumo de energia e matéria por sociedades

humanas e de suas decorrentes poluições e rejeitos, e, de outro, a capacidade de regeneração desses ecossistemas (biocapacidade). O que ela procura indicar é a área da biosfera (expressa em hectares globais) necessária para suportar o consumo humano, seja individual, seja coletivo, seja de um determinado produto. O único rejeito das atividades humanas que entra no cálculo é o das emissões de dióxido de carbono, estando excluídos os demais gases do efeito estufa e outras poluições tóxicas. Por sua vez, como a biocapacidade depende da renovação garantida pelo potencial de fotossíntese de uma determinada área, não entra no seu cálculo o esgotamento de outros recursos naturais que não sejam terra e água (VEIGA, 2013, pp. 85-88).

Conforme estimativas da Rede Global da Pegada (GFN)⁴⁵, entre 1961 e 2008, a pegada aumentou de menos de 2,5 para 2,7 hectares globais *per capita* (hag/pc), enquanto a biocapacidade teve, no mesmo período, uma queda de 3 para 1,8hag/pc, em razão da exploração excessiva dos ecossistemas. Sendo assim, a pegada ecológica correspondia a pouco mais de 80% da biocapacidade em 1961 e a 150% em 2008, ou seja, a humanidade passou a consumir, em um ano, o que a biosfera leva um ano e meio para regenerar. As projeções da GFN indicam que o déficit ecológico global passará dos 80% em 2015, 100% em 2030 e 190% em 2050 (ibid.). Como o fator quase inteiramente responsável pela exploração ecossistêmica na Pegada Ecológica é a falta de absorção e sequestro do carbono (em 2008, esse fator foi responsável por 54,4% do total), o déficit ecológico global pode se resumir ao que frequentemente tem sido chamado de “pegada carbono” (ibid., pp. 87-88).

No entanto, apesar do alerta feito no relatório “Beyond the limits” de que já havíamos ultrapassado as fronteiras ecológicas, como a climática, a governança ambiental global sofreu um revés nas tratativas diplomáticas relacionadas ao meio ambiente, com a assinatura da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), por 172 governos participantes da Rio-92. Isto porque seu terceiro artigo trazia o princípio das responsabilidades comuns, porém diferenciadas, que atribuiu todos os custos do combate ao aquecimento global às nações pioneiras no processo de industrialização, sem qualquer ônus para os demais países, que correspondiam ao G-77+China (bloco com 132 países do Sul, ao qual aderiu a China posteriormente, formado em 1964 na Conferência das Nações

⁴⁵ Link para o GFN: <www.footprintnetwork.org>.

Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento, em torno de uma plataforma doutrinária que enfatiza a necessidade de abertura dos mercados do Norte, a maior contribuição ao desenvolvimento dos países pobres e a melhor distribuição dos poderes nas organizações internacionais responsáveis pela governança global).

Segundo Veiga (2013, p. 62), a incongruência do Protocolo de Kyoto, resultante de negociações entre todas as nações que haviam assinado a Convenção de 1992 e adotado na segunda Conferência das Partes da Convenção sobre Mudanças do Clima (COP-2), em dezembro de 1997, é que no G-77+China, ao lado de grande número de países pobres com irrisório impacto agregado das emissões de carbono, havia países emergentes com potencial para mais que contrabalançar ações pró-clima que viessem a ser adotadas por países do Norte. Em razão disso, os Estados Unidos, país mais responsabilizado pelo problema do aquecimento global, não ratificou o Protocolo de Kyoto, tornando sem efeito as decisões tomadas nas demais COPs. Essa situação de congestionamento das negociações multilaterais em torno do clima e das mudanças climáticas perdurou até o fim do Protocolo de Kyoto, em 2015.

Apesar desse revés na governança global ambiental, foi na Rio-92 que o conceito de desenvolvimento sustentável foi consagrado no terceiro princípio da Declaração do Rio: « O direito ao desenvolvimento deve ser exercido de modo a permitir que sejam atendidas equitativamente as necessidades desenvolvimentistas e ambientais das gerações presentes e futuras » (VEIGA, 2013, p. 108). Segundo Veiga (2013, p. 109), esse princípio reafirmou o casamento indissolúvel estabelecido desde a primeira megaconferência, no qual desenvolvimento e meio ambiente são integrais e indivisíveis, sendo que os imperativos nacionais de desenvolvimento e os cuidados ambientais teriam de ser tratados como duas faces da mesma moeda, jamais uma deveria suplantar a outra em negociações multilaterais.

Esse entendimento sobre o desenvolvimento sustentável começou a ser modificado com a emergência da ideia de que ele se apoiaria no equilíbrio de suas três dimensões: a econômica, a social e a ambiental. Essa ideia tem sua origem no contexto corporativo, com o consultor britânico John Elkington (1949-) e seu enfoque de gestão de empresas baseada nas dimensões *profit*, *people* e *planet*. Sua influência foi tão forte que cinco anos depois ela foi alçada ao documento da Cúpula de Joanesburgo, em 2002, denominado “Plan of Implementation of the World

Summit on Sustainable Development”. Por sua vez, o documento “O Futuro que Queremos”, da Conferência Rio+20, em 2012, acabou confirmando a mutação. O problema com essa abordagem é ser suscetível às negociações multilaterais que partem da premissa de que apenas um terço do desenvolvimento sustentável dependa de sua base biogeofísica, em vez de reforçar o entendimento anteriormente consensuado de que o meio ambiente é base e condição material de qualquer possibilidade de desenvolvimento humano (VEIGA, 2013, pp. 108-111).

Notamos nessa transição do significado de desenvolvimento sustentável duas visões irreconciliáveis e em disputa sobre a relação entre desenvolvimento humano e meio ambiente. De um lado, a preservação e recuperação de ecossistemas, ou a atuação humana dentro das fronteiras ecológicas globais, é condição *sine qua non* para garantir o desenvolvimento continuado da humanidade, que parece requerer mudanças profundas e de curto prazo no desenvolvimento socioeconômico em curso. De outro, a preocupação com o meio ambiente parece vir a reboque do desenvolvimento socioeconômico em curso, como um requisito imprescindível a mais a ser considerado para se garantir a continuidade do desenvolvimento humano, que necessita, neste momento, de reformulações para atender, a longo prazo, as condições impostas pelas fronteiras ecológicas globais. A diferença parece ser de perspectiva de valor. Nos termos do modelo teórico de referência, podemos afirmar que uma visão de desenvolvimento sustentável coloca a perspectiva de valor da sustentabilidade no topo da hierarquia de valores, enquanto na outra visão essa perspectiva é subordinada à perspectiva de valor do capital e do mercado, dominante nas sociedades industriais contemporâneas.

O rebaixamento do meio ambiente nas tratativas diplomáticas multilaterais já havia aparecido na mais importante declaração sobre as perspectivas de desenvolvimento humano para o século XXI – a Declaração da Assembleia das Nações Unidas dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), em 2000 (VEIGA, 2013, pp. 111-112). Se, por um lado, os primeiros seis ODM foram bem articulados para que pudessem ser obtidos avanços significativos até 2015 em questões como a erradicação da miséria e da fome, o combate à AIDS e à malária, a educação primária, a discriminação das mulheres, a mortalidade infantil e a saúde materna, por outro, os ODM relativos aos aspectos ambientais não incorporaram questões cruciais, como a mudança climática, a perda da biodiversidade e as áreas oceânicas mortas pelo excesso de nitrogênio (VEIGA, 2013, pp. 23-24). Por sua vez,

vale destacar que os ODM, apesar de combaterem as diversas dimensões da pobreza, não se traduziram em compromissos multilaterais para enfrentar um dos mais cruciais desafios do desenvolvimento sustentável na acepção desenvolvida desde a Conferência de Founex, a questão das desigualdades socioeconômicas, cuja redução pode ocupar o lugar do crescimento econômico no processo de elevação do bem-estar das populações, como indicam os estudos de 2009, de Wilkinson e Pickett (ibid., p. 30).

Essas fragilidades dos ODM parecem ter sido revertidas com a Declaração da Assembleia das Nações Unidas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), em setembro de 2015, que estabeleceu uma nova agenda global dos países-membros da ONU para os próximos quinze anos. Essa nova agenda pretende concluir o legado dos ODM, como a erradicação da pobreza e o empoderamento das mulheres, mas reconhece sobretudo que a degradação ambiental e a mudança climática são desafios de nossos tempos, com efeitos negativos que minam a capacidade de todos os países de alcançar o desenvolvimento sustentável. Sendo assim, o documento reconhece que o desenvolvimento econômico e social depende da gestão sustentável dos recursos naturais de nosso planeta (artigo 33 da Declaração). Neste sentido, a nova agenda anuncia o compromisso dos países com 17 objetivos de desenvolvimento sustentável e suas 169 metas associadas, destacando-se: a construção de cidades e infraestruturas resilientes (ou seja, capazes de absorver choques advindos das mudanças climáticas e se adequar a eles), a redução da desigualdade dentro dos países e entre eles, a busca por padrões de produção e consumo sustentáveis, a tomada de medidas urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos, a proteção, recuperação e promoção do uso sustentável dos oceanos e dos ecossistemas terrestres, a reversão da degradação da terra e a suspensão da perda da biodiversidade (ONU, 2015).

Outra expectativa de virada na governança ambiental global foi alimentada recentemente com o Acordo de Paris, assinado por 195 nações participantes da 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 21), em dezembro de 2015. No Acordo os países signatários se comprometeram a reduzir suas emissões de gases do efeito estufa por meio de suas Contribuições Intencionais Determinadas Nacionalmente (INDC, na sigla em inglês), metas

voluntárias nacionais de redução de emissões, com vistas a se atingir o objetivo compactuado de manter o aquecimento global abaixo dos 2°C até o fim deste século, preferencialmente em 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Apesar do inédito acordo mundial alcançado para combater os efeitos das mudanças climáticas, revertendo o congestionamento das negociações multilaterais em torno da questão climática, o documento possui fragilidades. Reconheceu que os níveis globais de emissão de gases de efeito estufa estimados para 2025 e 2030 decorrentes das INDCs dos 188 países que já as apresentaram são insuficientes para conter o aumento da temperatura do planeta em até 2° C. Apesar disso, não detalhou prazos e como serão feitas as revisões dessas metas nacionais com vistas ao acerto de rota das emissões dos países signatários para se manter o aquecimento dentro do objetivo compactuado, nem apresentou métricas para avaliação do cumprimento desse objetivo. Além disso, o Acordo de Paris não previu mecanismos de punição aos países que não passarem a cumprir suas INDCs a partir de 2020, quando deve passar a vigorar o acordo.

O revés para o sucesso do Acordo de Paris e a reversão das expectativas em torno dele aconteceu, em 2017, com o governo do republicano Donald Trump anunciando sua intenção de retirar os Estados Unidos do Acordo, fazendo as negociações em torno do clima retrocederem ao estágio anterior, uma vez que os Estados Unidos, a China, a Índia e a União Europeia são responsáveis por mais da metade das emissões de gases do efeito estufa e a saída dos Estados Unidos inviabilizaria a entrada em vigor do Acordo.

Vemos que os acordos multilaterais em torno da preservação e recuperação do meio ambiente e do desenvolvimento sustentável, ora ratificados por elevado número de nações em razão de seus conteúdos serem a favor da criação de regimes necessários de governança global, ora sofrendo reveses em termos do congestionamento das negociações e da desarticulação de consensos em construção em função do desacordo político e econômico entre as nações, representam o que a interação dessas nações selecionou como possíveis formas de adaptação ao jogo das relações geopolíticas mundiais (VEIGA, 2013, p. 128).

A governança ambiental global não foi capaz de atingir um nível sequer razoável mais de vinte anos depois da consagração do desenvolvimento sustentável na Declaração do Rio por coexistir com a governança global do desenvolvimento, gestada desde a Paz de Versalhes, em 1919-1920, mas válida de fato com o

surgimento da Organização das Nações Unidas, em 1945, cujo objetivo é favorecer condições de progresso e desenvolvimento econômico e social (VEIGA, 2013, pp. 11-15). Essa condição de coexistência entre as duas governanças pode ser ilustrada pela forma de adoção do princípio da precaução pelos países-membros das Nações Unidas. O princípio da precaução afirma que eventuais perigos para a saúde e para o meio ambiente poderiam exigir certa antecipação de iniciativas para evitá-los, mesmo que as evidências científicas não fossem ainda suficientes para que a probabilidade do risco pudesse ser razoavelmente avaliada. Surgido na década de 1970 em legislações nacionais da Suécia e da Alemanha, o princípio da precaução foi incorporado no 15º Princípio da Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (1992), sendo reafirmado no Protocolo de Cartagena sobre Biossegurança (2003), no âmbito da Convenção da Diversidade Biológica, e na Convenção sobre Mudança do Clima (1994), ratificados por elevado número de nações.

Apesar disso, seria um equívoco assumir que o entendimento global sobre as medidas necessárias para evitar a violação das fronteiras ecológicas seja obtido por respeito e fidelidade ao 15º Princípio da Declaração do Rio. Em vez de respeito ao princípio da precaução, o que orienta os passos em negociações multilaterais são as estimativas de custo-benefício feitas pelas principais potências, com o agravante de que as probabilidades de risco são calculadas para um horizonte temporal de muitas décadas, envolvendo a questão complexa da solidariedade com as gerações futuras (ibid.. 126-128).

Isto não significa que respaldar o princípio da precaução por meio de acordos multilaterais não tenha implicações. Em condições geopolíticas mais favoráveis, a adoção do princípio da precaução e dos acordos multilaterais em torno do desenvolvimento sustentável pode se converter em instrumentos políticos e jurídicos necessários para sair do atual impasse global em torno das questões de sustentabilidade. Isto porque nesses quase quarenta anos o projeto de desenvolvimento sustentável e o valor da sustentabilidade não cessaram de ganhar força social, como vimos na retrospectiva feita. A cada semestre, os corpos diplomáticos têm sido chamados a participar, em média, de quarenta reuniões de negociações sobre questões ambientais. Em apenas sete anos (2005-2011) foram

assinados 22 acordos, 59 aditivos e 10 protocolos, sem contar os acordos bilaterais (VEIGA, 2013, p. 45).

Na conclusão final de Veiga (2014, p. 17):

A consagração da retórica sobre o desenvolvimento sustentável, que deu origem ao valor “sustentabilidade”, exprime uma profunda confiança de que, sim, será possível chegar à governança do sistema Terra, mesmo que ainda seja muito difícil se ter clareza sobre quais serão os caminhos.

No âmago do conceito de sustentabilidade está uma visão de mundo dinâmica, na qual transformação e adaptação são inevitáveis, mas dependem de elevada consciência, sóbria precaução e muita responsabilidade diante dos riscos e, principalmente, das incertezas, o que requer um sinérgico avanço do conhecimento sobre governança global e cooperação (ibid., p. 19).

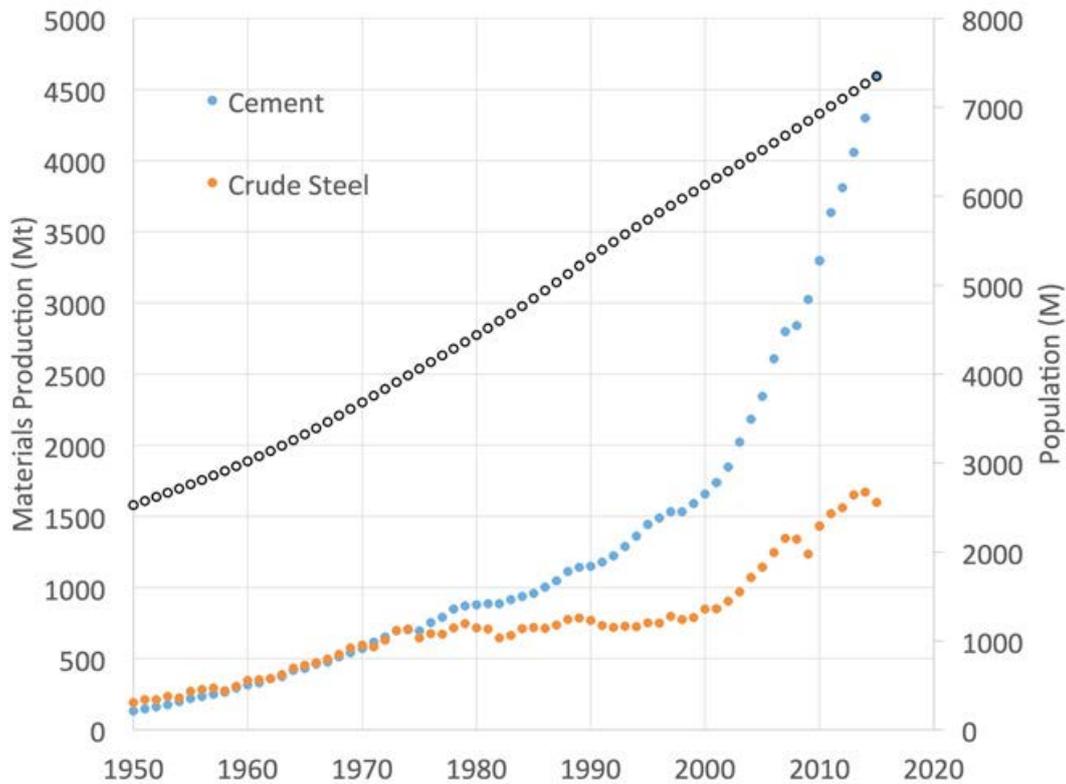
Vemos que o valor da sustentabilidade caracterizado por Veiga apresenta uma brecha entre, por um lado, seu aspecto manifestado nas atitudes de pessoas e nos programas, leis e políticas de sociedades e, por outro, seu aspecto articulado nos discursos de agentes políticos, empresariais e sociais (entre os quais os cientistas) sobre o desenvolvimento sustentável. Grupos de diferentes espectros políticos e caracterizados por diferentes complexos de valores perceberão e interpretarão essa brecha de modos bastante divergentes (LACEY, 2008, pp. 60-61), como vimos na exposição acima sobre as duas perspectivas em disputa sobre o desenvolvimento sustentável. Essa situação cria tensões entre pessoas, instituições e sociedades, que marca o jogo das relações internacionais em torno do desenvolvimento sustentável. Apesar das incertezas do processo, com diferentes agentes escolhendo diferentes ações e percursos (como aqueles categorizados por Lacey como ajustamento, resignação, marginalidade criativa, busca do poder e transformação a partir de baixo), alguns dos termos centrais do valor “sustentabilidade” já estão postos e consolidados, como a confiança de que será estruturada e consolidada uma governança ambiental global, que seja capaz de lidar com um mundo com profundas transformações de seus sistemas ecossistêmicos, o que exigirá adaptação, cooperação, elevada consciência, precaução, conhecimento e responsabilidade de todos os atores.

3.2O impacto ambiental do setor cimenteiro e as iniciativas para sua redução

A produção global anual de cimento cresceu intensamente no período de 1978 a 2016, flutuando em torno de um bilhão de toneladas até 1990 para mais de quatro bilhões de toneladas em 2016. O principal responsável por esse crescimento foi a acelerada produção chinesa, que, em 1978, perfazia apenas 9% da produção mundial de cimento, mas que, em 2016, já compartilhava mais de 50% dessa produção (UWASU; HARA; YABAR, 2014, pp. 37-38/USGS, 2017, p. 45).

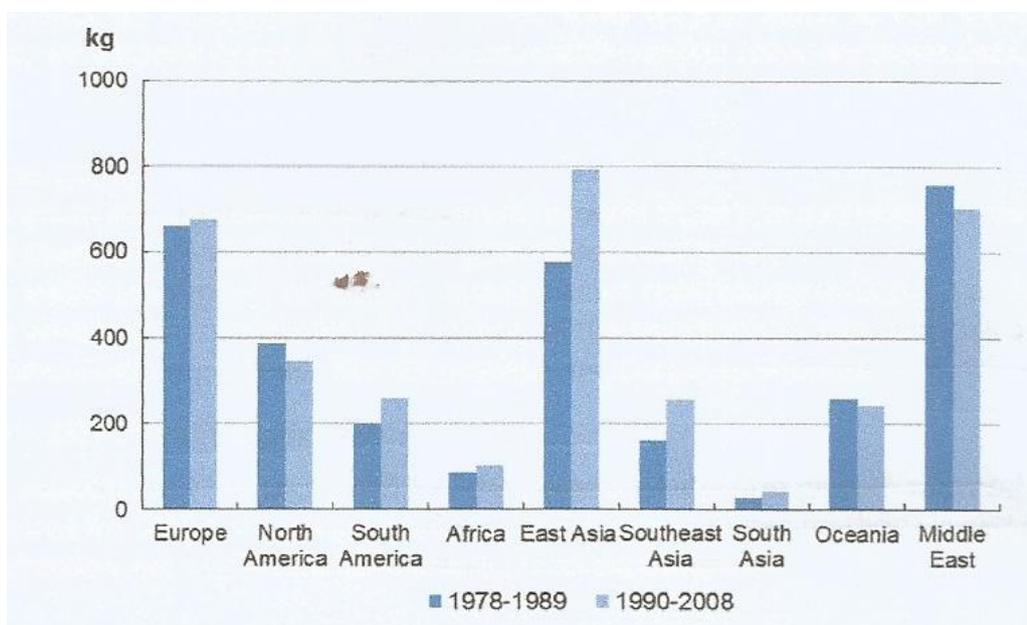
A maior parte dessa produção mundial de cimento é usada como componente aglomerante na produção de concreto (40%), argamassas (40%) e de produtos baseados em cimento (20%), segundo estimativas de Scrivener, John e Gartner (2016, p. 9). O concreto é o material construtivo mais largamente empregado no mundo em termos de volume, por ser produzido a partir de matérias-primas prontamente disponíveis, ser de fácil aplicação e possuir boas qualidades construtivas (DAMTOFT et al., 2008, p. 115). O concreto fica apenas atrás da água em termos de materiais mais consumidos anualmente pela humanidade em volume (IEA/WBCSD, 2009, p. 2). Segundo relatório do grupo de trabalho “Iniciativa para o Clima e a Construção Sustentável do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP-SBCI, na sigla em inglês: *United Nations Environmental Program Sustainable Building and Climate Initiative*), as sociedades modernas desenvolvidas requerem um ambiente construído que é inimaginável sem a disseminação do uso de materiais baseados no cimento, que possibilitam a construção em qualquer lugar, a baixo custo, de formas massivas e complexas a partir de água, agregados, areia e materiais cimentícios (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, p. 2). Por isso, segundo esses autores, nos últimos 65 anos, a produção de cimento cresceu 34 vezes, enquanto a população mundial aumentou três vezes (Gráfico 4). Para eles, o crescimento global da produção de cimento *per capita* está relacionado com o melhoramento dos padrões de vida no mundo (ibid.).

Gráfico 4 - Comparação da produção de cimento e aço com a população



Fonte: Scrivener, John e Gartner (2016, p. 2).

Essa produção mundial de cimento é variável no tempo e por região (Gráfico 5). A produção *per capita* é alta na Europa, na Ásia e no Oriente Médio, mas baixa nas Américas e na Oceania. Em nível de país, essas diferenças são ainda maiores. Enquanto os países do norte da Europa têm uma produção *per capita* baixa e em queda, países como Grécia e Espanha têm uma produção *per capita* alta e em ascensão. Na Ásia, China e Vietnã tem sua produção *per capita* em ascensão, com a produção chinesa sendo muitas vezes maior do que a vietnamita (UWASU; HARA; YABAR, 2014, p. 38).

Gráfico 5 - Tendências na produção *per capita* de cimento por regiões

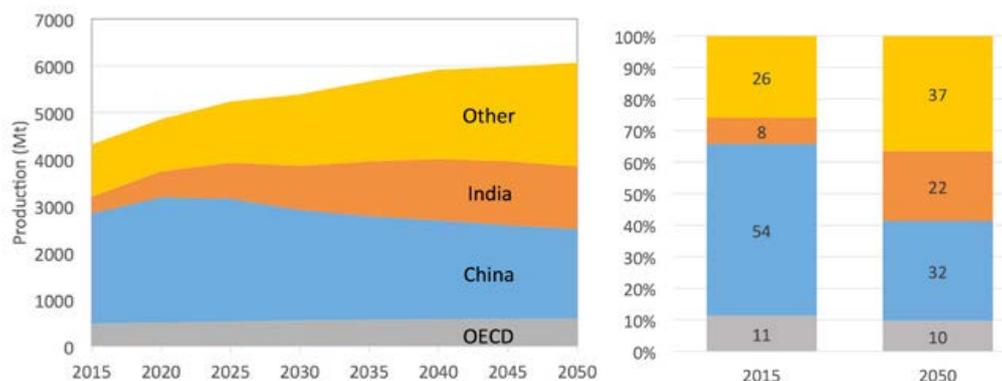
Fonte: Uwasu, Hara e Yabar (2014, p. 38).

Como a produção local de cimento é consumida localmente, sua produção nacional é proporcional a sua demanda nacional, o que significa que a produção total de cimento num país é largamente determinada por seu grau de desenvolvimento econômico. Uwasu, Hara e Yabar (2014, pp. 39-43) demonstraram estatisticamente haver uma relação na forma de U invertido entre a produção de cimento e o Produto Interno Bruto (PIB) de um país, ou seja, quando o PIB é baixo, a produção de cimento é baixa, mas essa produção cresce vertiginosamente com o crescimento acentuado do PIB em razão do processo acelerado de urbanização, que, quando alcança a saturação, tende a estabilizar o PIB e a produção de cimento (ibid.).

Com o crescimento esperado do PIB de países em desenvolvimento, as previsões são de que a produção mundial de cimento continuará a crescer. Isto porque, segundo dados do Banco Mundial, os países de renda nacional baixa possuem 65% de sua população urbana vivendo em favelas, 60% dela sem acesso a saneamento básico e 35% sem acesso à rede de água, perfazendo 40% da população mundial vivendo nessas condições (SCRIVENER; JOHN; GARTNER,

2016, p. 3). As projeções quanto à demanda mundial por cimento são díspares na literatura técnica, indo do cenário de baixa demanda, onde a produção anual em 2050 ficaria em 4,5 bilhões de toneladas, até o cenário de alta demanda, que assume que a produção de cimento crescerá a uma taxa igual à taxa de crescimento da população, alcançando cerca de 6 bilhões de toneladas em 2050 (Gráfico 6) (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, pp. 34-35). Considerando que a demanda por cimento cresceu 10 vezes mais do que o crescimento da população mundial entre 1950 e 2015, a projeção no cenário de alta demanda deve ser superada (ibid., p. 3).

Gráfico 6 - Cenário de alta demanda do IEA para o consumo futuro de cimento por região

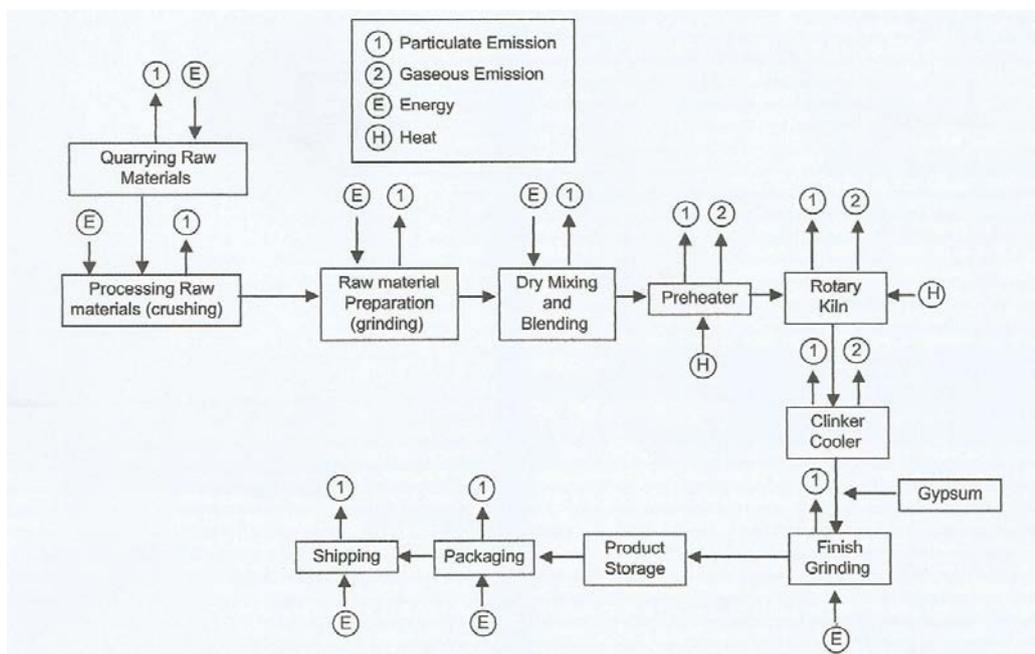


Fonte: WBCSD (2016⁴⁶) apud Scrivener, John e Gartner (2016, p. 3).

Se, por um lado, o cimento é o componente fundamental do concreto, material construtivo essencial para a construção da infraestrutura e das edificações nas sociedades modernas, sendo que sua produção está interligada com o nível e o crescimento do PIB de um país, por outro, sua fabricação é intensiva em recursos materiais e energéticos, sendo também responsável pela emissão de gases do efeito estufa e poluentes do ar. Na Figura 4 vemos um diagrama de fluxo do processo de manufatura de cimento, com os consumos de energia térmica e elétrica e com as emissões de gases e particulados em cada etapa do processo (adaptado de HUNTZINGER; EATMON, 2009, p. 669).

⁴⁶WBCSD. Cement Sustainability Initiative, Getting the Numbers Right, Project Emissions Report 2014 (2016). Disponível em: <<http://www.gnr-project.org/>>.

Figura 4 - Diagrama de fluxo de energia, gases e particulados no processo de manufatura de cimento



Fonte: Huntzinger e Eatmon (2009, p. 669).

A indústria de cimento é um dos maiores emissores industriais de gás carbônico (gás que perfaz 82% do total de gases do efeito estufa). A produção de cimento Portland comum gera em média 842 quilos de CO₂ por tonelada de clínquer produzida (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 4). As estimativas quanto à contribuição dessa indústria para o total de emissões antropogênicas de gases do efeito estufa (GHG, na sigla em inglês: *greenhouse gas*) são bastante desconhecidas na literatura. Algumas fontes estimam que essa contribuição esteja em torno de 10% (BOLDEN; ANDRES; MARLAND, 2013⁴⁷, apud SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, p. 4), outras que ela gire em torno de 6% (METZ⁴⁸, 2007 apud SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, p. 4). Damtoft et al. (2008, p. 116) estimam que a indústria cimenteira produz aproximadamente 5% das emissões

⁴⁷ BOLDEN, T. ; ANDRES, B. ; MARLAND, G. **Global CO₂ emissions from fossil-fuel burning, cement manufacture, and gas flaring: 1751-2013**. Oak Ridge National Laboratory, Oak-Ridge, 2016. Disponível em: <http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2013.ems>.

⁴⁸ METZ, B. **Intergovernmental Panel on Climate Change**, eds., Climate change 2007: mitigation of climate change : contribution of Working Group III to the Fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York : Cambridge University Press, 2007. Disponível em : <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4_wg3_full_report.pdf>.

antropogênicas de CO₂, contribuindo com apenas 3% das emissões feitas pelo homem dos GHG. Essa taxa de 5% das emissões globais é a assumida no mapeamento tecnológico do setor, que será discutido adiante.

Além do impacto ambiental global das emissões de CO₂, a indústria cimenteira emite os poluentes dióxido de enxofre (SO₂), monóxido e dióxido de nitrogênio (NO_x), substâncias que contribuem com a chuva ácida, tendo, assim, impacto ambiental regional (VAN DEN HEEDE; DE BELLE, 2012, p. 432). Como esses poluentes são derivados majoritariamente da queima de combustíveis nos fornos de cimento (ibid.), eles não serão objeto dessa dissertação, cujo foco está nas pesquisas tecnocientíficas relacionadas à composição e dosagem de materiais para a constituição de aglomerantes cimentícios.

Em termos locais, dos fornos de cimento saem particulados (CKD, na sigla em inglês: *cement kiln dust*) entre 0,05 e 5 micrômetros, que, devido ao seu tamanho reduzido (menores que 10 micrômetros), podem adentrar as vias respiratórias e causar irritações (ibid.). Van Oss e Padovani⁴⁹ (2003, pp. 93-127 apud HUNTZINGER; EATMON, 2009, p. 669) estimam que a taxa de geração de CKD nos fornos de cimento é de aproximadamente de 15 a 20% em massa da produção de clínquer. Adicionalmente, contaminantes provenientes das matérias-primas e combustíveis usados nos fornos podem se concentrar nos CKD. Os riscos à saúde e ao meio ambiente promovidos por esses particulados podem ser significativamente reduzidos com o uso da tecnologia em desenvolvimento do sequestro do carbono por meio da carbonatação mineral, capaz de estabilizar os particulados, reduzindo seu pH (ibid.). Essa tecnologia será melhor esclarecida à frente, mas de modo bastante resumido, já que também não se refere ao processo de constituição dos aglomerantes. Por sua vez, algumas plantas de cimento reciclam uma porção ou todo o CKD, usando-o como matéria-prima para a produção de clínquer. O grau em que o CKD é usado na planta de cimento varia enormemente e depende fundamentalmente de sua composição, em especial dos traços de metais e contaminantes que o constitui, e das normas de cada país e região quanto aos limites dos álcalis nos cimentos (ibid., 2009, p. 669).

Dos fornos de cimento saem também alguns metais, dibenzodioxinas policloradas e dibenzofurano (PCDD/Fs), que podem ser transmitidos para os

⁴⁹VAN OSS, H.G.; PADOVANI, A.C. Cement manufacture and the environment, part II: environmental challenges and opportunities. **Journal of Industrial Ecology**, [S.l.], v. 7, n. 1, 2003.

humanos por via aérea e por meio do contato com o solo, a água e a vegetação. Estando essas substâncias dentro dos limites regulamentados nacional e internacionalmente, seu risco à saúde é baixo, com exceção de alguns poucos elementos, como o arsênio e o cromo (VAN DEN HEEDE; DE BELLE, 2012, pp. 432-433). As fontes dessas substâncias podem ser as matérias-primas e os combustíveis que entram nos fornos, bem como seus blocos refratários, as ligas metálicas usadas nos moinhos e as adições de gesso, pozolanas, escórias granuladas e outros componentes minerais que podem entrar na composição do cimento (*ibid.*). Como os metais tóxicos advindos das adições representam baixo risco à saúde e ao meio ambiente, por serem incorporados no concreto e imobilizados pelos produtos de hidratação do cimento (*ibid.*), seu impacto ambiental será desprezado nesta dissertação.

Tendo em vista os cenários de crescimento da produção e os impactos ambientais dessa produção apontados acima, a indústria cimenteira enfrenta atualmente desafios para reduzir esses impactos, principalmente os relacionados ao consumo de energia (já que as matérias-primas usadas na fabricação de cimento – calcário e argila – são abundantes) e às emissões de dióxido de carbono (que, como vimos, tem um impacto ambiental global, enquanto que os outros poluentes têm impacto regional e local), com vistas a alcançar o desenvolvimento sustentável ainda neste século. O Conselho Mundial Corporativo para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD, na sigla em inglês: *World Business Council for Sustainable Development*), associação mundial de cerca de 200 companhias de 20 setores industriais de mais de 30 países, cuja missão é promover o desenvolvimento sustentável, o entende como “formas de progresso que satisfazem as necessidades do presente sem comprometer a habilidade de gerações futuras para satisfazer suas necessidades” (DAMTOFT et al, 2008, p. 115). Segundo a entidade, diante da escala atual da pobreza mundial e do crescimento populacional, o desafio para satisfazer as necessidades presentes é urgente, mas requer o compromisso do setor industrial com as necessidades ambientais, sociais e humanas das gerações futuras (*ibid.*). Sendo assim, o desafio imposto sobre a indústria em geral e a cimenteira em particular é o de atender a demanda global crescente por produtos, tendo em vista o crescimento mundial populacional e do consumo, sem que isso leve ao aumento no uso de recursos energéticos e materiais, bem como ao aumento das emissões de

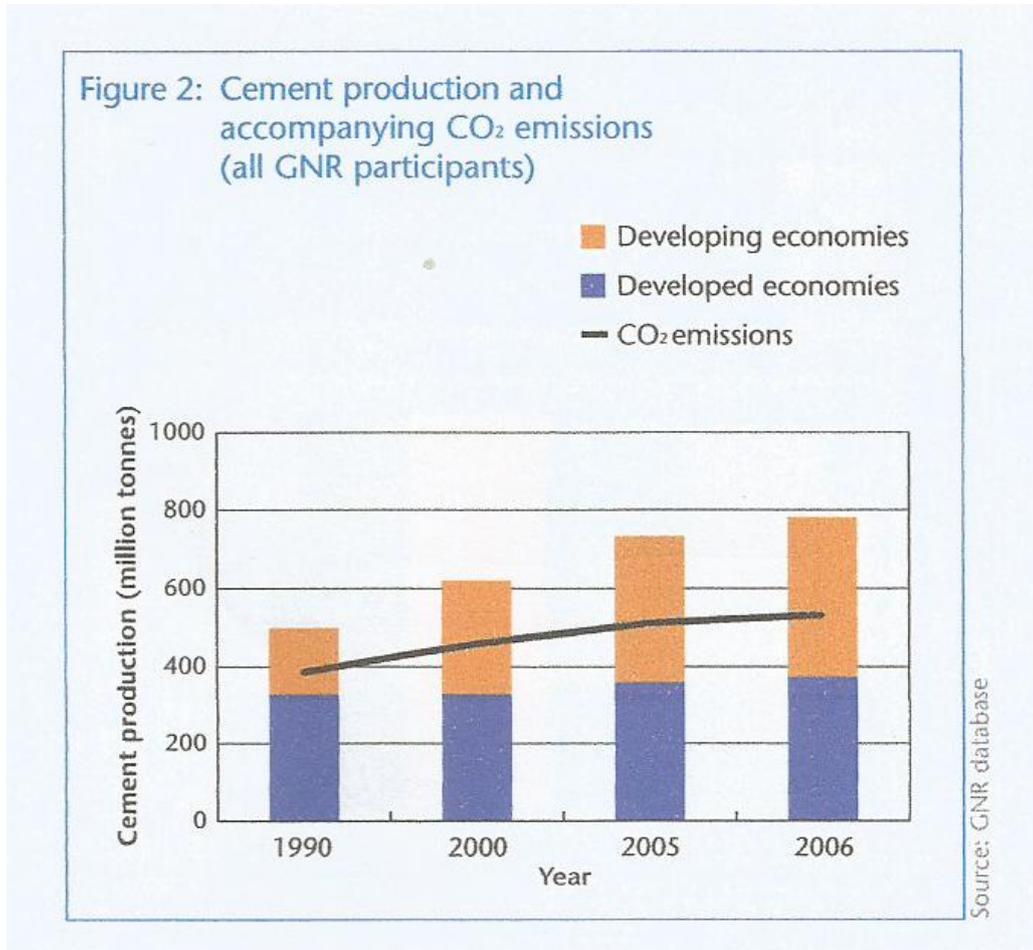
gases do efeito estufa e outros poluentes ambientais. Para isso, a indústria cimenteira aposta em caminhos tecnológicos com diferentes estágios de desenvolvimento e implementação para consumir menos energia e recursos naturais, bem como emitir menos CO₂, por unidade de cimento produzido (DAMTOFT et al., 2008, pp. 115-121). Essa via para o desenvolvimento sustentável é comumente conhecida por ecoeficiência, desmaterialização ou descolamento (VEIGA, 2013, p. 96). A ideia básica por trás desses conceitos é contrabalançar o impacto ambiental causado pelo aumento da população e do consumo *per capita* por meio da eficiência tecnológica no uso de recursos materiais e energéticos e nas emissões de gases do efeito estufa e de poluentes, na clássica formulação de Holdren e Erlich do balanço entre o aumento na demanda por produtos e o melhoramento tecnológico (HABERT et al., 2010, p.821).

Desde 1999, algumas companhias cimenteiras mundiais da WBCSD iniciaram a *Cement Sustainability Initiative* (CSI, na sigla em inglês para “Iniciativa Cimenteira para a Sustentabilidade), um programa setorial envolvendo 24 companhias de cimento, com operações em mais de 100 países, respondendo por cerca de 30% da produção mundial de cimento, para lidar com os desafios do desenvolvimento sustentável, em áreas como a das emissões de gases do efeito estufa e de poluentes, da segurança e saúde dos funcionários e do gerenciamento dos impactos no uso da terra. Para lidar com as emissões de CO₂ na indústria cimenteira, a CSI desenvolveu, em 2003, um protocolo para medir e reportar as emissões de dióxido de carbono de seus membros, e lançou um sistema de coleta de dados (GNR, na sigla em inglês: *Getting the Number Right*) quanto ao desempenho das plantas de cimento em termos de emissões de CO₂ e consumo de energia, não restrito aos seus membros, mas aberto a todo o setor cimenteiro. Companhias distribuídas geograficamente na Europa, América e Índia, perfazendo aproximadamente 70% da produção anual de cimento, sem considerar a produção chinesa (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, p. 4), fornecem dados a esse sistema sobre suas emissões brutas (excluídas as derivadas da biomassa) e líquidas (excluídas as derivadas da biomassa e dos combustíveis alternativos) de CO₂ por tonelada de clínquer e de cimento produzidos (emissões específicas de dióxido de carbono), suas emissões absolutas brutas e líquidas de CO₂, seu consumo energético térmico por tonelada de clínquer produzido (consumo térmico específico), seu consumo energético elétrico por tonelada de cimento produzido (consumo elétrico específico),

seu mix de combustíveis (fósseis, rejeitos fósseis e biomassa) e a proporção de clínquer no cimento (relação entre a quantidade de clínquer pela quantidade de cimento, em massa, denominada de fator clínquer).

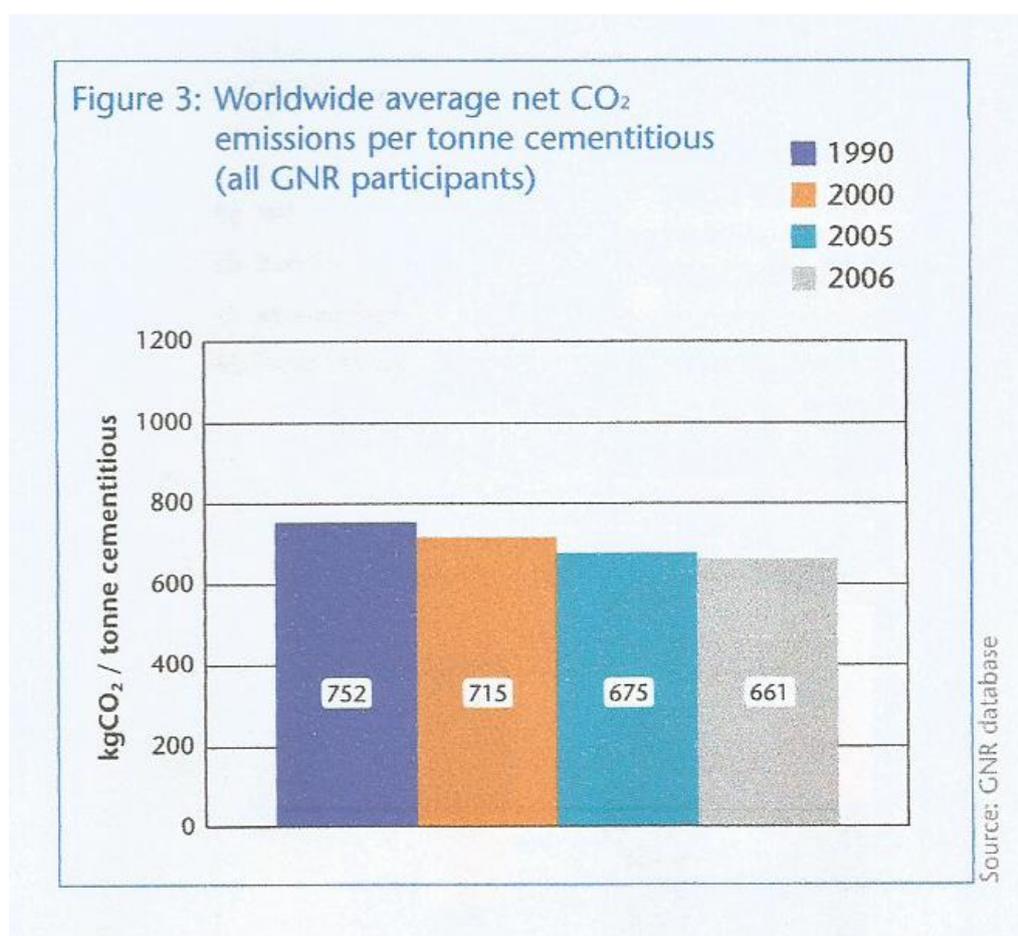
Esse sistema de coleta de dados apontou prontamente que algumas companhias cimenteiras mundiais haviam implementado em suas plantas medidas e tecnologias para reduzir suas emissões de gás carbônico. Os dados coletados no período de 1990 a 2006 pela CSI (WBCSD, 2008, p. 4) já indicaram que, apesar da produção de cimento e das emissões absolutas de CO₂ pelo setor terem aumentado (Gráfico 7), as emissões não cresceram no mesmo passo da produção, devido aos melhoramentos na intensidade de emissões no processo de produção entre os participantes do GNR: em 2006, houve 661kg de CO₂ emitidos para cada tonelada de cimento produzida, 12% menos do que a quantidade emitida em 1990 (Gráfico 8). Segundo a USGS (2008) e o IEA, essa tendência de descolamento entre a produção mundial de cimento (54%) e as emissões de CO₂ (42%), entre 2000 e 2006, ocorreu também em nível global. Em 2006, a produção global de cimento foi de 2,55 bilhões de toneladas, enquanto que as emissões absolutas de CO₂ pela indústria cimenteira mundial atingiram 1,88 bilhões de tonelada, advindas das emissões diretas de energia e do processo de fabricação (IEA/WBCSD, 2009, p.2).

Gráfico 7 - Evolução da produção de cimento e das emissões de CO₂ entre os participantes do GNR, passando pelos anos 1990, 2000, 2005 e 2006



Fonte: WBCSD (2008, p. 4).

Gráfico 8 - Médias das emissões líquidas de CO₂ por tonelada de cimento em 1990, 2000, 2005 e 2006 entre os participantes do GNR



Fonte: WBCSD (2008, p. 4).

A despeito dessa perspectiva positiva de descolamento no setor cimenteiro, as emissões absolutas de CO₂ pelo setor continuarão a crescer em decorrência do aumento mundial projetado da produção de cimento, caso não haja mudanças no ambiente de negócios. Ainda mais se considerarmos que o maior fabricante de cimento no mundo, a China, não participa do GNR e, portanto, seus dados estão baseados numa amostragem parcial, não refletindo a realidade no setor. De acordo com o relatório do *World Wildlife Fund* (WWF) e Lafarge⁵⁰, o crescimento projetado das emissões de CO₂ provenientes da produção de cimento entre 1990 e 2050 será de 260%, num cenário sem mudanças (*business as usual*). Tal tendência de crescimento absoluto das emissões de CO₂ pelo setor cimenteiro choca-se com a

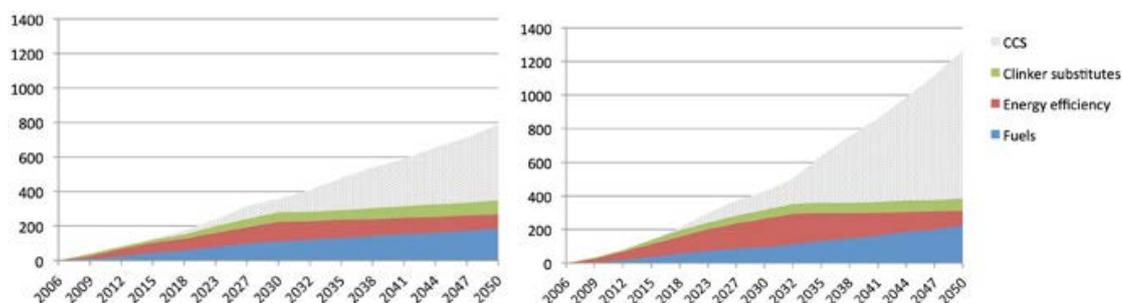
⁵⁰MÜLLER, J.H. **A blueprint for a climate friendly cement industry**, 2008. Disponível em: <http://assets.panda.org/downloads/english_report_lr.pdf>.

principal recomendação do IPCC para o desenvolvimento sustentável, presente na pauta de negociações desde a década de 2000: cortar pela metade as emissões globais de CO₂ até 2050, em relação aos níveis de 1990, para evitar o aumento superior a dois graus centígrados em relação à temperatura média da Terra na era pré-industrial (VEIGA, 2013, pp. 79-80).

Em razão disso, a CSI uniu-se aos esforços da Agência Internacional de Energia (IEA), que, desde 2008, tem liderado a iniciativa para desenvolver um conjunto de mapeamentos das tecnologias de baixo carbono aplicáveis aos vários setores industriais para reduzir suas emissões de CO₂. O estudo do IEA apontou que a recomendação do IPCC de cortar as emissões de CO₂ pela metade até 2050 em relação aos níveis de 1990 requereria a redução de 18% das emissões de CO₂ pelo setor cimenteiro em relação ao ano de 2006 (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, p. 4).

O mapeamento das tecnologias mitigadoras no setor cimenteiro (*cement technology roadmap*) baseiou-se num conjunto de artigos tecnocientíficos desenvolvidos pela *European Cement Research Academy* (ECRA), financiado pelo CSI. Esses artigos delinearão as tecnologias disponíveis e potenciais, seus custos estimados, períodos para implementação e potenciais de redução. Quatro medidas tecnológicas para a redução das emissões de CO₂ são destacadas: eficiência térmica e elétrica, uso de combustíveis alternativos, substituição do clínquer e captura e estoque de carbono (CCS). Todas essas tecnologias precisam ser aplicadas conjuntamente pelo setor cimenteiro para que as emissões sejam reduzidas significativamente (Gráfico 9). Ainda sim, segundo o mapeamento, a indústria cimenteira não será neutra em carbono (IEA/ WBCSD, 2009, p. 3).

Gráfico 9 - Projeções das reduções das emissões de CO₂ no setor cimenteiro de 2006 a 2050 pela incorporação das tecnologias da eficiência energética, uso de combustíveis alternativos, substituição de clínquer por SCM e captura e armazenamento de carbono, nos cenários de baixa e alta demanda por cimento



Fonte: IEA/CSI (2009) apud Scrivener, John e Gartner (2016, p. 5).

Se a via da ecoeficiência será suficiente para se alcançar o desenvolvimento sustentável é ainda uma questão em aberto. Existem evidências favoráveis e contrárias. Nos Estados Unidos e na Grã-Bretanha, a atual intensidade energética é 40% menor à de 1980, o que também levou a fortes quedas de intensidade carbono no período. Apesar disso, as emissões de dióxido de carbono resultantes do uso de energias fósseis aumentaram 80% desde 1970. Em 2009, elas eram 40% maiores às de 1990, ano de referência do Protocolo de Kyoto (VEIGA, 2013, p. 97). Os dados apontam que parece não haver uma correlação entre os usos absolutos e relativos dos recursos naturais. Além disso, a poupança obtida com o aumento da eficiência energética tende a ser empregada no consumo de outros bens e serviços, num esforço de soma zero. Sendo assim, o avanço tecnológico não parece dar conta de dois fatores que mais contribuem para o impacto ambiental das atividades humanas: o crescimento populacional e o aumento nos níveis de consumo (ibid., pp. 97-98).

O primeiro estudo a apontar o descolamento entre o uso de recursos naturais e o crescimento da economia foi publicado em 2011 por Chris Goodall, intitulado “Peak Stuff”, relativo ao Reino Unido. Baseado nas séries estatísticas das contas de fluxos de materiais do “Office of National Statistics”, que consideram três tipos de insumos usados na economia para a geração de valor (biomassa, minerais e combustíveis fósseis), o pesquisador elaborou três índices compostos: extração doméstica total (TDE, na sigla em inglês: *total domestic extraction*); consumo material direto (DMC, na sigla em inglês: *direct material consumption*), que

acrescenta importações e deduz exportações do TDE; e requerimentos totais de materiais (TMR, na sigla em inglês: *total material requirements*), que incorpora estimativas dos materiais utilizados em outros países para produzir os bens importados pelo Reino Unido. Os resultados do estudo de Godall para o período 2001-2009 podem ser vistos na Tabela 1 (VEIGA, 2013, pp. 98-100).

Tabela 1 - Mudanças nos níveis de insumos materiais na economia do Reino Unido (milhões de toneladas e porcentagens)

	TDE ¹	DMC ²	TMR ³
2001	663	700	2.174
2007	557	679	2.091
2009	458	566	1.755
2007 como porcentagem de 2001	84%	97%	96%
2009 como porcentagem de 2001	69%	81%	81%

¹ TDE (*Total Domestic Extraction*) = extração doméstica total.
² DMC (*Direct Material Consumption*) = acrescenta importações e deduz exportações, indicando o consumo material direto.
³ TMR (*Total Material Requirements*) = incorpora estimativas dos materiais utilizados em outros países para produzir os bens importados pelo Reino Unido.
 Fonte: Goodall (2011: 5), com base em “Material Flow Accounts for the UK, 1970 to 2009, Office of National Statistics (ONS)”.

Fonte: Veiga (2013, p. 138).

Importante registrar que a população do Reino Unido aumentou 2,4% entre 2003 e 2007 e que os dados relativos a 2009 refletem a recessão mundial iniciada em 2008. Notamos nos resultados que a reversão de tendência no consumo de recursos iniciou-se anteriormente a 2007, ano de pico do PIB do Reino Unido (ibid.), constatação que pode ser feita nos picos de consumo de alguns insumos antes deste ano (Tabela 2).

Tabela 2 - Anos de pico no uso de oito insumos pela economia do Reino Unido

Insumo	Ano
Água ¹	2003-2004
Energia	2001
Lixo ²	2002-2003
Papel ³	2000
Alimentos	2002-2003
Carnes	2003-2004
— Cimento	1989
Fertilizantes ⁴	1985-1987

¹ Inglaterra e País de Gales.
² Doméstico e industrial.
³ E outros produtos que usam a mesma matéria-prima (“wood pulp”).
⁴ O pico do nitrogênio aconteceu em 1987. O do fosfato foi bem anterior, com um primeiro pico em 1971 e outro, um pouco inferior, em 1985.
 Fonte: Goodall (2011), com base em diversas estatísticas.

Fonte: Veiga (2013, p. 139).

Vemos que, apesar de ser uma questão em aberto, a via da ecoeficiência parece ser a única opção que tem sido adotada pelo setor cimenteiro para perseguir o desenvolvimento sustentável. A aposta em soluções tecnológicas mostra o peso da perspectiva de valor do progresso tecnológico na adoção de soluções sustentáveis pelo setor. Em razão disso, as pesquisas científicas sobre a ecoeficiência de cimentos e aglomerantes cimentícios alternativos (investigações que embasaram os artigos da ECRA e que serviram de base para o mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD, bem como pesquisas de vários autores relacionadas com as tecnologias mapeadas) são motivadas por essa perspectiva do progresso tecnológico. Não se podia esperar a perseguição de outra via para o desenvolvimento sustentável pelo setor cimenteiro do que a via da ecoeficiência, devido à sua promessa de contrabalançar os impactos ambientais do aumento do consumo do cimento com os melhoramentos tecnológicos em sua produção.

A via da ecoeficiência enseja, no campo das pesquisas científicas, investigações tecnocientíficas voltadas a produzir inovações, atendendo, dessa forma, tanto à perspectiva de valor do capital e mercado quanto à perspectiva de

valor do progresso tecnológico, ambas dominantes nas sociedades industriais contemporâneas. Essas duas perspectivas agindo conjuntamente em relações mutuamente reforçadoras com as investigações científicas e tecnológicas sobre a ecoeficiência dos aglomerantes, delineiam um escopo de objetos de pesquisa, que vem atender aos interesses da indústria cimenteira. Por isso, essas pesquisas podem ser caracterizadas como tecnocientíficas comercialmente orientadas, segundo o modelo teórico de referência (LACEY, 2014, pp. 675-676).

É de se esperar que as pesquisas custeadas pelo setor cimenteiro tenham como propósito principal tornar o cimento Portland um produto mais ecoeficiente ou desenvolver novos tipos de aglomerantes por meio de processos tecnológicos, conhecidos ou ainda incipientes, que possam ser facilmente aplicados e adaptados a uma planta moderna de produção de cimento. Mas, é importante ressaltar, para as finalidades dessa dissertação, que as alternativas tecnológicas da via da ecoeficiência que serão analisadas e comentadas assumem um pressuposto ainda não comprovado empiricamente. O pressuposto é o de que o aumento do consumo dos aglomerantes não levará ao aumento das emissões de CO₂ pelo setor no longo prazo (estipulado como o período temporal até 2050). Se a via da ecoeficiência é o caminho adequado para o desenvolvimento sustentável no setor cimenteiro, esse pressuposto deverá ser empiricamente confirmado, por meio de modelagens matemáticas cada vez mais refinadas, com cada vez mais dados empíricos confiáveis, que, no médio prazo, retornem projeções de que a meta de 18% de reduções das emissões de CO₂ pelo setor será claramente alcançada em 2050.

Essas questões e hipóteses do trabalho serão avaliadas nas seções seguintes.

Desde já podemos notar que a perspectiva de valor da sustentabilidade assumida pelo setor cimenteiro é a de desenvolvimento sustentável baseado nos três pilares (econômico, social e ambiental). Isto porque as preocupações com o meio ambiente (pesquisa e desenvolvimento de cimentos e aglomerantes ecoeficientes) são colocadas lado a lado com as preocupações com a economia e a sociedade, vistas sob os vieses das perspectivas de valor do capital e mercado, e do progresso tecnológico. Veremos que, em cada seção devotada a uma solução tecnológica para o desenvolvimento sustentável no setor cimenteiro, as avaliações quanto aos limites econômicos para sua implementação, seja em termos de custos de investimentos e operacionais, seja em termos de preços dos produtos, matérias-

primas e combustíveis nas condições presentes e futuras de mercado (IEA/WBCSD, 2009, pp. 6-16), estarão sempre presentes, condicionando sua adoção. Em razão disso, são feitas recomendações sobre políticas governamentais de incentivo fiscal para promover a adoção das tecnologias mais eficientes disponíveis para a montagem e reforma de fornos, para o maior uso de combustíveis alternativos, para aumentar a substituição de clínquer no cimento, bem como para promover o desenvolvimento da tecnologia de captura e estoque de carbono e a pesquisa e desenvolvimento de alternativas tecnológicas (ibid., pp. 17-21). Um capítulo do mapeamento tecnológico do setor cimenteiro é inteiramente dedicado ao suporte financeiro necessário para implementação das tecnologias mais ecoeficientes (Ibid., pp. 22-23).

Por outro lado, essas preocupações econômicas relacionadas às tecnologias em estudo são justificadas em termos sociais pela razão de que os cimentos ecoeficientes e os aglomerantes alternativos devem manter preços baixos no médio e longo prazos, para serem usados em larga escala por comunidades pobres, em especial nos países em desenvolvimento, que necessitam urgentemente expandir seu ambiente construído para melhorar as condições de vida de suas populações (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, 1-3).

A argumentação por trás desses relatórios parece ser a de que o modelo de negócios do setor no longo prazo continuará pautado pelo cálculo do custo/benefício de seus produtos, que deverão manter sua competitividade (perspectiva de valor do capital e mercado), a despeito da incorporação de externalidades econômicas, como o custo das emissões de CO₂ (perspectiva de valor da sustentabilidade). Isto deve ser assegurado pela pesquisa e desenvolvimento que vêm sendo realizados sobre cimentos e aglomerantes ecoeficientes (perspectiva de valor do progresso tecnológico à luz da perspectiva de valor do capital e mercado e da perspectiva da sustentabilidade). Por sua vez, esse modelo de negócios é justificado pela expectativa de desenvolvimento socioeconômico que pode implicar: aumento do padrão de vida das populações dos países em desenvolvimento (valor da justiça social) pelo aumento do consumo *per capita* por aglomerante. Nessa argumentação, os aspectos ambiental e social parecem estar em função do aspecto econômico na formulação de desenvolvimento sustentável baseado nos três pilares.

Essas relações entre os aspectos econômico, social e ambiental do desenvolvimento sustentável serão alvo dos comentários a serem feitos sobre cada solução tecnológica estudada nesta dissertação, bem como a pressuposição de que essas tecnologias serão capazes de assegurar o modelo de negócios sustentado pelo setor para o desenvolvimento sustentável.

A hipótese do rebaixamento do meio ambiente no contexto das pesquisas e desenvolvimentos sobre aglomerantes ecoeficientes parece ficar ainda mais evidente com o negligenciamento dos impactos regionais e locais da indústria cimenteira nos relatórios da CSI, WBCSD, IEA e UNEP. Apesar de existirem algumas pesquisas isoladas sobre poluentes, particulados, metais e toxinas emitidos na produção de cimento, seu impacto no meio ambiente e na saúde pública, e sobre tecnologias para seu gerenciamento e controle, esses estudos são quase completamente negligenciados nos relatórios de desenvolvimento sustentável do setor, concentrados sobremaneira na questão das emissões de dióxido de carbono e suas implicações.

Todas essas questões serão mais bem avaliadas com a descrição, análise e comentário de cada solução endossada pelo setor para diminuir seu impacto ambiental global nas seções a seguir.

3.3 Estratégias para redução das emissões de CO₂

As emissões de dióxido de carbono pela indústria cimenteira são basicamente a soma do CO₂ emitido durante o processo de calcinação, quando ocorre a descarbonatação do calcário originando os silicatos e aluminatos de cálcio do clínquer (RM-CO₂, na terminologia em inglês: CO₂ derivado das matérias-primas), e o CO₂ originado do uso de energia, seja a energia elétrica para operar a planta de cimento (IEB-CO₂, dióxido de carbono derivado do uso de energia indireta), usada para o funcionamento dos moinhos e de outras operações, seja a energia associada ao combustível usado para a combustão no forno de cimento (DEB-CO₂, dióxido de carbono derivado do uso da energia direta). A Tabela 3 apresenta um resumo dos valores encontrados na literatura técnica para esses índices (VAN DEN HEEDE; DE BELLE, 2012, p. 432)

Tabela 3 - Compilação das emissões de CO₂ (e sua distribuição entre RM-CO₂, IEB-CO₂ e DEB-CO₂), SO_x, NO_x e CKD derivadas da produção de cimento* ou clínquer**, com base nos dados de revisão bibliográfica

Ref.	RM-CO ₂	IEB-CO ₂	DEB-CO ₂	Total
[4]	-	-	-	870 g/kg*
[6]	530 g/kg**	310-600 g/kg**		840-1150 g/kg**
[8]	50%	50%		810 g/kg*
[9]	59%	6%	35%	800 g/kg*
[10]	57%	6%	37%	-
[11]	50%	0-10%	40-50%	-
[12]	-	80 g/kg*	-	-
[13]	-	-	-	820 g/kg*
[14]	-	-	-	690 g/kg*
[15]	-	-	-	810 g/kg*
[16]	425 g/kg*	80 g/kg*	390 g/kg	815 + 80 g/kg*
			Mean value	842 g/kg*
<u>SO₂</u>				
[9]	0.40-0.60 g/kg*			
[14]	0.82 g/kg*			
[15]	0.58 g/kg*			
[19]	0.27 g/kg**			
[20]	0.54 g/kg**			
Mean value	0.53 g/kg*			
<u>NO_x</u>				
[9]	2.40 g/kg*			
[11]	10.00 g/kg**			
[14]	1.20 g/kg*			
[15]	1.50 g/kg*			
Mean value	3.65 g/kg*			
<u>CKD/PM</u>				
[14]	0.49 g/kg*			
[15]	0.04 g/kg*			
[19]	150-200 g/kg**			
Mean value	83.3 g/kg*			

Fonte: Van den Heede e De Belle (2012, p. 432).

Grosso modo, pode-se afirmar que 95% das emissões de CO₂ advindas da indústria cimenteira estão associadas ao processo de produção do clínquer, sendo que apenas 5% estão associadas ao transporte das matérias-primas e os produtos finais. Habert et al. (2010, pp. 820-821) reportam que, durante o processo de produção, cerca de 0,92 toneladas de CO₂ é emitida para cada tonelada de clínquer produzido. Dessa emissão, a descarbonatação participa com 0,53 toneladas (57,6%)

e o uso de combustíveis baseado no carbono para o aquecimento do forno é responsável por 0,39 toneladas (42,3%). Já, as emissões associadas com os processos de moagem das matérias-primas e do clínquer são, em média, da ordem de 0,1 tonelada de CO₂ para cada tonelada de cimento (ibid.).

Com base nesses números, vemos que as principais estratégias para reduzir as emissões de CO₂ associadas com a produção de cimento são aquelas relacionadas com a redução das emissões advindas da produção de clínquer e aquelas relacionadas com a redução da quantidade de clínquer no cimento. Com relação ao primeiro tipo de estratégias, destacam-se a eficiência energética, o uso de combustíveis alternativos, o uso de matérias-primas alternativas e a captura e sequestro de carbono. Pela natureza dessa dissertação, a eficiência energética, o uso de combustíveis alternativos e a captura e sequestro de carbono serão brevemente comentadas com vistas ao seu potencial de redução do consumo de recursos materiais e energéticos e das emissões de CO₂, aos valores não cognitivos e às perspectivas de valor que endossam, e aos pressupostos empiricamente testáveis que carregam. O foco da dissertação estará na análise e discussão das estratégias voltadas ao uso de matérias-primas alternativas para a fabricação de clínquer e à redução de clínquer no cimento, que deverão propiciar a argumentação para responder as principais hipóteses de trabalho desta dissertação.

3.3.1 Eficiência energética na produção de cimento

A eficiência energética da planta de cimento depende sobretudo do tipo de forno (Tabela 4). Quatro processos tecnológicos são atualmente predominantes: via úmida, via semi-seca; via seca com pré-aquecedores; e via seca com pré-aquecedores e pré-calcinadores. A diferença básica entre eles é que, na via úmida, a farinha de matérias-primas entra úmida no forno, enquanto, na via seca, a farinha úmida passa por pré-aquecedores, uma série de ciclones verticais formados pelos gases quentes exauridos dos fornos que se movem em direções opostas, sendo pré-aquecida antes de entrar no forno, o que faz com que as reações químicas de clinquerização ocorram mais rapidamente e com maior eficiência. Por sua vez, os pré-calcinadores são câmaras de combustão sobre os fornos, onde ocorre parte da decomposição do calcário, envolvendo de 60 a 65% do total de emissões de CO₂,

promovendo a maior eficiência energética na produção de clínquer (IEA /WBCSD, 2009, p. 4).

Tabela 4 - Uso de energia para diferentes tipos de fornos com base na literatura

Process type	Specific energy consumption (MJ/t _{clinker})
Wet process long kiln	5000–6000
Semi-dry process	3300–4500
Dry process kiln with preheater	3100–4200
precalciner kiln and dry process rotary kiln equipped with multistage cyclone preheater	3000
Optimal entropy related virtual kiln	1800

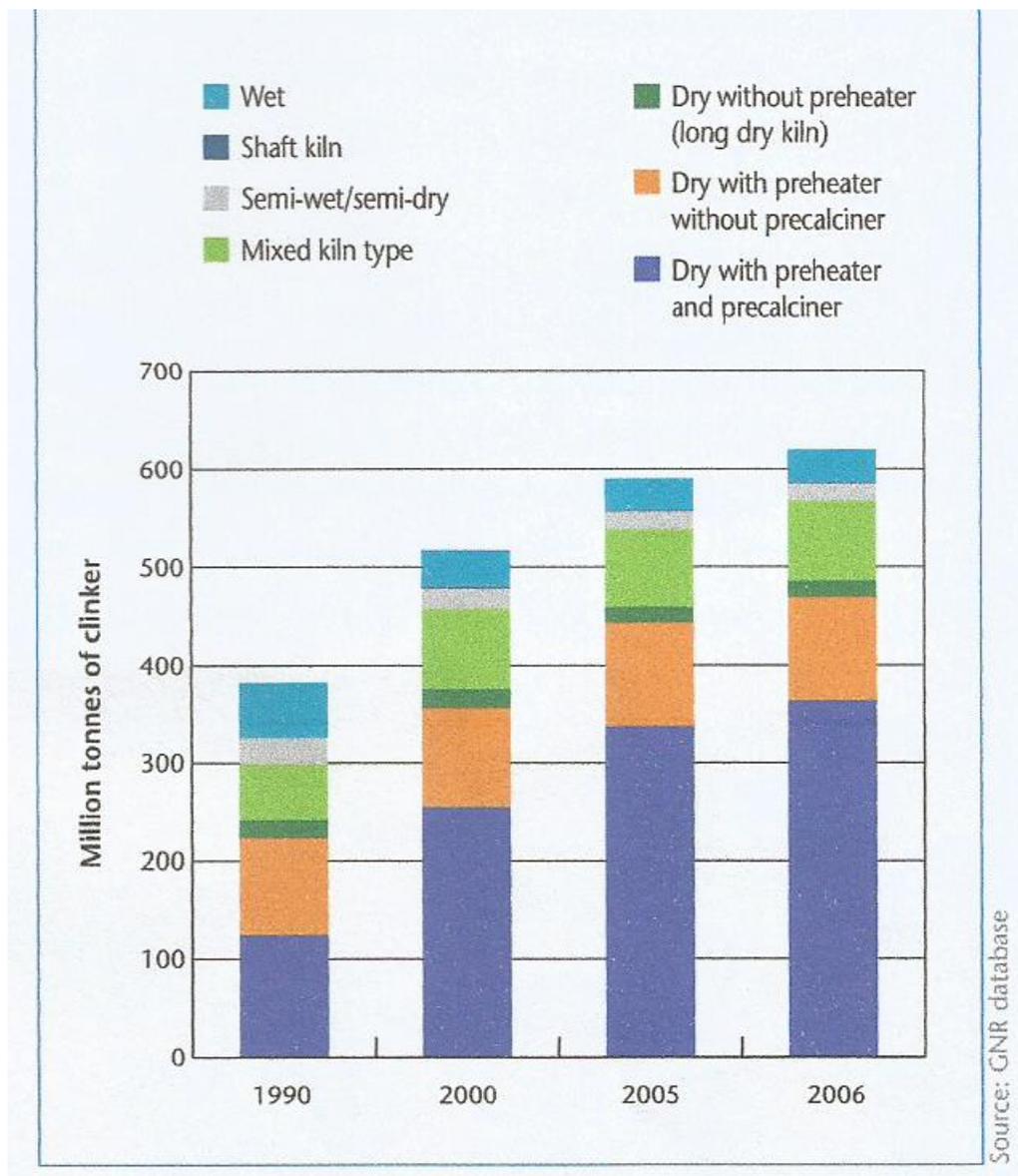
Fonte: Habert et al. (2010, p. 822).

Um forno rotatório baseado nas mais eficientes tecnologias (via seca com pré-aquecedores e pré-calcinadores) requer uma energia específica de 2,9 a 3,3 trilhões de joules por tonelada de clínquer (GJ/t) (SCHNEIDER et al., 2011, p. 643). Esse forno tipicamente moderno, queimando combustíveis fósseis, como carvão, óleo e coque, emite aproximadamente 0,31 kg de CO₂ para cada quilo de clínquer produzido (DAMTOFT et al., 2008, p. 117). Já, um forno com consumo específico de energia mais comum requer, em média, 3,8GJ/t, emitindo aproximadamente 0,37kg/kg de clínquer. Por fim, o forno rotatório mais ineficiente consome 6GJ/t, emitindo 0,6kg/kg de clínquer (ibid.).

A crise do petróleo de 1973 forçou a indústria cimenteira ocidental a reduzir sua dependência desse combustível e a buscar a maior eficiência energética de seus fornos, com a adoção de tecnologias mais modernas de produção, como o da via seca com pré-aquecedores e pré-calcinadores. Com isso, a média da energia específica requerida para a produção de clínquer caiu 10% na década de 1970 na Europa, sendo que essa taxa evoluiu menos nas duas décadas seguintes, devido aos altos investimentos envolvidos na construção de novas plantas (HABERT et al., 2010, p. 822). Entre os membros do CSI, houve uma intensa marcha para o processo de via seca de 1990 a 2006 (Gráfico 10), de modo a torná-lo padrão (WBCSD, 2008, p. 5). O consumo de energia térmica específica média no forno entre os membros da CSI passou de 3,605GJ/t em 1990 para 3,380GJ/t em 2014,

uma redução de 6% (225MJ/t) em 16 anos (ECRA/CSI, 2017, p. 9). De 1990 a 2014, a produção de cimento via úmida entre os participantes do GNR caiu de 61 milhões para 16 milhões de toneladas (queda de 74%) e a proporção do clínquer produzido com mais de 4 GJ/t passou de 38% para 7% (queda de 31%) (WBCSD, 2016, p. 12).

Gráfico 10 - Evolução da produção de clínquer por tipo de forno entre os participantes do GNR



Fonte : WBCSD (2008, p. 5).

Considerando que a vida útil de um forno de cimento vai usualmente de 30 a 50 anos, novos fornos, com as mais modernas tecnologias, são construídos apenas nos lugares onde o mercado de cimento está em alta, como alguns países da Ásia,

da Europa Oriental e da América Latina. Por outro lado, como a modernização tecnológica dos equipamentos para os fornos de cimento é contínua, a cada 20 ou 30 anos a maioria dos equipamentos num dado forno foi substituída (ECRA/CSI, 2017, p. 8). No entanto, apenas as modernizações relativas à mudança de processo de fabricação (passagem da vida úmida para a vida seca) possibilitam um ganho significativo em termos de eficiência energética, requerendo, porém, um montante de investimento similar ao requerido para a construção de um novo forno. Por isso, apenas onde a situação do mercado é promissora ou onde os equipamentos são bastante antigos, é possível ocorrer a transição de um forno de cimento para as tecnologias mais eficientes disponíveis (ibid.).

Podemos concluir, portanto, que o que move a indústria cimenteira para adotar tecnologias menos intensivas em energia térmica são basicamente razões econômicas (crise do petróleo, crescimento do mercado e custo/benefício do investimento em tecnologias mais avançadas). Sendo assim, podemos supor que o ganho ambiental, em termos do menor consumo de recursos energéticos e de menor emissão de CO₂ na produção, derivado dessa transição em marcha, não está entre as razões principais para a decisão ou não dos investimentos em tecnologias mais modernas, mas tem sido capitalizado pela indústria em campanhas de marketing e de responsabilidade social e ambiental, com a consolidação social cada vez maior da perspectiva da sustentabilidade.

Além da transição da via úmida para a via seca, outras soluções tecnológicas despontam no horizonte do setor cimenteiro para a redução do consumo térmico em suas plantas. Uma dessas soluções é a redução do tamanho dos fornos, solução tecnológica não aplicável atualmente por razões de mercado, devendo as instalações típicas permanecer entre 4000 e 7000 toneladas por dia (SCHNEIDER et al., 2011, p. 643). Outra solução tecnológica que vem sendo estudada é o uso de oxigênio puro, ao invés de ar, nos fornos. Isto reduziria o volume de gases exalados dos fornos e a perda de energia associada em quase três vezes (DAMTOFT et al., 2008, pp. 118-119), aproximando o consumo térmico específico de um forno de cimento de seu consumo teórico mínimo. O consumo teórico mínimo de energia térmica para as reações químicas e mineralógicas no forno é aproximadamente de 1,8GJ/t (HABERT et al., 2010, p. 822), devido às leis das reações endotérmicas entre as matérias-primas para a formação de fases estáveis do clínquer. Energia

térmica adicional entre 200 e 1000MJ/t de clínquer é requerida, em correlação com a porcentagem de umidade nas matérias-primas, que varia de 3 a 15% do seu volume. Conseqüentemente, uma energia teórica mínima entre 1,850 e 2,800GJ/t de clínquer é necessária para sua produção (ECRA/CSI, 2017, pp. 8-9).

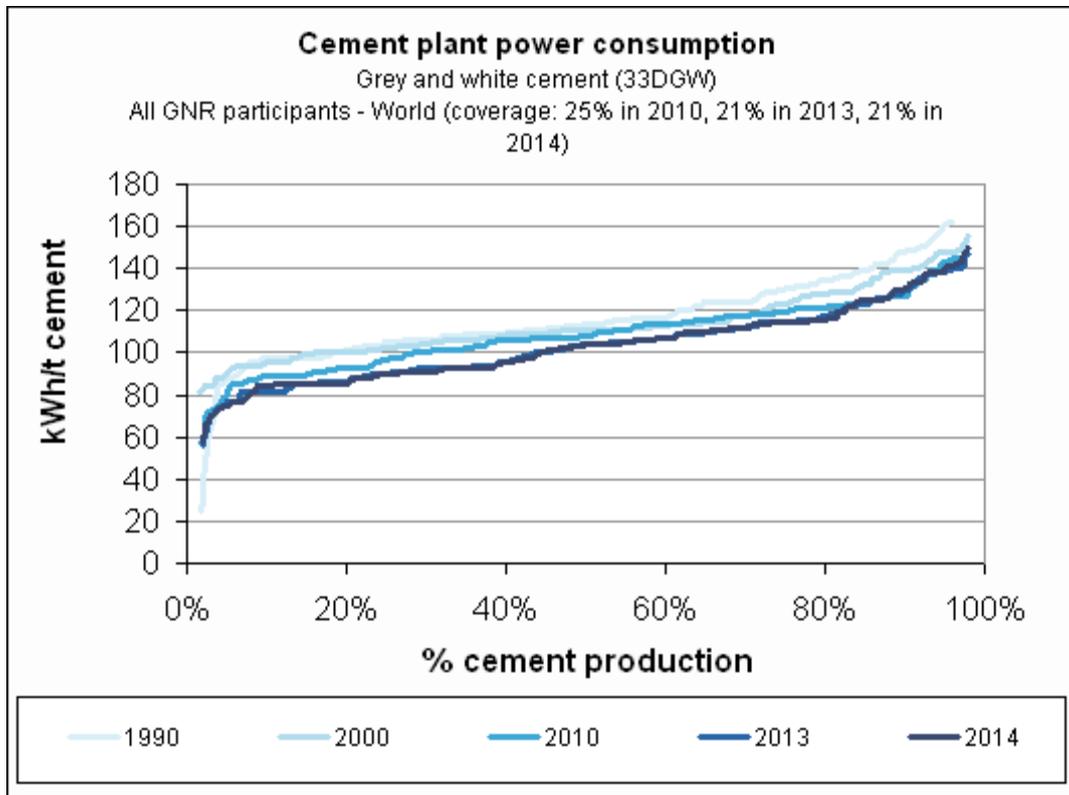
Adicionalmente, como o que seria exalado dos fornos com oxigênio puro seria basicamente uma mistura de CO₂ e vapor de água, essa mistura poderia ser facilmente liquefeita para sua injeção em aquíferos, numa alternativa tecnológica para a captura e sequestro de CO₂ (DAMTOFT et al., 2008, pp. 118-119). A contrapartida viria do maior consumo de energia elétrica para a produção de oxigênio puro, cerca de 420kwh por tonelada de oxigênio produzido, que poderia contrabalançar os efeitos positivos de seu uso nos fornos (ibid.). Abordagens conceituais relativas ao projeto dessas plantas de cimento com uso de oxigênio estão sendo atualmente estudadas, envolvendo diversas questões não resolvidas, e seu desenvolvimento depende de altos investimentos (ibid.). O certo é que tecnologias revolucionárias que poderiam levar a um avanço significativo em termos de eficiência térmica nos fornos de cimento, aproximando-a da eficiência teórica mínima, estão fora de nosso alcance (ECRA/CSI, 2017, p. 10), tanto por razões econômicas quanto por razões técnicas. Elas se constituem em apostas tecnológicas de longo prazo do setor para reduzir o consumo de energia e as emissões de CO₂. Como tal refletem a postura típica da perspectiva de valor do progresso tecnológico de que os problemas e efeitos colaterais advindos da implantação de certas tecnologias serão resolvidos pela pesquisa, desenvolvimento e implantação de novas tecnologias (LACEY, 2008, pp. 162-164). Este é um pressuposto fundamental da perspectiva de valor do progresso tecnológico que não foi ainda comprovado empiricamente, mas que é assumido como se fosse por todos que defendem que a tecnologia é a solução para todos os males que afetam a humanidade. A necessidade de confirmação desse pressuposto ganha contornos ainda mais urgentes com a emergência e consolidação da perspectiva de valor da sustentabilidade, que nos têm alertado sobre os problemas ambientais locais, regionais e globais advindos do atual estágio tecnológico da humanidade.

Com relação à energia elétrica usada na produção de cimento, em média seu consumo específico numa planta de cimento gira em torno de 111kwh/t, sendo que apenas 10% dessas plantas atingiram a maior eficiência energética elétrica, com consumo elétrico específico de 89kwh/t (IEA/WBCSD, 2009, p. 6). Com base nos

dados do GNR, esses números são de 104kWh/t e de 85kWh/t, respectivamente, para o período de 2012 e 2014, sendo que houve uma melhora de 10kWh/t no consumo elétrico médio nos últimos 12 anos. (Gráfico 11) (ECRA/CSI, 2017, p. 11).

O total de energia elétrica consumida numa planta de cimento com o processo de via seca é dividido entre: cerca de 2% para a extração das matérias-primas, 25% para a preparação dessas matérias-primas, 25% para a produção de clínquer, 3% para a moagem dos combustíveis, 43% para a moagem do cimento e 3% para o empacotamento e carregamento (ECRA/CSI, 2017, p. 11). Como mais da metade desse consumo é usada nos processos de cominuição das matérias-primas, do carvão e do cimento, as tecnologias de moagem têm forte impacto no consumo total de energia elétrica numa planta de cimento. Devido ao fato de a distribuição granulométrica das partículas de cimento ter forte influência na trabalhabilidade e no ganho de resistência do cimento, esse parâmetro é determinante na escolha do tipo de moinho (moinho de bolas, moinho vertical de rolos e moinho giratório de alta pressão), em função das exigências do mercado de cimento de cada país e região, bem como do consumo de energia elétrica numa planta de cimento. Em mercados onde o portfólio de produtos é marcado por cimentos com altas resistências iniciais e finais, o consumo de energia elétrica na planta pode aumentar ainda que a eficiência energética dos equipamentos elétricos tenha melhorado. Por isso, a transição para equipamentos com melhor eficiência elétrica (como a substituição de moinhos de bolas por moinhos verticais de rolos ou moinhos giratórios de alta pressão) é determinada basicamente por questões de mercado (ECRA/CSI, 2017, pp. 11-12), como o custo da energia elétrica, o portfólio de produtos demandados e a situação econômica de um país ou região no curto, médio e longo prazo.

Gráfico 11 - Gráfico do consumo específico médio de energia elétrica numa planta de cimento em função da distribuição cumulativa de frequências da planta mais eficiente para a menos eficiente nos anos de 1990, 2000, 2010, 2013 e 2014



Fonte: WBCSD (2016, p. 13).

Uma forma de aumentar a eficiência da cominuição é moer separadamente as diferentes matérias-primas para a fabricação do cimento, misturando-as posteriormente, ao invés de moê-las conjuntamente. A cominuição separada tem ainda a vantagem de permitir o maior controle das características do cimento, além de possibilitar uma diminuição da quantidade de clínquer no cimento, reduzindo, assim, as emissões de CO₂. Este processo de moagem requer, no entanto, mais equipamentos na planta e mais processos intermediários na fabricação (SCHNEIDER et al., 2011, pp. 645-646), complicando o processo de controle e requerendo resolução de questões logísticas e de investimento.

Outra medida disponível para diminuir o consumo elétrico específico na planta de cimento é o uso de aditivos químicos para auxiliar no processo de moagem. Esse uso pode levar a um ganho de eficiência em torno de 10%, por meio de sua ação na superfície das partículas, reduzindo a tendência de formação de aglomerados de partículas.

Há, assim, margem de manobra para melhorar a eficiência elétrica no setor cimenteiro com a utilização das mais modernas tecnologias disponíveis, com projeções de aumento dessa eficiência em 10kWh/t até 2030 e mais 10kWh/t até 2050 (ECRA/CSI, 2017, p. 13). Essas projeções apóiam-se fundamentalmente no melhoramento tecnológico da planta de cimento, com o uso de tecnologias modernas avançadas e em desenvolvimento. Sendo assim, essas projeções são balizadas, em conformidade com o modelo teórico de referência, pela perspectiva de valor do progresso tecnológico. Vimos na exposição acima que esse avanço tecnológico tem sido determinado prioritariamente por motivos estritamente econômicos (decisões de implementação das tecnologias mais eficientes são tomadas em termos de seus custos de investimentos e operacionalização versus os benefícios advindos em termos da redução de consumo de energia elétrica e de atendimento de demandas de mercado), sendo, em última instância, fundamentado na perspectiva de valor do capital e mercado, na acepção tomada do modelo teórico de referência. Podemos supor que a perspectiva de valor da sustentabilidade é assumida pelo setor na acepção do desenvolvimento sustentável baseado nos três pilares, uma vez que as preocupações com o meio ambiente são um aspecto avaliado correlatamente aos aspectos econômico e social. É por este viés econômico, que essas preocupações com o meio ambiente devem ganhar maior projeção nas análises de investimento do setor cimenteiro. A adoção do Acordo de Paris deve levar os países signatários a impor maiores restrições e sanções relativas às emissões de CO₂ e de poluentes ao setor econômico, mudando seus marcos econômicos. Uma das políticas em discussão nos fóruns internacionais é o imposto de carbono, um imposto cobrado sobre o teor de carbono dos combustíveis como meio econômico potencialmente eficaz para reduzir as emissões dos gases do efeito estufa.

Com respeito a pesquisas e desenvolvimentos futuros, novas abordagens de cominuição estão sendo testadas, como a cominuição por pulsos ultrassônicos. Apesar de os resultados serem promissores, mais pesquisas são necessárias, bem como sua aplicação em larga escala (ibid.). Por isso, permanece uma questão aberta como a eficiência da moagem poderá ser melhorada e aplicada industrialmente. Para esse propósito, faz-se necessária uma compreensão mais abrangente da mecânica de fratura dos constituintes do cimento, que poderá levar a

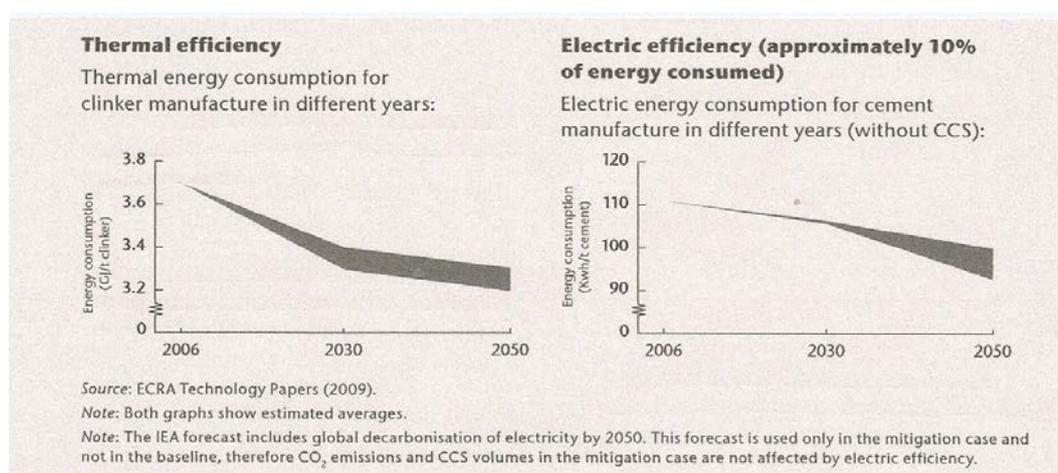
uma adaptação dos sistemas atuais de moagem ao contexto do desenvolvimento sustentável (SCHNEIDER et al., 2011, pp. 645-646). Destaca-se no trecho a relação mutuamente reforçadora entre a perspectiva de valor do progresso tecnológico, que orienta as pesquisas tecnocientíficas voltadas a melhorar a eficiência elétrica no setor (uma vez que o objetivo prático dessas pesquisas é desenvolver tecnologicamente os sistemas atuais de moagem), e o tipo de estratégias de restrição e seleção que balizam essas pesquisas (estratégias descontextualizadoras, uma vez que o objetivo teórico dessas pesquisas é gerar entendimento dos fatores subjacentes ao fenômeno da fratura).

Com as projeções de aumento nos preços da energia elétrica no período até 2050 e de aumento no seu consumo nas plantas de cimento em razão de regulamentações ambientais mais exigentes (por exemplo, menores limites para as emissões de particulados, o que exigirá equipamentos com maior poder de separação da poeira das emissões), da maior demanda por cimentos com melhores desempenhos (com menores partículas constituintes) e da adoção da captura e sequestro de carbono (estimativa de que a tecnologia aumente o consumo na planta de cimento de 50 a 120%, fazendo o consumo específico de energia elétrica saltar para 101kWh/t em 2030 e 110kWh/t em 2050, para uma taxa de implantação do CCS em 1% e de 20% da capacidade instalada, respectivamente), outras soluções tecnológicas para aumentar a eficiência energética elétrica no setor tem sido tentadas (ECRA/CSI, 2017, pp. 11-14). Uma alternativa que desponta é a da recuperação do calor perdido, que tem levado o consumo de energia elétrica na produção de clínquer cair para 30 a 45kwh/t (SCHNEIDER et al., 2011, p. 643). Na China e no Japão aquecedores para a geração de eletricidade têm sido largamente integrados aos fornos, tecnologia que tem grande potencial de expansão em outras partes do mundo (ibid.).

No entanto, as projeções do IEA/WBCSD (2009) quanto ao consumo específico de energia elétrica no setor cimenteiro no cenário futuro são bastante conservadoras, como pode ser visto no Gráfico 12, não incorporando a alternativa tecnológica de recuperação do calor perdido. No melhor cenário, o consumo específico de energia elétrica cairia para algo em torno de 105kwh/t em 2030 e de 90 kwh/t em 2050. Isto sem levar em conta as novas tecnologias intensivas em energia elétrica, que estão sendo discutidas para futura implementação na indústria, como as tecnologias de captura de carbono. Vale registrar no Gráfico 12 que a

incerteza das projeções aumenta significativamente a partir de 2030, o que pode indicar tanto uma base de dados pouco significativa ou pouco confiável quanto assunções e generalizações não devidamente embasadas empiricamente para projeções de longo prazo. Se esta for a situação, podemos pôr em questão se os padrões de avaliação dos valores cognitivos das hipóteses do modelo do IEA/WBCSD (2009) são suficientemente rigorosos para assegurar a imparcialidade dessas hipóteses do modelo, isto é, se podem ser consideradas como científicas. Esta é uma crítica a ser feita ao modelo do IEA/WBCSD (2009) advinda do modelo teórico de referência (LACEY, 1999, p. 60).

Gráfico 12 - Gráficos com as projeções de consumo de energia térmica e elétrica para uma planta de cimento com a incorporação das tecnologias mais avançadas



Fonte: IEA/WBCSD (2009, p. 7).

A compilação de dados da Tabela 5, que compara as estimativas correntes, em 2030 e em 2050, de consumo específico de energia elétrica por tipo de planta de cimento, considerando os estudos que serviram de referência para o mapeamento tecnológico de 2009 e os estudos que devem servir de referência para sua atualização, indica um avanço significativo na eficiência elétrica do setor cimenteiro, da ordem de 5% a 10%, em 2030, e de 19% em 2050, em relação a uma planta de cimento mais comum correntemente. Em relação a esses dados, vale destacar o seguinte: as projeções não incluem a tecnologia de recuperação de calor nas plantas de cimento, indicando seu baixo potencial de implantação no setor (motivos

técnicos ou econômicos?); a disparidade entre os dados para as plantas mais comuns (resultado do aumento da eficiência elétrica no setor em dez anos e conseqüentemente de sua projeção até 2030, ou fruto de levantamentos de dados mais expressivos e confiáveis no setor?); o impacto da adoção de tecnologias de captura e armazenamento de carbono pelo setor em termos do aumento de consumo de energia elétrica, a ponto de reverter os ganhos em eficiência elétrica no setor no médio e longo prazo; e, por fim, as projeções de ganhos em eficiência elétrica no setor em 2050 se equipararão a eficiência elétrica atual das plantas mais modernas de cimento, indicando que, neste quesito, não haverá maiores desenvolvimentos tecnológicos no cenário futuro, mas apenas a incorporação das tecnologias mais avançadas disponíveis. Por isso, as pesquisas tecnocientíficas que vêm sendo realizadas sobre cominuição por pulsos ultrassônicos não têm perspectivas de aplicação no setor até 2050.

Tabela 5 - Estimativas de consumo elétrico específico por tipo de plantas de cimento para 2009*, 2014***, 2030 e 2050

Tipo de planta	Consumo elétrico atual (Kwh/t)	Estimativa de consumo para 2030 (Kwh/t)	Estimativa de consumo para 2050 (Kwh/t)	Variação no consumo até 2030 (%)	Variação no consumo até 2050 (%)
Mais moderna	89* 85***	-	-	-	-
Mais comum	111* 104***	105** 94***	90** 84***	-5 -10	-19 -19
Com CCS	-	101***	110***	-3	+6
Com recuperação do calor perdido	30 a 45****	-	-	-	-

Notas:

*IEA/WBCSD (2009, p. 6);

**IEA/WBCSD (2009, p. 7);

*** ECRA/CSI (2017, pp. 11-13);

****Schneider et al. (2011, p. 643).

Já, a compilação de dados da Tabela 6, que compara as estimativas correntes, em 2030 e em 2050, de consumo específico de energia térmica por tipo de forno de cimento, considerando vários estudos, inclusive os estudos que serviram de referência para o mapeamento tecnológico de 2009 e os que devem servir de referência para sua atualização, indica que o consumo específico médio de energia térmica cairia para algo em torno de 3,3 GJ/t em 2030 e 3,2 GJ/t em 2050 (Gráfico 12), com a substituição dos fornos antigos por fornos modernos mais eficientes. Neste cenário, como vimos, as emissões específicas de CO₂ pela indústria cimenteira girariam em torno de 0,31kg/kg (DAMTOFT et al., 2008, p. 117), um avanço de 16% nas emissões específicas até 2030 no melhor cenário (Tabela 6). Em relação a esses dados, vale destacar o seguinte: a disparidade entre os dados relativos ao consumo térmico específico corrente, tanto para os fornos mais comuns (diferença de 12%) quanto para os fornos mais modernos (14%), indicando uma base de dados pouco confiável; a concordância entre os dados relativos às projeções para 2030 e 2050, mostrando que a atualização do mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD quanto ao ganho de eficiência térmica no setor no cenário futuro será bem tímida; quedas no consumo específico térmico médio da ordem de 2% em 2030 (ganho inexpressivo de eficiência térmica) e de 7% em 2050 (pouco expressivo); e, por fim, tomando-se como referência o dado de que atualmente o forno mais tecnologicamente avançado consome 3,1 GJ de energia térmica para cada tonelada de clínquer produzida, as projeções de ganhos em eficiência térmica no setor em 2030 e em 2050 ficarão abaixo desse indicador, mostrando que, neste quesito, não haverá maiores desenvolvimentos tecnológicos no cenário futuro (como o desenvolvimento e implantação de fornos ou pré-calcinadores operando com oxigênio puro), mas apenas a incorporação das tecnologias mais avançadas disponíveis; a despeito disso, a queda em intensidade específica de carbono com a transição progressiva de fornos hoje mais comuns para fornos mais modernos no setor será expressiva (16%).

Tabela 6 - Estimativas de consumo térmico específico por tipo de forno de cimento para os anos de 2008****, 2009**, 2014***, 2030 e 2050 e da respectiva intensidade de carbono

Tipo de forno	Consumo térmico atual (GJ/t)	Estimativa de consumo em 2030 (GJ/t)	Estimativa de consumo em 2050 (GJ/t)	Estimativa da intensidade de carbono (kg/kg)	Queda no consumo até 2030 (%)	Queda no consumo até 2050 (%)
Mais moderno	3,1**** 2,9 a 3,3*	3,3**	3,2**	0,31****	-	-
Mais comum	3,38*** 3,8****	3,3***	3,15***	0,37****	2	7
Mais ineficiente	5,7***	-	-	0,6****	-	-
Ideal	1,85 a 2,8***	-	-	0,18 a 0,28*****		
Queda na intensidade de carbono com a transição (%)	-	-	-	16*****	-	-

Notas:

*Schneider et al. (2011, p. 643);

**IEA/WBCSD (2009, p. 7);

***ECRA/CSI (2017, pp.8-10);

****Damtoft et el. (2008, p. 117);

*****Estimado (com base nos dados anteriores da linha da tabela) ;

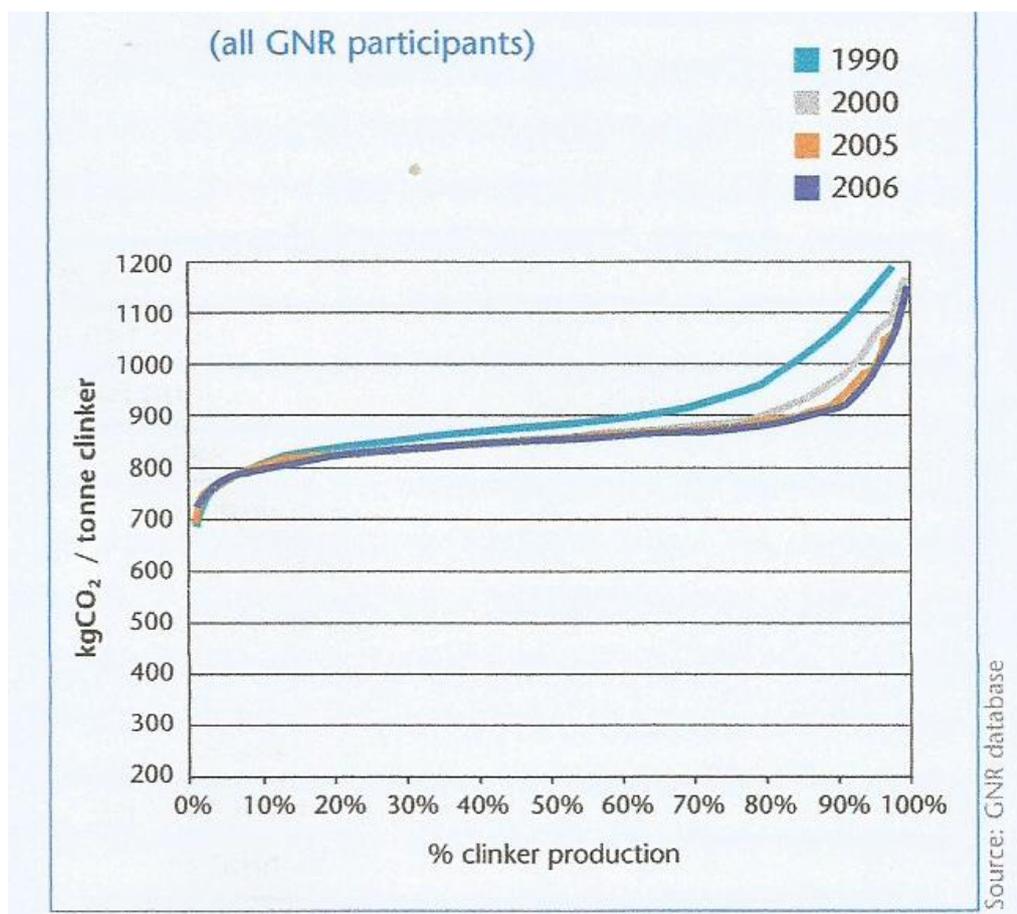
*****Estimado (com base nos dados anteriores da coluna da tabela).

Em termos absolutos, a redução nas emissões seria bem menor. O mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD (2009) projeta que a substituição progressiva da tecnologia antiga pela nova (via seca com pré-aquecedores e pré-calcinadores) na indústria cimenteira mundial fornecerá cerca de 10% da meta de 18% de redução das emissões absolutas de CO₂ pelo setor até 2050 (SCRIVENER et al., 2016, p. 5).

A razão para essa queda relativa de apenas 10% nas emissões derivadas da queima de combustíveis nos fornos deve-se ao fato de a maioria dos fornos já ter

feito a transição da via úmida para a via seca. O Gráfico 13 apresenta a intensidade específica das emissões de CO₂ variando desde os 10% dos fabricantes com melhor desempenho até os 10% com pior desempenho entre os participantes do GNR. Vemos que na região entre os 10% e os 70%, as curvas, para os anos de 1990, 2000, 2005 e 2006, são relativamente pouco acentuadas, indicando que a maioria dos fornos já apresenta desempenho similar. Sendo assim, a solução da eficiência energética tem pouco potencial para reduzir as emissões de dióxido de carbono no setor (WBCSD, 2008, p. 6).

Gráfico 13 - Gráfico das emissões específicas brutas de CO₂ em função da distribuição cumulativa de frequências da planta mais eficiente para a menos eficiente entre os participantes do GNR nos anos de 1990, 2000, 2010, 2005 e 2006



Fonte: WBCSD (2008, p. 6).

Como essa transição reduz os custos energéticos na produção de cimento, os altos investimentos requeridos não têm aumentado o custo final do cimento

(SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, p. 5), refletindo, assim, um equilíbrio entre os pilares econômico, social e ambiental do desenvolvimento sustentável endossado pelo setor.

3.3.2 Uso de combustíveis alternativos

A utilização de combustíveis alternativos, como pneus, óleos e solventes descartados, resíduos domésticos e industriais, biomassa, começou nos anos 1980 e continua aumentando sua participação na matriz energética da indústria cimenteira. Usados na produção do clínquer em substituição parcial aos combustíveis fósseis, os combustíveis alternativos apresentam um comportamento de queima bem diferente em relação aos combustíveis fósseis, por possuírem maior concentração de partículas maiores, com maior densidade e com características de transporte diferenciadas, o que pode alterar o perfil de temperatura no forno, a largura da zona de sinterização e as condições de resfriamento. Essas diferenças podem afetar, por sua vez, as características do clínquer, como seu grau de combustão, a porosidade de seus grãos, o tamanho de suas fases cristalinas e sua reatividade (SCHNEIDER et al., 2011, pp. 643-644). Outras peculiaridades dos combustíveis alternativos são seu baixo valor calorífico em geral em relação aos combustíveis fósseis e seu conteúdo de traços de produtos indesejados, como a clorina⁵¹ (ECRA/CSI, 2017, p. 16).

Por isso, ao optar pelo uso de combustíveis alternativos, a maioria dos produtores de cimentos busca aumentar seu uso nos pré-calcinadores, onde a flutuação da qualidade do combustível tem um impacto menor na qualidade do clínquer em relação a essa flutuação no forno (SCHNEIDER et al., 2011, pp. 643-644). Além disso, nos pré-calcinadores, onde quase 60% da energia térmica total usada na produção do clínquer é consumida, um valor calorífico mais baixo é requerido em relação ao dos fornos, fornecendo as condições ideais para a queima de até 60% dos combustíveis alternativos com baixo valor calorífico (ECRA/CSI, 2017, p. 16).

Além da flutuação nas condições de queima e resfriamento, e do poder calorífico em geral mais baixo, os combustíveis alternativos introduzem nos fornos

⁵¹C₂₀H₁₆N₄.

cinzas em quantidades e composições distintas dos combustíveis fósseis, como o óxido de fósforo⁵², que incorporado na solução sólida da belita na forma de fosfato de cálcio⁵³ faz com que ela não reaja com o cálcio livre nas condições de sinterização do forno, levando à formação de aglomerados de belita e cálcio livre. O aumento da quantidade de belita e a conseqüente diminuição do aluminato de cálcio no clínquer alteram o desempenho do cimento, que apresentará maior tempo de pega e menores resistência nas primeiras idades (SCHNEIDER et al., 2011, pp. 643-644). Por isso, os materiais que entram na produção e o próprio processo de produção precisam ser monitorados com maior precisão quando altas proporções de combustíveis alternativos são usadas. Com o adequado controle do processo de produção, a manufatura de cimentos Portland com alto desempenho pode ser obtida a partir da substituição parcial de combustíveis fósseis (ibid.).

As vantagens do uso dos combustíveis alternativos são de ordem econômica (redução dos custos de produção) e ambiental (redução das emissões de dióxido de carbono nos fornos de cimento e redução das emissões de gases do efeito estufa em relação à incineração e à deposição de lixo e materiais descartados na natureza). Na Tabela 7 são apresentados os valores das emissões de CO₂ em massa (gramas) por energia consumida para diferentes combustíveis usados nas plantas de cimento. Vemos que apenas a biomassa (descartes biodegradáveis, resíduos animais, florestais e agrícolas, papéis recicláveis) pode ser considerada como combustível neutro em carbono, pois a quantidade de CO₂ emitida de sua combustão e a quantidade de CO₂ absorvida pela fotossíntese em decorrência de sua produção são assumidas como em equilíbrio. No entanto, vale registrar que a transferência de materiais descartados derivados de combustíveis fósseis (solventes, plásticos e pneus usados) dos incineradores para as plantas de cimento resulta em significativa redução líquida das emissões de CO₂ devido à maior eficiência dos fornos. No caso de plantas incineradoras sem recuperação de calor, o efeito da transferência é o mesmo que o da substituição de combustíveis fósseis por combustíveis neutros em carbono (DAMTOFT et al., 2008, p. 117). Além disso, nenhum resíduo é gerado desse processo, pois as cinzas são completamente incorporadas no clínquer (ibid.). Por sua vez, emissões de aterros consistem em

⁵² P₂O₅.

⁵³ C₃P.

cerca de 60% de metano, gás com potencial de aquecimento global 25 vezes o do gás carbônico (ECRA/CSI, 2017, p. 15).

Tabela 7 - Valores de emissões líquidas de CO₂ em massa (gramas) por energia consumida (em milhões de joules) para diferentes combustíveis usados na planta de cimento

Fuel	Net CO ₂ emission factor (g _{CO₂} /MJ)
Petcoke	101
Coal	96
Natural gas	54.2
Used tyres	85
Waste oil	74
Plastic	75
Refused derived fuels	8.7
Animal meal	0
Waste wood	0

Fonte : Habert et al. (2010, p. 822).

Enquanto em 1990, 85% dos participantes do GNR faziam uso exclusivo de combustíveis fósseis convencionais, em 2014 essa percentagem caiu para 23% (WBCSD, 2016, p. 13). No entanto, do total de combustíveis usados nas plantas de cimento em 2006, em média apenas 3% era biomassa e 7% outros combustíveis alternativos (IEA/WBCSD, 2009, pp. 9-10). Taxas maiores de substituição são possíveis, pois em alguns países europeus, a média de substituição de combustíveis fósseis por alternativos no setor é maior do que 50%, havendo plantas de cimento nas quais mais de 98% dos combustíveis consumidos são alternativos (ibid.).

Tecnicamente as plantas de cimento podem fazer uso de 100% de combustíveis alternativos, mas existem diversas barreiras para que tal limite seja atendido (ibid.):

- a) os preços relativos dos diferentes tipos de combustíveis (convencionais e alternativos) assumidos no modelo de cálculo mostram que será economicamente atrativo no longo prazo para os produtores de cimento fazerem a conversão de suas plantas movidas por carvão e coque de petróleo para gás natural; como o gás natural é menos intensivo em carbono (Tabela 7), essa conversão terá também impacto mais significativo nas reduções das emissões de CO₂ pelo setor do que as abordagens da maior eficiência

energética, do uso de combustíveis alternativos e da substituição do clínquer, segundo o mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD (2009) (Gráfico 9);

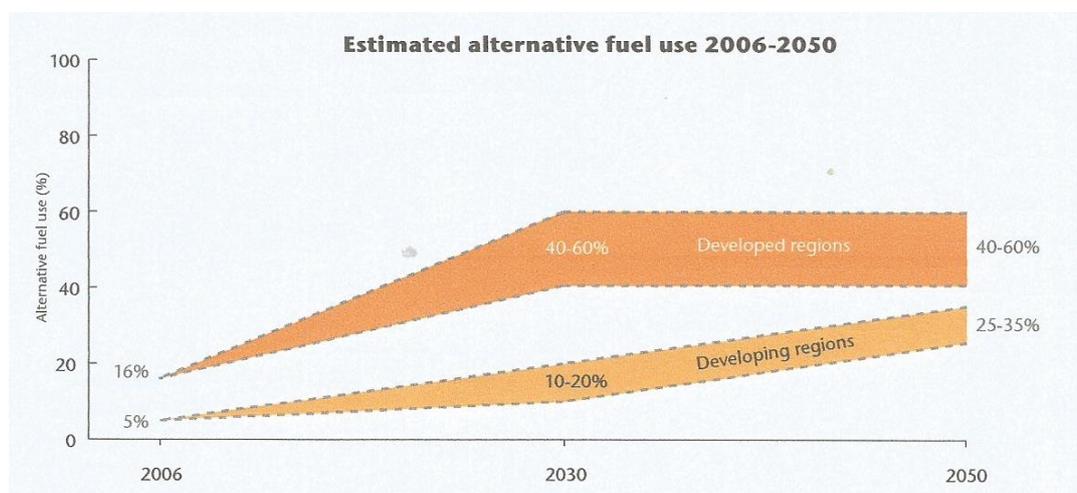
- b) os combustíveis alternativos diferem significativamente em composição dos combustíveis convencionais, o que requer seu pré-tratamento e o maior controle de qualidade da produção; adicionalmente, certos combustíveis alternativos, como as matérias-primas descarbonatadas (como a areia reciclada a partir do concreto) variam enormemente em sua composição para um mesmo tipo de material (ECRA/CSI, 2017, p. 16);
- c) disponibilidade local e regional dos combustíveis alternativos, que é impactada pela legislação sobre gerenciamento de resíduos e pelos diferentes usos de um mesmo material, fatores que influenciam os preços desses materiais como combustíveis alternativos (ECRA/CSI, 2017, p. 16);
- d) custos crescentes do uso dos combustíveis alternativos devido ao aumento de custos associados ao consumo do carbono são previstos no modelo: o mapeamento tecnológico assume que o uso de combustíveis alternativos (incluindo, no modelo, o gás natural como combustível alternativo) pela indústria cimenteira será viável até 2030, quando seus preços serão cerca de 30% dos preços dos combustíveis convencionais, sendo que esses valores subirão para 70% por volta de 2050;
- e) nível de aceitação local do coprocessamento (tecnologia do reaproveitamento de resíduos industriais e de outros materiais descartados como fonte de energia ou de matérias-primas nos fornos de cimento), uma vez que as pessoas mostram-se frequentemente preocupadas com o risco à saúde das emissões que saem dos fornos de cimento com o uso de combustíveis alternativos;
- f) disponibilidade de terras, em especial em áreas densamente habitadas, para fins de produção de alimentos e para fins de produção de biomassa (ECRA/CSI, 2017, p. 17).

A variação geográfica no uso de combustíveis alternativos pela indústria cimenteira é bastante acentuada. Na Europa, esse consumo é de aproximadamente

20% (15% de origem fóssil e 5% de biomassa), enquanto na América do Norte, Japão, Austrália e Nova Zelândia, ele é de 11% (essencialmente de origem fóssil). Na América Latina, o consumo de combustíveis alternativos é de 10% (6% de origem fóssil e 4% de biomassa), enquanto na Ásia, ele atingiu 4% em 2006. Mesmo dentro de regiões desenvolvidas, as diferenças são chocantes: por exemplo, enquanto 98% dos combustíveis nos Países Baixos são alternativos, na Espanha esse uso é próximo de zero (IEA/WBCSD, 2009, p. 11).

Apesar das dificuldades em prever os níveis de substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos no futuro, em razão dos fatores técnicos, econômicos, políticos e sociais descritos acima, as projeções para o uso de combustíveis alternativos (incluindo o gás natural) assumem uma taxa de substituição na indústria cimenteira em torno de 15% a 20% nos países em desenvolvimento e em torno de 60% nos países desenvolvidos, em 2030, com taxa global de substituição em torno de 45% (ECRA/CSI, 2017, p. 17). Já, em 2050, essas taxas de substituição devem atingir 30% e 70%, respectivamente, correspondendo a uma taxa global de substituição de 45% (ibid.). Essas projeções representam uma atualização das projeções feitas no mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD (2009), onde a taxa média assumida de substituição para 2050 foi de 37% (Gráfico 14), o que contribuiria com 15% da meta geral assumida de redução das emissões de CO₂ pelo setor (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, p. 5).

Gráfico 14 - Estimativas do uso de combustíveis alternativos no período de 2006 a 2050 para países desenvolvidos e em desenvolvimento



Fonte: IEA/WBCSD (2009, p. 11).

Nota: os níveis máximos em cada região depende da competição com outras indústrias por combustíveis alternativos.

Nota-se claramente nas barreiras apresentadas no mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD (2009) que o potencial de substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos é limitado sobretudo por razões estritamente econômicas (preços relativos dos combustíveis X custos de investimentos e operacionais X disponibilidade local e regional dos combustíveis) e de política econômica (regulamentações relacionadas com o gerenciamento de resíduos, com o coprocessamento e com a taxa futura do uso do carbono). São essas barreiras econômicas que explicam taxas globais baixas de substituição nas projeções (da ordem de 45%, em média, para um potencial de 100%). São elas também que explicam por que, daqui a 50 anos, não serão todas as plantas de cimento no mundo que operarão com gás natural, a despeito de essa troca ser economicamente viável no longo prazo e mais significativa em termos de redução das emissões de CO₂ no setor do que as estratégias da eficiência energética, uso de combustíveis alternativos e substituição do clínquer no cimento. No balanço entre os aspectos econômico, social e ambiental do desenvolvimento sustentável assumido pelo setor cimenteiro, o aspecto econômico parece prevalecer sobre o aspecto ambiental. Isto é por vezes justificado pelo aspecto social, interpretado em termos do poder de compra das populações pobres dos países subdesenvolvidos, isto é, em termos

econômicos. No entanto, para a estratégia tecnológica em discussão e para as demais estratégias discutidas neste trabalho de dissertação, podemos argumentar que o aspecto social do desenvolvimento sustentável deveria levar em conta também, com igual peso, as mudanças climáticas ocasionadas pela ação humana, uma vez que elas poderão inviabilizar os sistemas sociais de reprodução da humanidade no longo prazo.

Vale destacar que, em relação ao potencial de reduções nas emissões de CO₂ pelo setor cimenteiro, a taxa global projetada de substituição de combustíveis fósseis em torno de 45% diz respeito ao uso corrente de coque de petróleo e de carvão, não descartando o continuado uso de combustíveis fósseis com menor intensidade de carbono, como é o caso do gás natural. Este, por sinal, leva vantagem em termos de menores emissões de CO₂ em relação aos principais resíduos industriais e materiais descartados usados no coprocessamento (Tabela 7), a despeito da contribuição deste para a melhor destinação final desses rejeitos industriais. Sendo assim, com relação à substituição de combustíveis fósseis no setor cimenteiro, além das barreiras econômicas discutidas, parece haver também uma barreira técnica, uma vez que o gás natural mostra-se muito mais adequado para reduções das emissões de CO₂ do que a maioria dos resíduos industriais, como pneus, óleos usados e plásticos.

Neste sentido, a previsão pelo setor da maior participação do gás natural na matriz energética (por ser economicamente viável no longo prazo) e o uso dessa projeção como estratégia com vistas à redução das emissões de dióxido de carbono (incorporando-a sob a categoria de “combustíveis alternativos”) são sintomáticos da capitalização de estratégias de cunho predominantemente mercadológico como estratégias de compromisso ambiental pelo setor. Esta parece ser a postura do setor cimenteiro em relação à sustentabilidade: buscar medidas de menor impacto ambiental desde que economicamente embasadas em termos de custos/benefícios do investimento, isto é, em termos de retorno do capital investido. Em termos do modelo teórico de referência, podemos dizer que a perspectiva de valor da sustentabilidade parece estar a reboque da perspectiva de valor do capital e mercado.

Sendo assim, podemos questionar se as próprias pesquisas tecnocientíficas relacionadas à queima de combustíveis alternativos e à qualidade do cimento em fornos operados com combustíveis alternativos não tomariam outros rumos, caso o

quadro institucional onde são realizadas não fosse caracterizado pela predominância do valor do capital e mercado ou pela sobressaliência do aspecto econômico sobre o aspecto ambiental do desenvolvimento sustentável. Ao invés de se conformarem com as constatações das flutuações nas condições de combustão do clínquer e da qualidade inferior dele, essas pesquisas buscariam resolver teórica e tecnicamente esses problemas e outros associados num quadro institucional onde a perspectiva de valor da sustentabilidade fosse predominante, isto é, que colocasse o aspecto ambiental em primeiro lugar relativamente aos aspectos econômico e social do desenvolvimento sustentável. Essas possibilidades de pesquisa foram descartadas do mapeamento tecnológico e dos relatórios da WBCSD e UNEP por razões eminentemente técnicas ou científicas (ou seja, pela impossibilidade ou pela alta probabilidade de seus resultados não se configurarem como úteis, isto é, passíveis de aplicação prática) ou por razões predominantemente econômicas (ou seja, os altos custos demandados por essas pesquisas e pela aplicação de seus resultados, tendo em vista que exigiriam a reformulação tecnológica das plantas de cimento em operação)? Caso a decisão de descartar a investigação dessas possibilidades seja motivada predominantemente por questões econômicas, inclusive aquelas de interesse exclusivo dos fabricantes, teríamos configurado um quadro institucional para as pesquisas tecnocientíficas no qual a perspectiva de valor do progresso tecnológico é balizada e limitada pela perspectiva de valor do capital e do mercado, uma das teses assumidas no modelo teórico de referência.

Certamente que o aspecto econômico deve ter um peso nas decisões sobre financiamento de pesquisas e nas projeções de atualização tecnológica num setor. Como postula o modelo das interações entre as atividades científicas e os valores, as estratégias de restrição e seleção precisam ser, além de fecundas, úteis. Sem dúvida, uma parte dessa utilidade é determinada pelo mercado e pelas relações econômicas em voga. No entanto, mais importante do que o mercado na avaliação dessa utilidade, devem ser os contextos sociais e ambientais de comunidades que compõem a humanidade, que justificam lançar mão de estratégias sensíveis ao contexto, como advoga o próprio modelo teórico de referência. Por isso, o que questionamos nos programas de pesquisas tecnocientíficas e nas estratégias tecnológicas relacionados à mitigação de impactos ambientais no setor cimenteiro é

o peso atribuído aos fatores econômicos, em detrimento do peso de outros fatores, como os sociais e ambientais.

3.3.3 Uso de matérias-primas alternativas

As matérias-primas para a fabricação do clínquer são basicamente o calcário e a argila. Como a descarbonatação dessas matérias-primas, principalmente do calcário, é o fator principal das emissões de CO₂ na produção de cimento, sua substituição por materiais com baixo conteúdo de carbono, mas similar conteúdo de cálcio, é uma alternativa para reduzir o impacto do setor cimenteiro. Essa alternativa é, no entanto, limitada, pois existem poucos materiais com conteúdo suficiente de cálcio para substituir significantes quantidades de calcário (DAMTOFT et al., 2008, p. 118).

Um desses materiais é a escória granulada de alto-forno (GBFS, na sigla em inglês: *granulated blast furnace slag*), um subproduto da indústria siderúrgica. Apesar de rica em óxido de cálcio (na ordem de 40% em massa), as altas concentrações de óxido de alumínio e óxido de manganês limitam seu nível máximo de substituição do calcário, que fica entre 20 e 30%. Na prática, níveis de substituição em torno de 10% têm sido comumente reportados (ibid.). Quando essa taxa de substituição leva a igual queda no consumo de combustíveis fósseis, em razão da diminuição da quantidade de calor necessária para a descarbonatação, em teoria pode se alcançar uma redução nas emissões absolutas de CO₂ da ordem de 25% (ibid.). Além da limitação química da substituição do calcário pela escória de alto-forno, há também a limitação da disponibilidade do material. O montante de escória de alto forno disponível globalmente é cerca de 330 milhões de toneladas por ano, sendo que sua proporção em relação à produção mundial de cimento caiu de 17% em 1980 para 8% em 2014 (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, p. 15) . Essa carência por escória deve aumentar com a substituição das plantas siderúrgicas atuais por fornos elétricos mais modernos de arco, que não produzem escórias. No longo prazo, a disponibilidade da escória de alto forno é esperada estar abaixo dos 8% da produção mundial de cimento (ibid.).

Considerando uma substituição do calcário pela escória granulada de alto forno entre 10 e 15%, o estudo da ECRA/CSI (2017, pp. 62-64) estima uma redução do consumo de energia térmica de até 400MJ por tonelada de clínquer, um aumento

do consumo de energia elétrica de até 3kWh por tonelada de clínquer e uma redução de até 102kg de CO₂ emitidos por tonelada de clínquer produzida para uma planta de cimento próxima a fontes de escórias em quantidade suficiente e com boa qualidade para a produção de cimentos.

Outra matéria-prima alternativa com alta concentração de óxido de cálcio que pode ser usada na produção do clínquer são as cinzas volantes⁵⁴ (especialmente a classe C), subprodutos das termoelétricas. Segundo Damtoft et al. (2008, p. 118), o nível máximo de substituição do calcário pela cinza volante é de 10%, mas seu uso é também limitado por sua disponibilidade, já que sua produção gira em torno de 5% da quantidade de calcário consumida na produção de clínquer. Concluem os autores (ibid., tradução nossa):

Em suma, 100% de utilização das fontes correntes de BFS e cinza volante de classe C resultaria no máximo em 10% de redução nas emissões de CO₂. Na prática, o uso dessas matérias-primas será inevitavelmente muito menor, já que os altos custos de transporte e de consumo de energia restringem seu consumo e contrabalançam alguns de seus benefícios ambientais.

Os particulados que saem dos fornos de cimento (CKD) podem também ser usados como matérias-primas na produção do clínquer, uso limitado basicamente pela composição química desses particulados. O estudo feito por Huntzinger e Eatmon (2009, pp. 668-675), no qual se assumiu, para fins de comparação, que todo o CKD (cerca de 15% em massa por tonelada de clínquer) é reciclado nas plantas de cimentos nos Estados Unidos, apontou que essa tecnologia de reciclagem não tem qualquer efeito na redução das emissões de carbono em comparação com a produção do cimento tradicional.

A areia obtida da moagem do concreto para a fabricação de agregados reciclados, com granulometria entre 0 e 2 milímetros, pode também ser usada em substituição à argila, em razão de sua alta concentração de sílica. Tal uso poderá ter um efeito adicional de redução de emissões de CO₂ na produção do clínquer, se a porção da pasta de cimento endurecida não carbonatada no concreto reciclado for significativa (SCHNEIDER et al., 2011, pp. 644-645).

⁵⁴ As cinzas volantes podem ter natureza silicosa ou calcárea: a primeira consiste basicamente de dióxido de silício reativo (SiO₂) e de óxido de alumínio (Al₂O₃); e a segunda consiste basicamente de óxido de cálcio reativo (CaO), dióxido de silício reativo (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃). Além disso, muitas cinzas volantes podem conter carbono não calcinado e outros componentes indesejados que afetam sua adequabilidade para ser usado no cimento ou no concreto (ECRA/CSI, 2017, p. 117).

Apesar de a areia reciclada do concreto e dos particulados não terem impacto significativo na redução global das emissões de CO₂ pelo setor cimenteiro, seu uso pelo setor tem impacto regional e local, com a diminuição da poluição ocasionada por sua simples deposição no meio ambiente. Neste sentido, tal uso se configura em estratégia de ecologia industrial, isto é, de reaproveitamento dos rejeitos da produção de um segmento industrial como substitutos de matérias-primas usadas na produção do mesmo ou de outro segmento industrial.

Como no caso do coprocessamento, a ecologia industrial no setor cimenteiro é limitada por condicionantes técnicas (por exemplo, o nível máximo de substituição do calcário e da argila em função da composição química das matérias-primas alternativas, cuja variabilidade é enorme) e por condicionantes econômicas (disponibilidade das matérias-primas alternativas nas regiões produtoras de cimento, variabilidade de seu fornecimento, custos de seu transporte até as fábricas de cimento e de seu tratamento, e seu uso para outras finalidades). Talvez por isso, ela não prefigura no mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD (2009) como estratégia mitigadora de emissões de CO₂ no setor cimenteiro. Podemos supor, com base na comparação dos dados das Tabelas 8 e 10, que, para o caso do uso de matérias-primas alternativas com potencial de abatimento das emissões de CO₂ no setor cimenteiro na fabricação de clínquer (escórias granuladas de alto forno), o balanço feito nos estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental, guiado, como temos visto, conjuntamente pelas perspectivas do progresso tecnológico e do capital e mercado, tenha indicado seu baixo potencial ambiental relativamente à estratégia de substituição do clínquer por essas matérias-primas na fabricação de cimento (na comparação, destaca-se o maior potencial de abatimento das emissões relativas de CO₂ e o menor consumo específico de energia térmica da estratégia de substituição do clínquer por escórias granuladas de alto forno). Isto deve ser revisto até um certo grau na atualização do mapeamento tecnológico do setor cimenteiro, tendo em vista que a estratégia de uso de matérias-primas alternativas na fabricação de clínquer configura-se como solução tecnológica nos estudos mais recentes da ECRA/CSI (2017).

A compilação de dados do uso de matérias-primas alternativas potenciais para mitigação das emissões de CO₂ pelo setor cimenteiro (Tabela 8) aponta para uma queda em torno de 10% nas reduções absolutas de gás carbônico, tanto no uso exclusivo de escória granulada de alto forno a uma taxa de substituição de 10% a

15% (sem considerar o impacto de abatimento com a economia de queima de combustíveis fósseis, o que prefiguraria um valor em torno de 25%) quanto no uso combinado de escória granulada de alto forno e de cinza volante a uma taxa de substituição de 15% (taxa que considera a somatória dos níveis práticos de substituição para cada matéria-prima alternativa). Em relação a esses dados, vale destacar: a baixa taxa prática de substituição (metade) em relação ao máximo nível teórico de substituição, em razão de fatores estritamente econômicos (proporção da produção global de escória e cinzas em relação à demanda global por calcário para a produção de cimento, bem como o uso concorrente desses materiais na estratégia de substituição do clínquer, que será tema de seção à frente); o potencial estimado de redução das emissões de CO₂ por tonelada de clínquer produzida (12%), para as escórias granuladas de alto forno; e a ausência de dados relativos ao uso de cinzas volantes como matéria-prima nos estudos da ECRA/CSI (2017), indicativa do baixo potencial das cinzas volantes como estratégia mitigadora para o setor cimenteiro.

Diferentemente da análise feita para a estratégia de uso de combustíveis alternativos, na qual o aspecto econômico parece subjugar os aspectos sociais e ambientais do desenvolvimento sustentável nas avaliações relativas aos investimentos em pesquisa e desenvolvimento, nesta análise do uso de matérias-primas alternativas vemos que os fatores econômicos são tão restritivos que são a única condição importante a ser considerada, já que qualquer possibilidade de ganho de abatimento obtido com essa estratégia ficará limitada pela disponibilidade de produção conjunta em torno de 10% a 15% dessas matérias-primas relativamente à produção global de cimento.

Tabela 8 - Potencial de uso de matérias-primas alternativas pela indústria cimenteira e estimativa de seu impacto na redução das emissões de CO₂ pelo setor

Matérias-primas alternativas	Nível máximo de substituição (%)	Nível prático de substituição (%)	Variação máxima no consumo de energia térmica (MJ/t)	Variação máxima no consumo de energia elétrica (KWh/t)	Variação na intensidade de carbono (kg/t)	Variação máxima no consumo de energia térmica (%)	Variação no máxima consumo de energia elétrica (%)	Potencial estimado de redução de CO ₂ (%)
Escórias granuladas de alto-forno	20 a 30*	10* 10 a 15**	-400**	+3**	-102**	-12***	+3****	-25* (redução absoluta) -12***** (redução específica)
Cinzas volantes	10*	5*	-	-	-	-	-	-
BGFS + FA	-	10+5*	-	-	-	-	-	10* (redução absoluta)

Notas :

*Damtoft et al. (2008, p. 118);

**ECRA/CSI (2017, p. 62);

***Estimado a partir de ECRA/CSI (2017, p.62) e ECRA/CSI (2017, pp.8-10);

**** Estimado a partir de ECRA/CSI (2017, p.62) e ECRA/CSI (2017, pp.11-13);

*****Estimado a partir de ECRA/CSI (2017, p. 62) e Scrivener et al. (2016, p. 4).

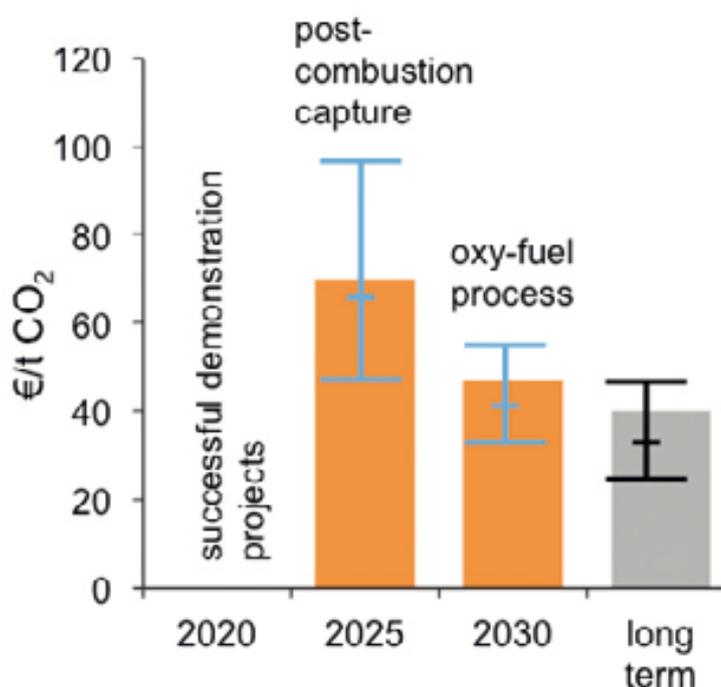
3.3.4 Captura, uso e estocagem de carbono

O sequestro e estocagem de carbono (CCS, na sigla em inglês: *carbon capture and storage*) é uma nova tecnologia, cuja aplicação em escala industrial na produção de cimento resta ainda ser testada. Até o momento, têm-se poucos resultados de experimentos-piloto e de escala industrial em fornos rotatórios de cimento quanto à captura do dióxido de carbono (ECRA/CSI, 2017, p. 26). A abordagem completa consiste na captura do CO₂ à medida que é emitido, na sua liquefação e transporte por meio de dutos, e, por fim, na sua armazenagem no subsolo.

Os custos estimados para a captura têm girado entre 50 e 70 euros por tonelada de CO₂ abatido. A estimativa é que esses custos caiam para menos de 40

euros no futuro para uma planta de cimento com produção de dois milhões de toneladas por ano (ibid.) (Gráfico 15). Essa estimativa não inclui os custos adicionais relativos ao transporte e estocagem do CO₂. O mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD (2009) estima que o investimento total requerido para implementar tecnologias de captura de CO₂ no setor cimenteiro deve ficar entre 321 bilhões e 592 bilhões de dólares, o que aumentaria o custo da produção de clínquer em duas ou três vezes (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, p. 6).

Gráfico 15 - Custos estimados para tecnologias de captura e estoque de carbono (pós-combustão e uso de oxigênio nos fornos)



Fonte : ECRA apud Scrivener, John e Gartner (2016, p. 6).

Dentre as tecnologias disponíveis de sequestro de carbono que estão sendo pesquisadas, as mais apropriadas para a produção de clínquer, segundo o mapeamento do IEA/WBCSD (2009, p. 14), são:

- a) as tecnologias de pós-combustão, que consistem em mecanismos encaixados nas chaminés dos fornos e que, por isso, não requerem mudanças drásticas no processo de fabricação do clínquer, podendo ser aplicadas tanto em fornos novos quanto em fornos em operação: a tecnologia de absorção

química, usando soluções de aminas, potássio e outros compostos químicos, é a mais promissora, por proporcionar alta eficiência de abatimento em experimentos operacionais; a tecnologia de membranas que usam materiais e técnicas de limpeza do ar é solução de longo prazo para aplicação na indústria cimenteira, uma vez que será preciso melhorar seu desempenho (ECRA/CSI, 2017, p. 26); a tecnologia do ciclo do carbonato (Calera), um processo de adsorção no qual o dióxido de carbono é mineralizado ao entrar em contato com o óxido de cálcio numa solução aquosa, produzindo carbonatos de cálcio, está sendo correntemente avaliada, sendo questões em aberto se os carbonatos produzidos têm propriedades aglomerantes e se o processo será capaz de reduzir significativamente as emissões de CO₂ (SCHNEIDER et al., 2011, pp. 646-647);

- b) tecnologia do uso do oxigênio nos fornos para a combustão, ao invés do ar, o que implica uma corrente mais pura de CO₂, pronta para ser estocada, está sendo atualmente demonstrada em protótipos em escala reduzida de plantas de produção de energia e de cimento: uma planta de separação dos gases do ar precisará ser introduzida na planta de produção de cimento, que terá que ser totalmente selada ou operar pressurizada, para evitar a entrada de ar no forno; além disso, devido às diferentes entalpias e fluxos de gases, essas plantas precisam ter um projeto diferenciado em relação às atuais, de modo que a tecnologia é recomendada para novas plantas (SCHNEIDER et al., 2011, pp. 646-647); alternativamente, a tecnologia está sendo estudada para ser aplicada apenas aos pré-calcinadores, o que exigiria menos esforços para o isolamento da planta de cimento e não afetaria a qualidade do clínquer produzido, apesar da menor eficiência de captura (em torno de 60 a 70%) em relação à operação completa com uso de oxigênio (em torno de 85 a 95%) (ECRA/CSI, 2017, p. 27).

Segundo (SCHNEIDER et al., 2011, p. 646) estão em curso pesquisas tecnocientíficas realizadas pela ECRA sobre a viabilidade técnica, econômica e ambiental dessas tecnologias, nas quais a avaliação de potenciais abatimentos de CO₂ é contrabalançada pela avaliação do consumo de energia requerido na sua operação.

Além da captura e estocagem do carbono, outra estratégia correlata é a da captura e uso do CO₂ (CCU, na sigla em inglês: *carbon capture e use*). Três são as rotas dessa estratégia.

A rota biológica é a dos biorreatores, que consistem basicamente de água e algas, que servidas pelos gases exalados dos fornos de cimento produzem hidrocarbonetos por meio de fotossíntese, usados posteriormente como combustível dos fornos. Em estágio experimental, essa tecnologia tem mostrado limitações, pois são necessários reatores com superfícies extremamente largas para aumentar a incidência de luz e capturar quantidades significativas das emissões de CO₂ de apenas um forno (SCHNEIDER et al., 2011, pp. 646-647). Adicionalmente, as algas precisam ser secadas e processadas antes de serem usadas como combustível, aumentando os custos de seu uso.

Na rota química, o dióxido de carbono reage cataliticamente com o gás hidrogênio, produzido a partir do processo de eletrólise em altas temperaturas da água, para dar origem a combustíveis, produtos químicos e polímeros, como metanol e hidrocarbonetos (ECRA/CSI, 2017, p. 31). Segundo a apresentação do professor da Universidade de São Paulo, Sérgio Pacca, no 7º Congresso Brasileiro de Cimento, ocorrido em junho de 2016, em São Paulo (ABCP/SNIC, 2016), a St Mary Cement (cimenteira do grupo Votorantim) produz diariamente cerca de seis toneladas de gás hidrogênio a partir de 600 toneladas de gases exauridos dos fornos de cimento (comparativamente a uma emissão média de 5000 toneladas de gás carbônico por dia numa planta típica de cimento). A demanda de mercado para esses produtos advindos da rota química é ainda pequena, suficiente apenas para contemplar as emissões de uma única planta de cimento (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, p. 6).

Por fim, na rota mineral, além da carbonatação mineral (Calera), na qual o gás carbônico reage com silicatos de cálcio e de magnésio para produção de carbonato de cálcio ou carbonato de magnésio (ECRA/CSI, 2017, p. 30), o gás carbônico pode ser transformado em bicarbonato de sódio⁵⁵ por meio de seu tratamento, absorção e transformação eletroquímica numa solução de hidróxido de sódio⁵⁶. Segundo o professor Pacca no evento citado acima, para cada tonelada de

⁵⁵NaHCO₃.

⁵⁶NaOH.

gás carbônico são produzidas 1,9 toneladas de bicarbonato de sódio, com consumo de 1329kWh e de quatro metros cúbicos de água. Essa tecnologia (patenteada como Skymine) foi inaugurada em 2014, em Santo Antônio, nos Estados Unidos, com capacidade de captura anual de 75 mil toneladas de CO₂. O estudo de Huntzinger e Eatmon (2009, pp. 672-674) revela que, apesar do sequestro de carbono no CKD pelo processo de carbonatação mineral ser de apenas 7% das emissões, a tecnologia oferece a possibilidade de redução real nas emissões líquidas de CO₂ pela indústria cimenteira, assumindo que 0,4 tonelada de CO₂ é capturada em cada tonelada produzida de CKD, com média de produção de 0,15 tonelada de CKD por tonelada de clínquer.

Essas tecnologias, apesar de não terem ainda demonstrado sua viabilidade econômica, não podem ser descartadas como alternativas ao estoque do carbono, ainda mais por não gerarem as resistências do público geralmente associadas a esta última (ECRA/CSI, 2017, pp. 30-32). Adicionalmente, a CCU tem maior potencial de ser menos custosa do que a CCS, dado que existe um mercado para seus produtos (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, p. 6). Esta é uma postura diferente da adotada no mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD (2009), onde a CCU não prefigura como solução tecnológica para abatimento das emissões de CO₂. Mais uma vez, isto pode indicar mudança de posição do CSI quanto ao CCU na próxima atualização do mapeamento tecnológico.

O mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD (2009, p. 14) aponta que a tecnologia de captura de carbono não deve estar disponível comercialmente para a indústria cimenteira antes de 2020. Algumas pesquisas tecnocientíficas e projetos-pilotos nos Estados Unidos e no Reino Unido foram iniciados e demonstrações de larga escala devem ter início até 2020, especialmente em pós-combustão (*ibid.*). Devido aos altos custos de implementação (Tabela 9), a expectativa é que a tecnologia de sequestro de carbono seja implantada em fornos com produção acima de 5000 toneladas diárias e desde que o custo estimado hoje caia significativamente com o progresso da pesquisa tecnocientífica. No entanto, sua implementação pela indústria cimenteira dependerá ainda da construção da infraestrutura de transporte (que impõe desafios quanto à sua regulação, acesso, desenvolvimento e complexidade da rede integrada geograficamente) e de estocagem do CO₂ (necessidade de mais pesquisas para a caracterização do local de estocagem, considerando a segurança do local e a operação, manutenção e monitoramento dos

estoques), bem como do marco regulatório a ser adotado em cada país (por exemplo, com relação aos limites de risco de vazamento do carbono) e da aceitação social local (ibid.).

Tabela 9 - Estimativas de custos para captura de carbono por pós-combustão usando tecnologias de absorção química para uma planta de cimento com produção anual de dois milhões de toneladas

	New installation / retrofit	
	Investment (Mio€)	Operational (€/t clinker)
2015	Not available	Not available
2030	100-300	10-50
2050	80-250	10-40

Source: ECRA Technology Papers (2009).
Note: the costs provided are estimations based on ECRA calculations (2009). Investment costs have been indicated as additional to the cement plant investment cost, and do not include transport or storage.

Fonte : IEA/WBCSD (2009, p. 15).

O mapeamento assume que a redução de 18% das emissões de CO₂ pela indústria cimenteira em 2050 somente será possível com a implementação da tecnologia CCS, considerada como a principal estratégia tecnológica para o abatimento das emissões de CO₂ pelo setor, devendo contribuir com 56% da meta (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, p. 6).

Para que esse cenário se viabilize, a ECRA/CSI (2017, pp. 28-29) assume as seguintes condições:

- a) a vida útil de um forno de cimento é de 30 a 50 anos, de modo que de 22 a 33% dos fornos atuais serão substituídos por novos antes de 2030;
- b) metade dos novos fornos terá uma capacidade de produção de 2 milhões de toneladas anuais e tecnologia CCS, de modo que de 20 a 33% da capacidade global de produção de cimento estará equipada com CCS entre 2030 e 2050;
- c) adicionalmente, 10% da capacidade em uso será equipada com pós-combustão;
- d) os problemas técnicos, comerciais, políticos e econômicos relativos ao transporte e estocagem de CO₂ serão resolvidos durante esse período.

No entanto, num cenário mais básico, onde apenas 30% da capacidade total de produção de cimento estará sendo construída ou operada em regiões com infraestrutura acessível de estocagem de carbono, apenas de 10 a 15% da produção global de clínquer terá implantada tecnologia CCS até 2050 (*ibid.*).

Essa breve descrição das tecnologias CCU e CCS parece indicar que nem sequer o aspecto econômico do desenvolvimento sustentável assumido pelo setor foi devidamente equacionado para o desenvolvimento e implementação dessas tecnologias. Vimos que a previsão de custos de investimento para implantação de tecnologias de captura de carbono deve impactar de duas a três vezes os custos de produção de cimento, o que deve se refletir no aumento correspondente dos preços do produto. Com isso, o aspecto social do desenvolvimento sustentável sob a perspectiva econômica estaria comprometido, pois, com o aumento de preço do cimento, as populações pobres dos países em desenvolvimento não teriam mais as condições vigentes de acesso ao seu mercado, tornando o cimento menos popular como material construtivo.

Numa postura típica das sociedades industriais avançadas de que os problemas atuais relacionados ao meio ambiente devem ter, como contrapartida, soluções tecnológicas em desenvolvimento, o setor deposita sua confiança de que o fiel da balança para o equacionamento do aspecto econômico de desenvolvimento e implantação da tecnologia de captura do carbono está nas pesquisas tecnocientíficas. Essas pesquisas devem assegurar o barateamento dos custos de implantação e operação da tecnologia de captura de carbono. É importante ressaltar que essa é uma postura ideológica, decorrente da sustentação da perspectiva de valor do progresso tecnológico. A pressuposição fundamental em seu seio – de que a tecnologia de captura evoluirá o suficiente para manter os preços de produção de cimento competitivos e num patamar que permita que o produto continue a ser usado em larga escala por populações pobres no mundo no espaço de tempo de 10 anos - precisa ainda ser empiricamente confirmada.

Por outro lado, a tecnologia de captura de carbono não mostrou também que seja capaz de assegurar o aspecto ambiental do desenvolvimento sustentável. Pois, como dito anteriormente, estão sendo realizados atualmente estudos de viabilidade ambiental dessa tecnologia, em termos do balanço entre o abatimento de CO₂ e o consumo de energia requerido para sua operação. Neste quesito, o setor endossa novamente a postura da perspectiva de valor do progresso tecnológico, ao confiar

que a tecnologia evoluirá com as pesquisas tecnocientíficas, fazendo com que o balanço seja positivo em relação ao meio ambiente.

Essa perspectiva é também endossada nas apostas nas tecnologias CCU e CCS. Vimos que a implantação da tecnologia CCS depende fundamentalmente, além das questões expostas acima sobre a captura de carbono, da superação de desafios técnicos relacionados à construção e operação da rede de transporte e de armazenamento de CO₂. Ainda não se sabe como esses desafios serão superados, mas, ao se dispor da tecnologia CCS no mapeamento tecnológico como a principal estratégia de mitigação de emissões de carbono, o setor confere alta probabilidade de que serão superados em menos de 10 anos, por meio de pesquisas científicas e desenvolvimentos tecnológicos. Importante destacar que o sucesso da implantação de tecnologia CCS dependerá não apenas do devido equacionamento de questões de eficácia, mas também de questões de legitimidade, como a segurança do transporte e armazenamento do gás carbônico, bem como sua aceitação local, com a mensuração dos riscos de vazamento e seus potenciais perigos à saúde da população local e ao meio ambiente, cujas respostas exigirão pesquisas científicas conduzidas sob estratégias sensíveis ao contexto, segundo o modelo teórico de referência (LACEY, 2014, p. 684).

Com relação às tecnologias CCU, elas precisam demonstrar sua viabilidade técnica, econômica e ambiental. Vimos que os estudos correntes apontam para seu baixo potencial de mitigação das emissões de CO₂ no setor cimenteiro. Por isso, a aposta na CCU como alternativa à CCS depende, por um lado, de mais pesquisas tecnocientíficas e do desenvolvimento das tecnologias de rota biológica e carbonatação mineral, de maneira a aumentar sua eficácia quanto à captura e uso de carbono. Por outro lado, as tecnologias da rota química dependem fundamentalmente do desenvolvimento dos mercados para seus produtos, para poderem ser aplicadas em larga escala.

Tudo somado, o grande potencial atribuído à tecnologia CCS no mapeamento tecnológico de 2009 parece, em última instância, refletir a demasiada confiança do setor no progresso tecnológico como fator fundamental para resolução dos problemas ambientais, em especial, o problema global das mudanças climáticas decorrente do aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera. Diante dos desafios técnicos, econômicos, sociais, ambientais e políticos a serem superados,

expostos anteriormente, a projeção de que, ao menos, 11% dos novos fornos até 2030 (ou seja, metade do investimento previsto para o setor no período) terão tecnologia CCS parece superestimada. Isto porque as principais variáveis que balizam decisões de investimento em novas tecnologias (custos de investimento e operação) não foram ainda equacionadas para as tecnologias de captura de carbono. Além disso, nada foi feito ainda em termos de planejamento, projeto e implantação da infraestrutura necessária de transporte e armazenamento de carbono, nem em termos do marco regulatório para seu uso, operação e monitoramento, o que delinea um cenário bastante incerto para decisões de investimento no curto e médio prazos. Sendo assim, a projeção mais tímida de que apenas 6% dos novos fornos até 2030 terão tecnologia CCS parece ser mais realista, levando a contribuição da tecnologia para a meta de 18% de abatimento das emissões de CO₂ no setor até 2050, assumida no mapeamento, a ser de meros 28% dessa meta, ou seja, metade da contribuição assumida no mapeamento.

Com isso, a lacuna dos 28% faltantes para completar a meta deverá ser preenchida na atualização do mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD pelas tecnologias CCU e da substituição do clínquer por materiais cimentícios suplementares. Está última desponta, como veremos a seguir, como a estratégia tecnológica mais eficaz para abatimento das emissões de CO₂ no setor cimenteiro.

A inclusão da CCS e a não inclusão da CCU no mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD (2009) parece ser uma postura contraditória da CSI, tendo em vista as maiores chances de implementação e viabilização técnica e econômica da CCU no curto e médio prazos em relação à CCS. Quais poderiam ter sido as razões para a CSI não dispor da tecnologia CCU no mapeamento? Seu baixo potencial de mitigação das emissões de CO₂? Apesar de baixo, qualquer abatimento é bem-vindo e merece o registro enquanto contribuição do setor para mitigar suas emissões. A baixa perspectiva da CSI quanto ao desenvolvimento tecnológico da CCU e quanto ao baixo desenvolvimento dos mercados para seus produtos, de modo a não haver expectativa quanto a ganhos de escala com a implantação da tecnologia no setor? Se for isto, a postura foi revista mais recentemente, como já ficou registrado nos artigos da ECRA/CSI de 2017, e deve ser revertida na atualização do mapeamento tecnológico do setor, como já apontamos. Por ter um período de maturação menor em relação à tecnologia CCS, a tecnologia CCU poderia indicar no curto prazo as muitas restrições (econômicas, sociais e ambientais) associadas a essas

tecnologias, apontando, por correlação, para o enorme grau de incerteza da tecnologia CCS nas previsões do mapeamento, a ponto de colocar em suspeição no curto prazo as estimativas para sua implementação e o potencial de mitigação das emissões de CO₂ atribuído a ela no mapeamento? A correlação entre CCU e CCS quanto às restrições para seu desenvolvimento e implantação, e o teste das tecnologias CCU no curto prazo, poderiam facilmente levar os leitores do mapeamento a concluir pelo superdimensionamento da contribuição da tecnologia CCS no mapeamento antes de sua efetiva implementação, colocando sob suspeição as previsões e o comprometimento do setor cimenteiro com o abatimento das emissões de CO₂.

3.3.5 Substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares e fíleres

A produção de cimento moderno em sua origem era constituída basicamente por clínquer e gesso, esse último usado em pequenas proporções (média de 5% em massa) para retardar a pega do cimento, mantendo por mais tempo sua trabalhabilidade. Já no final do século XIX, percebeu-se que, além do gesso, outros componentes minerais podiam ser adicionados ao clínquer porque tinham propriedades pozolânicas, como as cinzas volantes, as escórias granuladas de alto forno, as pozolanas naturais e artificiais, e o próprio calcário (Zampieri, 1989, pp. 45-46). Esses materiais reagem com o hidróxido de cálcio, formado durante as reações de hidratação do cimento, produzindo compostos com propriedades hidráulicas, sendo, por isso, genericamente denominados materiais cimentícios suplementares (SCM, na sigla em inglês: *supplementary cementitious materials*)(DAMTOFT et al., 2008, p. 120).

Por meio de pesquisas tecnocientíficas a indústria cimenteira percebeu o potencial dos SCM em substituir o clínquer no cimento, com pequenas alterações em suas qualidades e desempenho, mas com significativas reduções no consumo de energia térmica e nas emissões de dióxido de carbono associadas à produção de cimento.

Com relação à percepção pela indústria do menor consumo energético na produção de cimentos compostos, o uso de adições foi incentivado já a partir do final

da década de 1970, com a crise do petróleo, o que também induziu, como vimos, ao melhoramento da eficiência energética dos fornos. Por isso, podemos dizer que, do ponto de vista temporal, a estratégia de substituição de clínquer por SCM foi motivada por razões predominantemente econômicas.

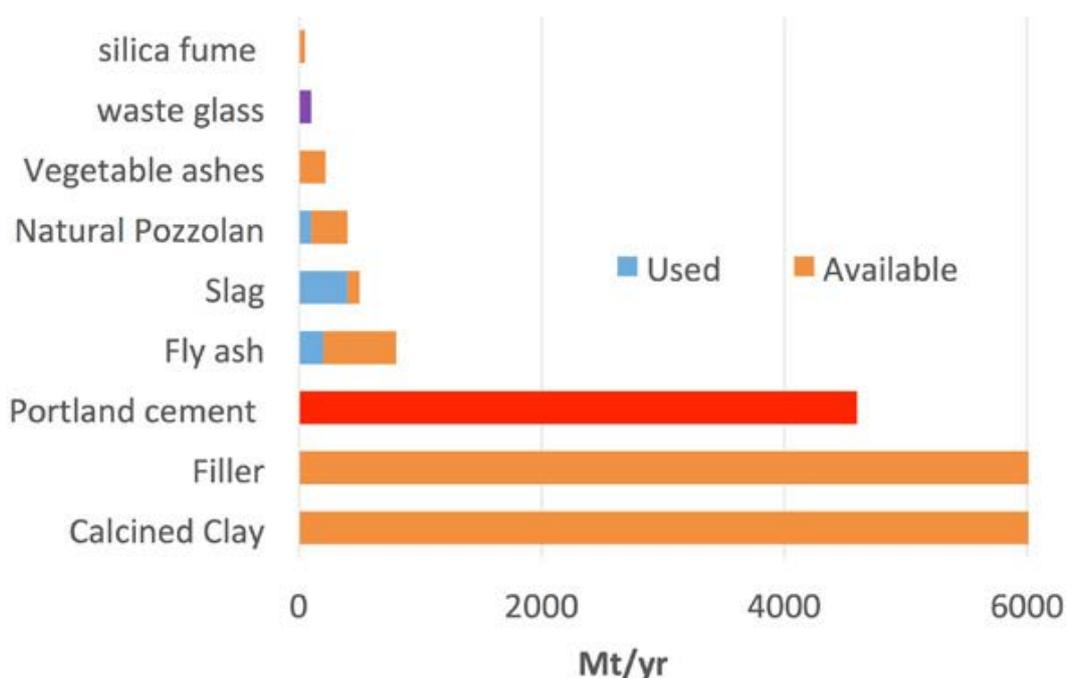
Com as limitações associadas às estratégias de usar combustíveis e matérias-primas alternativas, e de aumentar a eficiência energética dos fornos, como já comentado, a mais efetiva estratégia atual para reduzir as emissões específicas de CO₂ na indústria cimenteira passou a ser diminuição da proporção de clínquer no cimento (fator clínquer), por meio de sua substituição por materiais cimentícios suplementares, justamente porque a produção de clínquer requer um consumo substancial de combustível e a descarbonatação do calcário (SCHNEIDER et al., 2011, p. 647). Sendo assim, a indústria cimenteira se apropriou de uma estratégia econômica em voga no setor, ampliando-a progressivamente para lidar com o valor social da sustentabilidade, que pouco a pouco emergia e se consolidava nos fóruns internacionais de discussão e negociação.

De 1990 a 2014, o fator clínquer caiu, em média, entre os participantes do GNR de 83% para 75% (WBCSD, 2016, p. 14), consumindo o equivalente a mais de um bilhão de toneladas de SCM para uma produção mundial estimada de cimento de 4,2 bilhões de toneladas, em 2014 (ECRA/CSI, 2017, p. 18). No entanto, o uso do SCM em substituição ao clínquer no setor de construção civil deve ter sido muito maior, seja porque a representatividade dos participantes do GNR é baixa (por não incluir a China, que responde por mais da metade da produção mundial de cimento), seja porque, em muitos países, os SCM são usados diretamente no concreto em substituição ao cimento. Este é o caso dos Estados Unidos, onde o fator clínquer médio é 84,5%, mas as cinzas volantes e as escórias de alto forno são adicionadas diretamente nas plantas produtoras de concreto (WBCSD, 2016, p. 14). Já, nos países europeus e no Brasil, é mais comum a adição de SCM diretamente no cimento, na produção de cimentos compostos normalizados. Independentemente dos méritos de cada abordagem, a redução geral das emissões de CO₂ associadas com a redução da quantidade de clínquer por metro cúbico de concreto é essencialmente a mesma (DAMTOFT et al., 2008, pp. 119-120). No entanto, o ganho ambiental dessa substituição pode ser facilmente anulado pelo aumento do consumo por cimento ou concreto. Nos Estados Unidos antes da crise de 2008, os fornos de cimento operavam acima de sua capacidade instalada, havendo queda no

fornecimento de cimento para o mercado nacional. A estratégia de produção de cimentos com adições foi usada para aumentar a produção de cimentos e concretos, sem qualquer modificação nas quantidades de clínquer produzidas, de modo que a queda do fator clínquer nos cimentos não foi capaz de reduzir as emissões absolutas de CO₂ pelo setor (HUNTZINGER; EATMON, 2009, p. 673). Tal fato aponta que o uso de SCM e fíleres em substituição ao clínquer no cimento é uma estratégia mitigadora endossada pelo setor cimenteiro que ainda não provou sua efetividade enquanto estratégia tecnológica capaz de contribuir com as reduções absolutas de emissões de CO₂ pelo setor até 2050.

O mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD (2009) identificou um potencial limitado para redução de CO₂ por meio da substituição do clínquer por SCM (19% da meta de 18%), em razão das limitações no fornecimento de escória granulada de alto forno e cinzas volantes (Gráfico 16). No entanto, novas fontes de adições minerais, como calcário e argilas calcinadas, podem alterar radicalmente essa projeção (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, p. 15), como já fica patente nos artigos da ECRA/CSI (2017).

Gráfico 16 - Estimativas da disponibilidade de SCM em comparação com o montante de cimento produzido (milhões de toneladas por ano)



Fonte: Scrivener, John e Gartner (2016, p. 15).

Na prática, o uso da escória granulada de alto forno (GBFS, na sigla em inglês: *granulated blast furnace slag*) em substituição ao clínquer pode variar de 30 a 70% em massa (ECRA/CSI, 2017, pp. 108-110). Considerando esse uso, estima-se uma redução de consumo de energia térmica de até 1590MJ por tonelada de cimento, um aumento no consumo de energia elétrica de até 10kWh por tonelada de cimento e uma redução de até 395 kg de CO₂ por tonelada de cimento produzido em relação a uma planta de referência (planta baseada na média mundial dos dados do GNR 2014) (ibid.). Já, o uso da cinza volante (FA, na sigla em inglês: *fly ash*) pode variar, na prática, de 25 a 35% em massa. Com esse uso, estima-se uma redução de consumo específico de energia térmica de até 360MJ, uma redução do consumo específico de energia elétrica de até 15kWh e uma redução específica de intensidade de carbono de até 98kg (ECRA/CSI, pp. 117-119) (Tabela 10).

O aumento do uso global de cinza volante e escória de alto forno é limitado por vários fatores, como sua disponibilidade regional, qualidade, desempenho técnico, normalização, aceitação do mercado, mas principalmente os custos de transporte e a competição pela aplicação desses materiais em outros setores, o que imporá um limite efetivo para o fator clínquer em torno de 77% (DAMTOFT et al., 2008, p. 120). Correntemente, mais de 90% das escórias de alto forno já são usadas como SCM, seja na produção de cimentos compostos, seja como adição ao concreto e aos produtos à base de cimento (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, p. 16). Por sua vez, um terço das 900 milhões de toneladas por ano de cinzas volantes produzidas é correntemente usada pelas indústrias cimenteiras e concreteiras, havendo possibilidade de aumentar esse uso por meio da melhor caracterização e classificação da enorme variedade de cinzas volantes, mas não por meio da transformação química das cinzas inertes em cinzas reativas, em razão dessa conversão não ser economicamente viável (ibid.). Além disso, como a produção de cinza volante e a escória de alto forno estão associadas com altas emissões de CO₂, no longo prazo o fornecimento desses materiais deve cair, à medida que as termelétricas a carvão e as siderúrgicas atuais serão substituídas por processos de produção mais eficientes em termos de emissões (DAMTOFT et al., 2008, p. 120). A projeção de longo prazo é que a disponibilidade das escórias de alto forno e de cinzas volantes será abaixo de 16% da produção global de cimento (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, p. 33).

Ao contrário desses materiais cimentícios suplementares, a argila caulínica, principal recurso natural usado na fabricação de argilas calcinadas, têm jazidas em abundância e espalhadas na natureza. Por isso, essas pozolanas artificiais têm enorme potencial futuro para substituição do clínquer na produção de cimentos (ECRA/CSI, 2017, p. 123).

As argilas caulínicas desenvolvem uma boa atividade pozolânica quando são calcinadas a temperaturas entre 500 e 800°C, podendo consumir menos energia elétrica e térmica e emitindo menos CO₂ por tonelada em relação ao clínquer. A reatividade da argila calcinada é principalmente determinada por sua composição mineralógica, pelas condições de calcinação e pela distribuição granulométrica de seus compostos. Estudos sobre os fatores que influenciam a reatividade da argila calcinada e sobre as propriedades dos cimentos contendo esse material em substituição ao clínquer estão atualmente em curso em vários institutos de pesquisa e universidades, como no Instituto de Pesquisa da VDZ (*Verein Deutscher Zementwerke*), associação técnica da indústria alemã de cimento (SCHNEIDER et al, 2011, p. 648).

Usadas há muito tempo pelo setor construtivo, como na construção de uma ponte em São Francisco, nos Estados Unidos, em 1932, e em diversas barragens brasileiras, as argilas apresentarão maior potencial sustentável caso advenham de rejeitos de outras indústrias (como a indústria cerâmica) ou sua calcinação seja feita na própria planta de cimento, evitando, assim, a devastação ambiental e o transporte de longa distância (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, p. 17).

Além da argila calcinada, as pozolanas naturais podem também ser usadas como substitutos do clínquer no cimento Portland. A base de dados GNR indica o uso corrente de cerca de 75 milhões de toneladas por ano de pozolanas, montante vindo de reservas irregularmente distribuídas no mundo e sendo formado por enorme variedade quanto à reatividade (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016, pp. 16-17). As pozolanas naturais são tema atual de pesquisas tecnocientíficas, que procuram lidar com problemas associados ao seu uso em cimentos em substituição ao clínquer, como as relacionadas à formulação de cimentos ternários e quaternários para superar dificuldades advindas do uso de pozolanas, como a necessidade de aumento do fator água/cimento, a baixa retenção de trabalhabilidade e as baixas resistências nas primeiras horas dos concretos feitos

com esses cimentos (DAMTOFT et al., 2008, p. 120). Entre essas pesquisas, destaca-se a relacionada com o uso de microssílica (subproduto da produção de ligas de silício e ferro, extremamente fino e com alta concentração de sílica), devido à sua alta reatividade, que leva à formação de quantidades significativas de C-S-H em baixas idades, o que pode compensar parcialmente a reação de hidratação mais demorada de outros SCM (ibid.). Além disso, a microssílica pode ser usada em cimentos compostos para aumentar a proporção de SCM, reduzindo ainda mais o fator clínquer. Atualmente, na Europa, o uso da microssílica no cimento é limitado a 10% (ibid.). A limitação maior para seu uso está em sua baixa disponibilidade ou no alto custo de sua produção.

Considerando o uso na prática de 15 a 35% em massa de pozolanas naturais nos cimentos, contra a normalização europeia (EN 197-1) que prescreve cimentos com até 55% de pozolana natural em massa, ECRA/CSI (2017, pp. 120-125) estimam uma redução no consumo específico de energia térmica de até 360MJ, uma redução de até 3kWh no consumo específico de energia elétrica e uma redução de até 91,7kg de CO₂ nas emissões por tonelada de cimento produzido. Já, se forem usadas pozolanas calcinadas em idênticas proporções de substituição do clínquer, pode ocorrer um aumento do consumo específico de energia térmica de até 150MJ, uma redução de até 5kWh no consumo específico de energia elétrica (devido a maior facilidade de moagem da pozolana calcinada em comparação ao clínquer) e uma redução de até 75kg nas emissões de CO₂ por tonelada de cimento (Tabela 10).

Projeta-se que no médio prazo o uso de cimentos com argilas calcinadas aumentará onde não existam escórias e cinzas volantes em quantidades suficientes para atender a demanda de produção. Já, no longo prazo, espera-se maior uso das argilas calcinadas na medida em que a disponibilidade global de escórias e cinzas volantes não será capaz de atender a demanda do setor cimenteiro (ECRA/CSI (2017, pp. 120-125).

Estudos recentes têm explorado os efeitos sinérgicos das combinações otimizadas de argilas calcinadas e do calcário como materiais cimentícios suplementares. Esses estudos têm estabelecido que combinações na ordem de 50% de substituição do clínquer são capazes de manter as propriedades de desempenho desses cimentos em níveis similares aos cimentos atuais em uso. Levando esses estudos em conta, ECRA/CSI (2017, p. 124) estimam uma redução de até 380MJ no

consumo específico de energia térmica, uma redução de até 7kWh no consumo específico de energia elétrica e uma redução de até 184kg de CO₂ emitido por tonelada de cimento produzido (Tabela 10).

A adição mais disponível para ser usada em substituição ao clínquer no cimento é o calcário (DAMTOFT et al., 2008, p. 120). Seu uso em substituição ao cimento foi registrado pela primeira vez na construção das barragens “Arrowrock” e “Elephant”, nos Estados Unidos, entre 1912 e 1916, com taxa de substituição de 50% (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 19). Essas barragens estão ainda em funcionamento, sendo que sua segurança e durabilidade foram demonstradas por uma investigação de longo prazo (10 anos de duração) conduzida pela Universidade Berkeley, na Califórnia (ibid.).

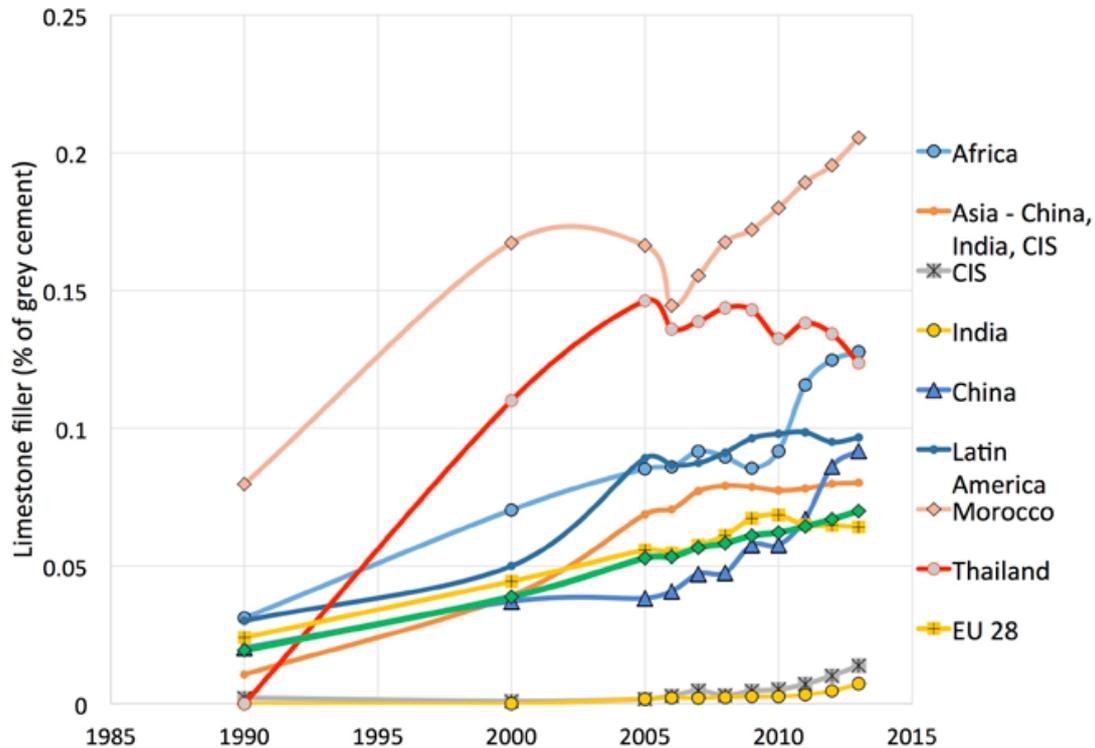
Hoje em dia, as normas técnicas da maioria dos países permitem a substituição do clínquer pelo calcário, com taxas que vão de 5% a 35%. Entre os países participantes do GNR, a taxa média de substituição é em torno de 7% desde 2010 (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 19). Na Europa o calcário é a adição mais usada no cimento Portland, superando o uso de todas as outras adições minerais somadas (DAMTOFT et al., 2008, p. 120).

Estudos demonstraram que a alumina do clínquer pode reagir com a cal livre no cimento, formando hidratos de aluminato carbocálcicos, que contribuem para aumentar a resistência e durabilidade dos produtos à base de cimento (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 19). A alumina presente num cimento Portland comum é suficiente para reagir com, no máximo, 5% da cal livre (DAMTOFT et al., 2008, p. 120). No entanto, o calcário acima desse limite (até 10%) funciona basicamente como uma partícula inerte ou fracamente reativa, usada para diluir ou estender as demais matérias-primas do cimento (fíler), sem implicar o efeito de diluição das propriedades do cimento (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 19). Com técnicas adequadas de moagem, a proporção de calcário entre 10% e 20% pode atuar como acelerador da hidratação da alita, resultando em cimentos com pequena redução de resistência aos 28 dias em relação aos cimentos comuns (DAMTOFT et al., 2008, p. 120). Na Europa, a norma EN 197-1 limita a proporção de calcário no cimento em 35% em massa (ECRA/CSI, 2017, p. 126).

Em média, o calcário em substituição ao clínquer varia de 1 a 20%, de um país a outro (Gráfico 17), em função de vários fatores, como cultura construtiva,

normalização nacional e alta capacidade instalada na indústria cimenteira para produção de clínquer num país (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 19). A enorme variação nas taxas de substituição de clínquer por calcário no mercado mundial do cimento ensacado, geralmente usado em construções que não requerem alta resistência à compressão, aponta para a potencialidade da estratégia de maiores taxas de substituição do clínquer pelo calcário como instrumento para reduzir o uso do clínquer (ibid.). Por outro lado, processos de moagem mais sofisticados, capazes de melhorar a distribuição granulométrica das partículas do cimento, juntamente com o uso de aditivos químicos dispersantes para reduzir a demanda por água da pasta cimentícia necessária para garantir a trabalhabilidade do produto, são imprescindíveis para evitar a perda de resistência de cimentos com maiores conteúdos de filer calcário (ibid.).

Gráfico 17 - Porcentagem de conteúdo de filer de calcário no cimento para várias regiões



Fonte: (GRN, 2008) apud Scrivener, John e Gartner (2016, p. 18).

Como o calcário reage com os aluminatos de cálcio, seu uso deve aumentar com o uso de SCM com alta concentração de alumina (DAMTOFT et al., 2008, p. 121). Para isso, será preciso adicionar novos materiais à lista de SCM normalizados, estender as normalizações do cimento para permitir cimentos compostos mais complexos e desenvolver uma metodologia científica, do ponto de vista químico e físico, que facilite o desenvolvimento de cimentos compostos de ótimo desempenho (ibid.).

Estudo da ECRA/CSI (2017, p. 127), assumindo uma substituição de clínquer por calcário de até 10% e por outros materiais cimentícios suplementares de até 25%, estima uma redução do consumo específico de energia térmica de até 360MJ, uma redução do consumo específico de energia elétrica de até 5kWh e uma redução na intensidade específica de CO₂ de até 90kg (Tabela 10). Isto porque, como o calcário é obtido, em geral, em jazidas próximas à planta de cimento, e é mais facilmente moído em comparação ao clínquer, seu maior uso no cimento em substituição ao clínquer implica em reduções das emissões de CO₂ provenientes da combustão e da descarbonatação do processo de fabricação do clínquer, já que seu uso requer apenas sua moagem.

Tabela 10 - Estimativas das taxas de substituição de clínquer por SCM e seu impacto nas variações de consumo específico de energia térmica e elétrica, e de intensidade específica de emissões de CO₂ até 2050

Adições	Taxas de substituição (%)	Varição máxima no consumo específico de energia térmica (MJ/t)	Varição máxima no consumo específico de energia elétrica (kWh/t)	Redução máxima na intensidade específica de CO ₂ (kg/t)	Varição máxima no consumo específico de energia térmica (%) ⁺	Varição máxima no consumo de energia elétrica (%) ⁺⁺	Potencial máximo de redução na intensidade específica de CO ₂ (%) ⁺⁺⁺
Escória granulada de alto forno	30 a 70*	- 1590*	+ 10*	- 395*	-47	+10	-46
Cinza volante	25 a 35**	- 360**	- 15**	- 98**	-11	-14	-12
Pozolanas naturais	15 a 35***	- 360***	- 3***	- 91,7***	-11	-1	-11
Argila calcinada	15 a 35****	+150****	- 5****	- 75****	+4	-5	-9
Argila calcinada + calcário	50****	-380****	- 7****	- 184****	-11	-7	-22
Calcário + outros SCM	0 a 10***** 25*****	- 360*****	- 5*****	- 90*****	-11	-5	-11

Notas:

*ECRA/CSI (2017, p. 109);

** ECRA/CSI (2017, p. 118);

*** ECRA/CSI (2017, p. 121);

**** ECRA/CSI (2017, p. 124);

***** ECRA/CSI (2017, p. 127);

⁺Estimativa a partir dos dados respectivos da linha e de ECRA/CSI (2017, pp. 8-10) (não incluso impacto da adição de gesso no cimento no cálculo) ;

⁺⁺Estimativa a partir dos dados respectivos da linha e de ECRA/CSI (2017, pp. 11-13);

⁺⁺⁺Estimativa a partir dos dados respectivos da linha e de Scrivener et al. (2016, p. 4) (não incluso impacto da adição de gesso no cimento no cálculo).

Com relação à compilação de dados da Tabela 10, que traz as variações máximas estimadas no consumo específico de energia térmica e elétrica e na intensidade específica de carbono na indústria de cimento, bem como as variações percentuais máximas em relação aos dados da média dessas categorias em 2014 com base nos GNR, obtidas quando se considera a taxa máxima de substituição de

clínquer por SCM e fíleres, vale destacar o seguinte: o elevado potencial teórico do uso das escórias granuladas de alto forno, com abatimentos de quase 50% no consumo de energia térmica e nas emissões específicas de CO₂ pelo setor; o baixo potencial de abatimento das argilas calcinadas quanto às emissões de CO₂ (9%) e quanto ao consumo específico de energia elétrica (5%), mas seu baixo impacto negativo no aumento do consumo térmico específico (4%); em contrapartida, o uso da argila calcinada com fíler calcário potencializa sobremaneira o potencial de abatimento no consumo específico de energia térmica (11%) e de emissões específicas de CO₂ (22%); por fim, o uso de cinzas volantes, pozolanas naturais e uma mistura de calcário e SCM têm potenciais de abatimentos muito similares (em torno de 10%) no consumo específico de energia térmica e de emissões de CO₂, valendo destacar que as cinzas têm potencial de abatimento bem superior (14%) no consumo específico de energia elétrica em relação aos demais.

O elevado potencial mitigador das escórias granuladas de alto forno é bastante restringido por motivos estritamente econômicos, tendo em vista que 90% de seu fornecimento já é utilizado pelo setor cimenteiro (Gráfico 16) e a perspectiva é que esse fornecimento gire em torno de 8% da produção mundial de cimento até 2050. Isto limitaria ainda mais o uso de escórias granuladas de alto forno em substituição ao clínquer como estratégia mitigadora pelo setor. Motivos econômicos limitam também a estratégia de uso das cinzas volantes. Sua disponibilidade atual é também baixa em relação à produção mundial de cimento (Gráfico 16), apesar de haver a perspectiva de aumento dessa disponibilidade com sua melhor caracterização e classificação. Apesar disso, no longo prazo sua disponibilidade deve se limitar também a 8% da produção mundial de cimento.

Tendo esse cenário em vista, a aposta do setor cimenteiro para cumprir a meta de redução de emissões de CO₂ em 18% em 2050 em relação aos níveis de 2006 recai nas estratégias de uso de pozolanas naturais, argilas calcinadas e fíler calcário, que possuem reservas abundantes e bem distribuídas pelo planeta. De acordo com a Tabela 10, a estratégia com maior potencial é a da combinação de argilas calcinadas com calcário.

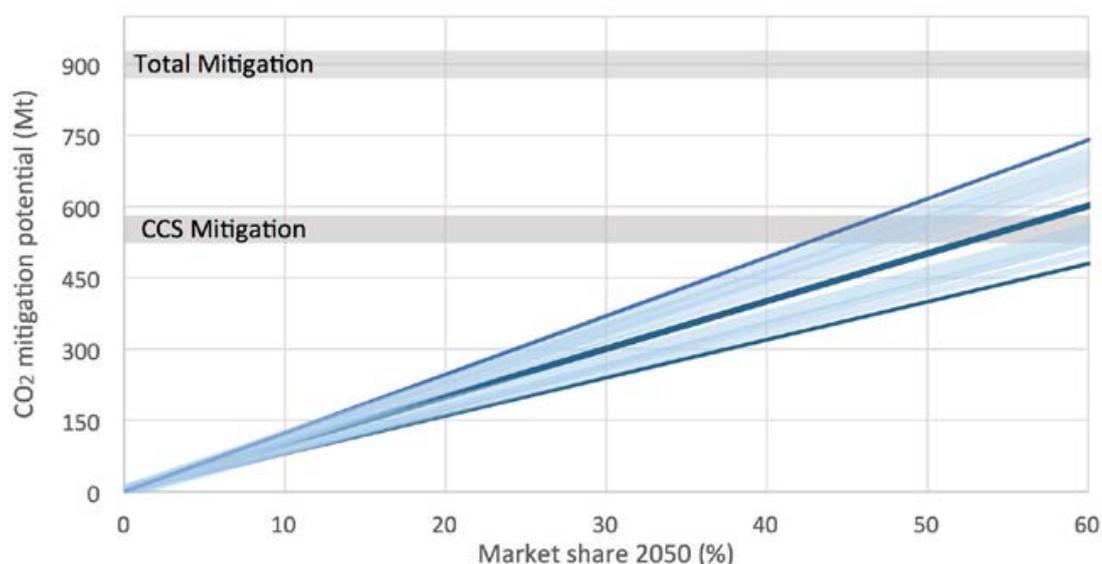
No cenário de baixa demanda do IEA ETP 2016⁵⁷ (Perspectivas Tecnológicas em Energia da Agência Internacional de Energia), no qual a produção mundial de cimento é estimada em 4,566 bilhões de toneladas em 2050 e a de cinzas volantes e escória granulada de alto forno em 740 milhões de toneladas, o fator clínquer em média seria de 70%, considerando a adição de 5% de gesso aos cimentos (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 34). Neste mesmo cenário, esses autores projetam que o uso de 10% de fíler calcário em todos os cimentos produzidos e o uso de 40% de cinzas volantes e escórias diversas (não apenas as escórias granuladas de alto forno) em 40% dos cimentos produzidos, levariam o fator clínquer a 50% (ibid.). Este fator clínquer poderia também ser atingido no cenário de baixa demanda por meio do desenvolvimento de duas novas tecnologias: a combinação de técnicas avançadas de distribuição granulométrica de partículas (com uso de novas tecnologias de moagem separada do clínquer e dos fíleres) e de usos de dispersantes químicos (como os superplastificantes); e a combinação de SCM com conteúdo de alumina (como as argilas calcinadas) com fíleres calcários, capazes de formar hidratos de aluminatos carbocálcicos, que contribuem para o efeito do preenchimento da pasta de cimento, melhorando sua resistência e durabilidade (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 34).

Segundo Scrivener et al (2016, pp. 34-35), essas duas novas tecnologias, baseadas em minerais e no processo de produção com os quais a indústria cimenteira está familiarizada, podem atingir, em 2050, o potencial de mitigação das emissões de CO₂ atribuído à tecnologia CCS no mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD 2009 (Gráficos 18 e 19). Por serem mais baratas e mais fáceis de serem aplicadas no setor cimenteiro, essas duas tecnologias são mais promissoras do que a tecnologia CCS, que, como vimos, está em estágio inicial de pesquisa e desenvolvimento e tem previsão de altos custos de investimento e operação. No entanto, tanto a tecnologia CCS quanto a CCU não devem ser descartadas enquanto estratégias mitigadoras possíveis de serem desenvolvidas, considerando o segundo cenário estabelecido pelo IPCC de aumento de 1,5°C da temperatura terrestre no final deste século (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. vii), bem como a mais nova meta assumida pela CSI na *Low Carbon Technology Partnerships Initiative* (LCTPi), o mais recente programa da WBCSD, alinhado com as metas

⁵⁷ IEA, ENERGY TECHNOLOGY PERSPECTIVES. **Mobilizing innovation to accelerate climate action.** [S.l.]: Energy Technology Perspective, 2015. Disponível em :<<http://www.iea.org/etp/etp2015/>>.

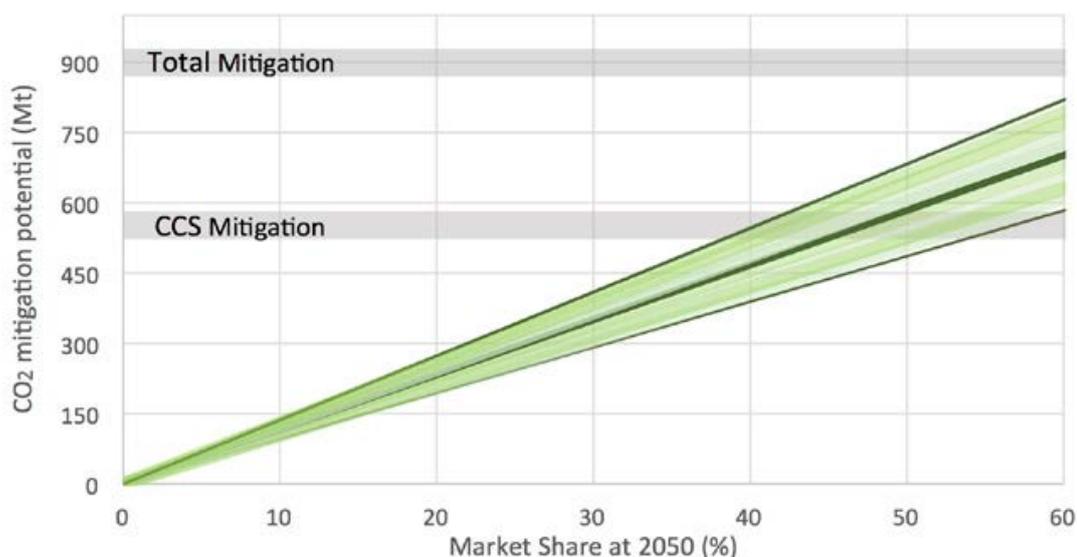
estabelecidas na COP 21 para redução de emissões de CO₂. Dentro deste programa, a CSI assumiu a meta mais ambiciosa de abatimento das emissões de carbono do que a meta estipulada no mapeamento tecnológico de 2009: a redução das emissões de CO₂ de 20% a 25% até 2030 em relação aos níveis atuais (WBCSD, 2015, p. 6).

Gráfico 18 - Potencial de mitigação de uma combinação de 25% a 35% de argila calcinada com 15% de fíler calcário em função da fatia de mercado para o cenário de baixa demanda em 2050. As linhas horizontais demarcam as metas de mitigação total e para a tecnologia CCS



Fonte : Scrivener, John e Gartner (2016, p. 35).

Gráfico 19 -Potencial de mitigação para taxa de substituição de clínquer por fíler calcário variando entre 25% e 35%, com uso de dispersantes, em função da fatia de mercado para o cenário de baixa demanda em 2050. As linhas horizontais demarcam as metas de mitigação total e para a tecnologia CCS



Fonte : Scrivener, John e Gartner (2016, p. 35).

Por considerar as tecnologias CCU e CCS como principais estratégias de mitigação, a ECRA/CSI (2017, pp. 20-21) são mais conservadoras nas suas projeções do fator clínquer no mercado cimenteiro, estimando que este será de 65% em 2030 e 60% em 2050 (Tabela 11). Tais projeções assumem que a disponibilidade de cinza volante, escória de alto forno e pozolanas aumentará em taxa similar a do consumo de cimento no cenário futuro e o uso de 10% de fíler calcário em substituição ao clínquer. No entanto, esse maior uso dos SCM deve impactar os custos, consumo de energia e emissões de CO₂ relacionados com seu transporte, implicando num potencial limitado para a redução absoluta na emissão de CO₂ pelo setor (ibid.).

Tabela 11 - Estimativas do fator clínquer para os anos 1990, 2014, 2030 e 2050

	1990	2014	2030	2050
Fator clínquer (%)	83*	75*	65**	60**
				70***
				50***
			77****	77****

Notas:

*WBCSD (2016, p. 14);

**ECRA/CSI (2017, p. 127);

*** Scrivener et al (2016, pp. 34-35);

****Damtoft et al. (2008, p. 120).

Na Tabela 11, vale destacar a disparidade entre os valores do fator clínquer para o ano de 2050. Certamente, o limite imposto por Damtoft et al. (2008) já foi ultrapassado pelos dados do GNR de 2016, mostrando a estimativa demasiadamente conservadora daqueles autores. Por sua vez, tendo em vista as limitações econômicas para o uso de cinzas volantes e escórias granuladas de alto forno, seus usos exclusivos em substituição ao clínquer levariam o valor do fator clínquer a 70% em 2050, avanço pouco significativo (5 pontos percentuais) em relação ao valor atual médio do fator clínquer. Segundo estimativa da ECRA/CSI este valor cairia para 60%, com a suplementação de uso das cinzas volantes e escórias granuladas de alto forno por pozolanas naturais e fíler calcário. Já, segundo estimativa de Scrivener, John e Gartner (2016), o valor do fator clínquer pode atingir 50% em três diferentes estratégias de uso de SCM e fíleres: 10% de fíler calcário em todos os cimentos e 40% de cinzas volantes e escórias em 40% dos cimentos; até 35% de argila calcinada com 15% de fíler calcário em até 60% dos cimentos; e até 35% de fíler calcário em até 60% dos cimentos. Portanto, essa disparidade de valores do fator clínquer é explicada pela postulação pelos autores de diferentes usos de SCM e fíleres em substituição ao clínquer, com base em pressuposições a respeito da maior ou menor probabilidade de sucesso de uma ou outra estratégia, tendo em conta fatores econômicos, técnicos, ambientais e de pesquisa e desenvolvimento. Como dizem Scrivener, John e Gartner (2016, p. 32, tradução nossa):

O potencial de mitigação de cada tecnologia é incerto, devido à incerteza quanto às pegadas de CO₂ e energia, bem como à fatia de

mercado no futuro, que dependem de investimentos em funcionalidades industriais. Os custos reais das emissões de CO₂ e de produção serão influenciados pelos investimentos em P&D em cada tecnologia, seja pela indústria, seja pelas agências públicas. Conseqüentemente, o potencial de mitigação apresentado para cada tecnologia representa simplesmente um resultado possível desejado.

Em razão dessas incertezas, os Gráficos 18 e 19 apresentam uma dispersão significativa de projeções e as expectativas da ECRA/CSI e da UNEP mostram-se bastante divergentes: enquanto esta aposta firmemente nas estratégias de substituição do clínquer como o mais promissor caminho para a mitigação das emissões de CO₂ pelo setor cimenteiro, aquelas não se mostram tão entusiasmadas com essa via, ao contrabalançar os benefícios vindos da substituição com os impactos a serem gerados em termos de custos, consumo de energia e emissões de CO₂ com o transporte de quantidades suficientes de escórias, cinzas volantes, pozolanas, argilas calcinadas e calcários de seu local de produção para as plantas de cimento. Talvez por isso as tecnologias CCU e CCS deverão ser tidas na atualização do mapeamento tecnológico como as mais promissoras estratégias de mitigação no setor.

Novamente aqui cabe a crítica já feita se os padrões de avaliação dos valores cognitivos das hipóteses dos diferentes modelos de projeções de abatimento de impactos ambientais pelo setor cimenteiro, em especial, as estimativas de projeções de abatimento das emissões de CO₂, são suficientemente rigorosos para assegurar a imparcialidade desses modelos (LACEY, 1999, p. 60). Não estariam sendo esses modelos influenciados indevidamente por valores não cognitivos advindos das perspectivas de valor do progresso tecnológico e do capital e mercado, que, como vimos, têm fortemente influenciado as pesquisas tecnocientíficas no setor? Se for assim, qual seria a validade desses modelos enquanto marcos para orientar os investimentos em pesquisas voltadas a diminuir o impacto ambiental do setor cimenteiro no médio e longo prazo? Essas são questões a serem respondidas por todos os pesquisadores dedicados aos assuntos tratados nesta dissertação, em especial, aqueles voltados às investigações sobre ecoeficiência de cimentos compostos e novos aglomerantes.

Fazendo um balanço de todo o exposto nesta seção, vimos que a indústria cimenteira se apropriou de uma estratégia marcadamente econômica em voga (a substituição de clínquer por SCM e fileres para diminuição de custos de produção

com a diminuição do consumo de energia térmica na produção de cimentos) para convertê-la atualmente na principal estratégia tecnológica para mitigação das emissões de CO₂ pelo setor. No entanto, apesar do potencial dessa tecnologia para diminuir o consumo específico de energia térmica e as emissões específicas de gás carbônico, ela ainda não provou seu potencial efetivo de redução das emissões absolutas de CO₂ pelo setor cimenteiro mundial. Isto porque, em relação ao nível de emissão de 1,88 bilhões de toneladas de CO₂ em 2006 (IEA/WBCSD, 2009, p.2), o setor emite hoje em torno de 3,4 bilhões de toneladas, valor estimado a partir dos 4 bilhões de toneladas de cimento produzido em 2016 (USGS, 2017, p. 45) e do parâmetro de 0,842 toneladas de CO₂ para cada tonelada de cimento produzida (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 4), aumento de 1,8 vezes no período. Sendo assim, vemos que apesar das estratégias de substituição de clínquer pelos SCM e fíleres existirem há muitas décadas e serem ampliadas nos últimos trinta anos, não houve redução, mas aumento, das emissões de CO₂ pelo setor cimenteiro mundial. Como garantir que será diferente daqui para frente? Serão essas estratégias capazes de compensar o aumento da demanda por cimento até 2050, de modo a assegurar que cumpram, pelo menos, os 19% da meta assumida pelo setor no mapeamento tecnológico de 2009?

Com base na associação das perspectivas do progresso tecnológico, do capital e mercado, e da sustentabilidade baseada em três pilares, o setor cimenteiro aposta em respostas afirmativas para essas questões. Dentro do quadro avaliativo no qual as perspectivas de valor do progresso tecnológico e da sustentabilidade são vistas à luz da perspectiva do capital e mercado, o setor deposita, sobretudo nas pesquisas tecnocientíficas, a confiança de que os principais entraves técnicos, econômicos, sociais e ambientais para o sucesso dessas estratégias mitigadoras serão devidamente equacionados. Por isso, os valores dessas perspectivas assim combinadas têm orientado a adoção de estratégias de restrição e seleção nas universidades, institutos de pesquisas e centros de pesquisa, desenvolvimento e inovação de empresas. Em síntese essas estratégias de restrição e seleção têm promovido pesquisas sobre: os fatores determinantes da reatividade de argilas calcinadas; as propriedades de cimentos compostos que usam argilas calcinadas, pozolanas naturais, fíler calcário e outros SCM; a formulação de cimentos ternários e quartenários capazes de compensar os problemas observados no uso de argilas

calcinadas, pozolanas naturais e fíler calcário; à formulação de cimentos com uso otimizado de argilas calcinadas, fíler calcário (distribuição granulométrica otimizada) e aditivos químicos dispersantes, de modo a se obter fator clínquer de 50%, sem acarretar os problemas de maior fator água/cimento, baixa retenção de trabalhabilidade e baixas resistências iniciais; e à formulação de cimentos com diferentes tipos de SCM.

Segundo Scrivener, John e Gartner (2006, pp. 38-39), os focos dessas pesquisas são:

- a) dominar a trabalhabilidade do concreto fresco por meio do controle do empacotamento de partículas e do uso de dispersantes, de modo a resolver o problema com a predicabilidade da robustez de cimentos compostos relativamente à variação de seus componentes;
- b) desenvolver métodos efetivamente competitivos para produzir distribuições granulométricas de partículas em cimentos compostos.

Nas palavras desses autores, trata-se de abordagens baseadas no entendimento das características e interações de matérias-primas, e seus desenvolvimentos microestrutural e de reações de hidratação, que poderão ser adaptadas a uma larga variedade de matérias-primas reais sem a necessidade de extensivos testes empíricos de caráter local (ibid.).

Sendo assim, podemos constatar que se trata de pesquisas tecnocientíficas baseadas em estratégias descontextualizadoras voltadas gerar conhecimento básico que poderá ser facilmente aplicado no desenvolvimento de novos cimentos compostos. Essas pesquisas são, portanto, comercialmente orientadas e assumem o pressuposto da ecoeficiência como caminho mais promissor para que o setor cimenteiro mundial alcance o desenvolvimento sustentável, em especial, sua meta de redução de emissões de CO₂.

3.3.6 Novos aglomerantes

Como em quase todos os cimentos modernos mais de 65% de sua massa é constituída de óxido de cálcio, sendo a fonte desse cálcio o carbonato de cálcio de rochas calcárias, duas são as abordagens principais para produzir clínquer com baixas emissões de CO₂: ou usar matérias-primas alternativas com uma fração

significativa de cálcio na forma de não carbonatos, como já foi exposto em seção anterior, ou reduzir a quantidade de óxido de cálcio no clínquer (DAMTOFT et al., 2008, p. 119). Como poucas são as fontes de cálcio na forma de não carbonatos que possam ser prontamente utilizadas pela tecnologia corrente na indústria para a fabricação de cimentos, o caminho tecnológico que vem sendo atualmente bastante explorado é o da pesquisa tecnocientífica da formação química de clínqueres alternativos (ibid.).

Novos cimentos com menores emissões de CO₂ em relação às emissões do cimento Portland, mas com propriedades mecânicas similares, estão correntemente sendo pesquisados e desenvolvidos, sendo que alguns já são comercializados em pequena escala para nichos de mercado. A maioria desses novos aglomerantes não provou ainda sua viabilidade técnica e econômica, devendo passar por bateria de testes de escala e de longa duração, antes de sua aceitação, comercialização e normalização (IEA/WBCSD, 2009, p. 5). Por isso, seu impacto no futuro da indústria cimenteira não pode ainda ser mensurado, razão pela qual não foram incluídos no mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD (2009, p. 5).

Os cimentos do futuro precisarão, como o cimento Portland, estar baseados em materiais globalmente disponíveis e em grandes quantidades à flor da superfície, como o cálcio, o silício, o alumínio, o ferro, o sódio, o potássio e o magnésio, que perfazem mais de 98% da crosta terrestre (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 10). Alguns desses novos cimentos em desenvolvimento consistem de meras variações da composição do clínquer, enquanto outros não possuem sequer o óxido de cálcio, componente principal do clínquer. Alguns deles baseiam-se em conceitos básicos conhecidos por décadas, enquanto outros se baseiam em conceitos totalmente novos (SCHNEIDER et al., 2011, p. 649).

3.3.6.1 Cimentos alternativos com menos conteúdo de cálcio

A estratégia mais simples para o desenvolvimento de cimentos alternativos, seguida exaustivamente por diversas pesquisas, é a de produzir clínqueres ricos em belita (C₂S⁵⁸) e pobres em alita (C₃S⁵⁹). Considerando que a alita representa

⁵⁸ C₂S é abreviação da composição química da belita (2CaO.SiO₂).

⁵⁹ C₃S é abreviação da composição química da alita (3CaO.SiO₂).

usualmente, no mínimo, 60% da massa do moderno cimento Portland comum, sua completa substituição pela belita poderia reduzir as emissões específicas de CO₂ relativas às matérias-primas em cerca de 8%, pela redução da quantidade de calcário que precisará ser descarbonatado no forno. Por sua vez, com a redução da quantidade de calcário que precisa ser descarbonatado para a produção do cimento rico em belita, as emissões de CO₂ decorrentes da queima de combustíveis seriam também cerca de 8% menores (DAMTOFT et al., 2008, p. 119).

O estudo da ECRA/CSI, que considera o cimento rico em belita como aquele com pelo menos 90% de belita em massa, estima que sua produção reduza em até 200MJ a energia térmica consumida por tonelada de cimento, mas aumente o consumo específico de energia elétrica em até 40kWh, devido à maior dureza da belita em relação à alita e à necessidade de um cimento com partículas mais finas, exigindo mais do moinho, além de um rápido resfriamento do clínquer. Por isso, se, pelo lado das emissões diretas de CO₂ há uma redução de até 17Kg, pelo lado das emissões indiretas há um aumento de até 20kg por tonelada de cimento (ECRA/CSI, 2017, pp. 136-138).

Todavia, o maior desafio para os cimentos ricos em belita são geralmente suas taxas muito baixas de pega e endurecimento, o que não os tornam aceitáveis na maioria das aplicações modernas, sendo basicamente adequados para concretos massa, como os usados em barragens de usinas hidrelétricas ou em fundações, justamente por causa de seu baixo calor de hidratação e sua maior durabilidade. Pesquisas foram feitas para aumentar a reatividade hidráulica da belita, por meio de acelerado resfriamento e pela incorporação de elementos químicos, como potássio, sódio, ferro, cromo e bário. Por um lado, o aumento da concentração de álcalis com a incorporação desses elementos representa uma desvantagem desse cimento para a tecnologia do concreto, por dar margem a reações deletérias no concreto⁶⁰ (ECRA/CSI, 2017, pp. 136-138). Por outro lado, tentativas para o resfriamento acelerado do clínquer mostraram-se infrutíferas do ponto de vista econômico, com os equipamentos atualmente em uso na indústria cimenteira (ECRA/CSI, 2017, p. 23). Como não houve sucesso nas pesquisas em encontrar maneiras práticas e econômicas de ativar a belita feita em fornos convencionais de cimento, após décadas de estudo, esta abordagem foi correntemente abandonada (DAMTOFT et

⁶⁰ Como a reação álcali-agregado (RAA), reação química entre os álcalis do cimento e os agregados que ocorre na presença de água, formando um gel expansivo, que provoca a fissuração do concreto.

al., 2008, p. 119). Por isso, o potencial do cimento rico em belita para substituir o clínquer é bastante limitado (ECRA/CSI, 2017, p. 24).

O modelo laceyano das interações entre as atividades científicas e os valores traz elementos que parecem apropriados para comentar essas pesquisas tecnocientíficas relacionadas aos cimentos ricos em belita. Primeiramente, essas pesquisas, datadas do começo do século XX, quando foram feitos experimentos para se descobrir a composição química do clínquer e a função de cada componente na pega e endurecimento do cimento, foram motivadas pela perspectiva do progresso tecnológico, ou seja, do desenvolvimento técnico de um produto tecnológico amplamente disseminado nas sociedades modernas industrializadas, de modo a torná-lo controlável em suas características de aplicação, como já discutido no segundo capítulo.

Em segundo lugar, esses estudos foram, como vimos, inicialmente motivados pela perspectiva do capital e do mercado, tendo em vista que fabricar cimentos com menos calcário poderia implicar a possibilidade da economia de recursos materiais e energéticos, com conseqüente diminuição de seu custo de fabricação e melhoramento das margens de lucro e comercialização do produto. Num momento mais recente, com a emergência da sustentabilidade como valor social, esses estudos passaram também a ser motivados por este complexo de valor, mas numa perspectiva valorativa da dependência da sustentabilidade em relação ao complexo de valor do capital e do mercado, como já repetidamente comentado. Prova disso é que as pesquisas para aumentar a reatividade desses cimentos não vingaram sobretudo porque não se mostraram economicamente viáveis. Podemos fazer um exercício mental e perguntar: será que a indústria não insistiria nessas pesquisas sobre os cimentos ricos em belita, enfrentando as dificuldades técnicas para sua viabilização, caso se mostrassem economicamente vantajosos, ainda que o abatimento de CO₂ fosse irrisório, conforme apontado pela estimativa da ECRA/CSI (2017, pp. 136-138)? Vemos, assim, o quanto essas pesquisas sempre careceram de autonomia, como nos informa muito apropriadamente o modelo laceyano.

Outra alternativa tecnológica conhecida por várias décadas, mas que apenas recentemente foi considerada como uma estratégia para reduzir as emissões de CO₂ na indústria de aglomerantes, são os cimentos de aluminatos sulfúricos de cálcio

(*calcium sulfoaluminate cements* – CSA, na sigla em inglês). Esses cimentos podem ser feitos em plantas de cimento convencionais, requerendo apenas alterações nas proporções das matérias-primas principais (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 12). Eles são formados em temperaturas cerca de 100° C a 150° C mais baixas do que a temperatura de sinterização, sendo baseados principalmente nas fases yelimita (C_4A_3S' ⁶¹), belita, ferroaluminato (C_4AF ⁶²) e gesso em várias proporções (SCHNEIDER et al. 2011, p. 649). Por requerer menor temperatura e menor concentração de cálcio, sua produção emite menos CO₂ por tonelada produzida. As emissões de CO₂ associadas com sua fabricação diminuíram à medida que o conteúdo de yelimita aumenta (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 12). A solidificação do CSA é dada pela formação de etringita⁶³ e silicatos de cálcio hidratado⁶⁴. Estudos indicam seu potencial de aplicação em concreto pré-fabricados e concretos para serem lançados em baixas temperaturas (DAMTOFT et al., 2008, p. 119). Atualmente, sua produção gira em torno de dois milhões de toneladas, predominantemente na China (ECRA/CSI, 2017, p. 139).

Devido à baixa disponibilidade de fontes de alumínio e enxofre para a produção do CSA, esses aglomerantes podem ter apenas um papel suplementar na substituição do cimento Portland (SCHNEIDER et al., 2011, p. 649), ainda que na forma de misturas de CSA com silicatos de cálcio (cimentos ricos em aluminatos sulfúricos de cálcio), que sejam econômica e tecnicamente viáveis. Esses cimentos podem conter até 75% de CSA, composição com apenas 22% de conteúdo de CO₂ relativamente aos 53% dos cimentos Portland comuns (DAMTOFT et al., 2008, p. 119). Apesar desse grande potencial de abatimento das emissões de CO₂, os cimentos ricos em aluminatos sulfúricos de cálcio sofrem de limitações econômicas para sua maior produção e uso, como seu custo maior e a menor disponibilidade de matérias-primas em relação ao cimento Portland comum. Por isso, as pesquisas tecnocientíficas sobre esses novos cimentos encontram barreiras similares às vistas

⁶¹ C_4A_3S' é a abreviação da composição química da yelimita ($4CaO.Al_2O_3.3SO_3$).

⁶² C_4AF é a abreviação química do ferroaluminato de cálcio ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$).

⁶³ A etringita é um composto químico mineral de sulfato de cálcio e alumínio hidratado (C_6ASH_{32}), formando-se nos primeiros momentos da hidratação do cimento, pela combinação de sulfatos disponíveis em solução aquosa e o aluminato cálcico (C_3A) ou ferroaluminato cálcico (C_4AF), sendo a sua reação de formação uma das responsáveis pela pega e endurecimento do cimento.

⁶⁴ A hidratação do C_3S e C_2S origina silicatos de cálcio hidratados que possuem composição química muito variada e são representados genericamente por C-S-H e hidróxido de cálcio – $Ca(OH)_2$, compostos que preenchem o espaço ocupado previamente pela água e pelas partículas de cimento em dissolução.

para os cimentos ricos em belita, por serem realizadas e avaliadas no interior do marco institucional regulatório no qual predomina o complexo de valor do capital e do mercado, com a sustentabilidade e a perspectiva do progresso tecnológico subordinadas a ele. Isto é, não se inserindo amplamente nas relações vigentes de mercado (*business as usual*), essas inovações servem para atender nichos desse mercado, sendo voltadas para aplicações especiais do concreto, de modo que sua maior disseminação e sua maior contribuição para reduzir o impacto do setor dependem fortemente de outras inovações e avanços tecnológicos, capazes de baratear seus preços e melhorar a relação custo/benefício para os investidores e produtores.

Dentro dessa perspectiva de avaliação, outra estratégia de investigação desenvolvida pelos fabricantes de cimento tem sido combinar os cimentos ricos em belita com os cimentos de aluminatos sulfúricos de cálcio (BCSA, *belite calcium sulfoaluminate cements*, na sigla em inglês), buscando uma relação mais favorável em termos de balanço entre custos das matérias-primas e abatimento das emissões de CO₂ (DAMTOFT et al., 2008, p. 119). Esses cimentos têm desempenho similar ao cimento Portland e são produzidos em plantas de cimento convencional, mas sua produção requer temperaturas de sinterização entre 150° C e 200° C mais baixas, com emissões correlatas de CO₂ de 20 a 30% menores. Como são mais fáceis de moer, os BCSA requerem de 30 a 50% menos energia elétrica (ECRA/CSI, 2017, p. 139).

Pesquisas recentes na Europa têm focado nos estudos e desenvolvimentos de cimentos baseados em clínqueres constituídos majoritariamente por belita, yelimita e ferrita⁶⁵ (BYF), em razão da manufatura desses clínqueres requerer quantidades menores de matérias-primas ricas em alumínio em relação aos CSA. Os aglomerantes BYF, como o “Aether” e o “Ternocem”, têm potencial para substituir o cimento Portland na maioria das aplicações, com intensidade específica de CO₂ 20% menor, no mínimo. A principal barreira atual para sua comercialização são os altos custos de suas matérias-primas (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 12). Uma solução para o barateamento desses custos é o uso de rejeitos de bauxita como matéria-prima para sua fabricação (ibid.). No entanto, sua produção em larga escala deve ocorrer apenas quando os custos de emissão de CO₂ forem

⁶⁵Ferrita tem composição química C₄AF.

significativamente maiores do que é atualmente (ibid.). A despeito disso, a tecnologia do BYF é muito mais barata do que a do CCS (ibid.).

Sendo a ordem de abatimento das emissões de CO₂ dos BCSA da mesma magnitude de redução promovida pela fabricação de cimentos compostos, ela se configura como uma alternativa para os locais sem disponibilidade de materiais cimentícios suplementares. No entanto, ganhos mais expressivos nas reduções de CO₂ podem ser obtidos mesclando-se as duas abordagens, isto é, com a produção de cimentos ricos em belita e aluminatos sulfúricos de cálcio e com altas porcentagens de SCM (DAMTOFT et al., 2008, p. 119).

Durante a hidratação do BCSA, são formadas as fases de hidróxido de alumínio⁶⁶ e etringita (responsáveis pela resistência em baixas idades), bem como hidratos de silicatoaluminoso de cálcio⁶⁷, responsáveis pela resistência em altas idades. Por isso, o perfil de ganho de resistência depende fundamentalmente da composição desses cimentos (ECRA/CSI, 2017, p. 24). Atualmente, esses cimentos são comercializados na Europa, sendo bem mais caros do que os cimentos comuns, devido ao uso de bauxita e sulfatos. Seu maior uso para fins estruturais e não estruturais está na China. Sua produção anual gira em torno de 2 milhões de toneladas (ibid.).

Um conjunto de novos aglomerantes baseado, como o cimento Portland, na formação de hidratos de silicatos de cálcio é tecnicamente chamado de hidrossilicatos de cálcio (CHS, *calciumhydrosilicates*, na sigla em inglês) e comercialmente de celitamento (*celitement*). Sua produção é baseada em matérias-primas ricas em cálcio e silício, que são processadas em três estágios: calcinação do calcário; reação da cal, sílica e água num container fechado a uma temperatura de 200°C e pressão de 12bar, para produzir hidratos de cálcio (C₂SH) não hidráulicos; e secagem e moagem do C₂SH com fíler silicioso, como o quartzo, diminuindo a proporção entre cálcio e silício das fases de CSH, tornando o CSH hidráulico (ECRA/CSI, 2017, p. 134).

Como as proporções entre cálcio e silício do celitamento são mais baixas do que a do cimento Portland (em razão do maior conteúdo de fíler inerte, como o quartzo), as emissões de CO₂ derivadas da calcinação do calcário são teoricamente

⁶⁶Hidróxido de alumínio, composto químico de fórmula Al(OH)₃, é a mais estável forma de alumínio nas condições normais. Ele é encontrado na natureza como o mineral gibbsita.

⁶⁷CASH.

menores (SCHNEIDER et al, 2011, p. 649). ECRA/CSI (2017, p. 134) estimam emissões de 483kg de CO₂ por tonelada de celitamento produzida, o que corresponde a cerca de 57% das emissões de CO₂ com a produção de clínquer. Porém, em razão da tecnologia estar ainda em desenvolvimento em nível laboratorial, Scrivener, John e Gartner (2016, p. 13) argumentam que nenhuma estimativa confiável pode ainda ser feita com relação à eficiência energética e à redução das emissões de CO₂ para o contexto real de sua produção industrial. Para esses autores, a manufatura da belita reativa no CHS tem potencial mitigador de emissões de CO₂ similar ao potencial da produção da belita nos cimentos ricos em belita, mas diferentemente desses os CHS apresentam taxas muito mais altas de desenvolvimento de resistências, fato que possibilita níveis maiores de diluição de fíleres com baixas emissões de CO₂ no CHS (ibid.).

Sendo reportado que o celitamento é compatível com os cimentos convencionais e com os aditivos em uso, com suas propriedades hidráulicas similares aos dos cimentos convencionais (ECRA/CSI, 2017, p. 134), esse tipo de aglomerante tem grande potencial para substituição do cimento Portland, com vistas a mitigar as emissões de CO₂ pelo setor, se confirmadas as estimativas. Para isso, no entanto, será necessário aperfeiçoar os estágios de autoclave e de moagem na produção do celitamento, que são distintos dos processos de produção do cimento Portland. Atualmente em fase de pesquisa e desenvolvimento, a produção do celitamento precisa ganhar escala industrial, sendo que uma planta industrial para sua produção é prevista para 2018 (ibid.).

Outra abordagem de pesquisa voltada à produção de cimentos com baixo conteúdo de cálcio é a do desenvolvimento de clínqueres de silicatos de cálcio curados por carbonatação (CCSC, na sigla em inglês : carbonation calcium silicates clinkers), patenteados como *Solidia Cement*. Esses clínqueres são produzidos em fornos convencionais de cimento, usando matérias-primas comuns (calcário e sílica), a uma temperatura de 1200°C, sendo constituídos por wollastonita ou pseudowollastonita⁶⁸ e rankinita⁶⁹, silicatos com baixa concentração de cálcio em relação à sílica (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 13). Esses compostos reagem com o gás carbônico (carbonatação), formando outros compostos, que

⁶⁸ CaO.SiO₂.

⁶⁹ 3CaO.2SiO₂.

conferem pega e endurecimento ao cimento em função do tempo de cura. Por isso, este tipo de cimento é não hidráulico (ECRA/CSI, 2017, p. 132).

Se, por um lado, o *Solidia Cement* é feito, como o celitamento, com as mesmas matérias-primas do cimento Portland, por outro, por requerer um ambiente rico em gás carbônico e temperaturas de 20°C a 60°C, seu uso torna-se mais apropriado para a indústria de pré-fabricados, próximas às plantas de cimento dotadas de sistemas de captura e uso do CO₂, para produção de peças não estruturais de concreto, como pisos, telhas e dormentes (ECRA/CSI, 2017, p. 22/p. 132).

É reportado que a produção desse cimento não hidráulico emite até 30% menos de CO₂ em comparação com a produção do cimento Portland. Além disso, durante o processo de cura, de 200 a 300 kg de CO₂ por tonelada de cimento é sequestrada pelo processo de carbonatação. Por isso, estima-se que a pegada de carbono deste cimento é reduzida em até 70% em relação à pegada carbono do cimento Portland (ECRA/CSI, 2017, p. 22/p. 132).

Vemos, assim, que, apesar de ser um aglomerante com futuro tão promissor quanto o do celitamento, o uso do *Solidia Cement* depende, em contrapartida, de uma série de questões em aberto, tais como: desenvolvimentos no reuso, condicionamento e armazenamento de CO₂ (tecnologia que, como vimos, está ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento, e cuja implantação depende do encaminhamento e resolução de um conjunto de problemas de ordem técnica, econômica, política e social); aperfeiçoamentos técnicos quanto ao fornecimento, estocagem, segurança e otimização de sistemas de cura (que dependem também da resolução de questões técnicas, econômicas, políticas e sociais em aberto); expansão do mercado de elementos pré-fabricados não estruturais (por meio de estratégias mercadológicas ou de políticas setoriais de governo para incentivo de sua comercialização e uso); e desenvolvimentos de armaduras resistentes à corrosão, para possibilitar sua aplicação técnica e econômica na indústria de pré-fabricados com função estrutural (ECRA/CSI, 2017, p. 22/p. 132).

Tabela 12 – Percentual máximo de abatimento nas emissões específicas de CO₂ na produção dos novos aglomerantes em relação às emissões de gás carbônico na produção de cimento Portland comum

Novos aglomerantes	Varição máxima no consumo de energia térmica (MJ/t)	Varição máxima no consumo de energia elétrica (kwh/t)	Varição máxima na intensidade de carbono (kg/t)	Varição máxima no consumo de energia térmica (%)	Varição máxima no consumo de energia elétrica (%)	Abatimento máximo das emissões de CO ₂ na produção (%)
Ricos em belita (100% de substituição)						16*
Ricos em belita (+90% de substituição)	-200*****	+40*****	+3*****	-6 ⁺	+38 ⁺⁺	+0,3 ⁺⁺⁺
Cimentos de aluminatos sulfúricos de cálcio (CSA)	-	-	-	-	-	31*
Ricos em aluminatos sulfúricos de cálcio e belita (BCSA) BYF	-	-	-	-	50%**	20 a 30** 20*****
Celitamento (CSH)	-	-	-	-	-	43***
Solidia Cement (CCSC)	-	-	-	-	-	30****

Notas :

*Damtoft et al. (2008, p. 119);

**ECRA/CSI (2017, p. 139);

***ECRA/CSI (2017, p. 134);

****ECRA/CSI (2017, p. 132);

*****ECRA/CSI (2017, pp. 136-138);

*****Scrivener, John e Gartner. (2016, p. 12);

⁺Estimativa a partir dos dados respectivos da linha e de ECRA/CSI (2017, pp. 8-10) (não incluso impacto da adição de gesso no cimento no cálculo) ;

⁺⁺Estimativa a partir dos dados respectivos da linha e de ECRA/CSI (2017, pp. 11-13);

⁺⁺⁺Estimativa a partir dos dados respectivos da linha e de Scrivener, John e Gartner (2016, p. 4) (não incluso impacto da adição de gesso no cimento no cálculo).

Em suma, percebemos que, com exceção, do CHS, que se encontra atualmente em fase laboratorial de pesquisa e cuja manufatura requer estágios adicionais de produção, todos os demais novos aglomerantes discutidos até aqui são produzidos em plantas convencionais de cimento, sendo facilmente adaptados ao processo de manufatura do cimento Portland, requerendo apenas mudanças nas composições das matérias-primas que entram nos fornos rotatórios. Esses aglomerantes já estão em fase de comercialização, mas ainda não ganharam escala produtiva, devido a barreiras técnicas (baixas taxas de pega e endurecimento, para os casos dos cimentos ricos em belita, e sistemas especiais de cura, para o caso dos CCSC) e, sobretudo, a barreiras econômicas (altos custos das matérias-primas e baixa disponibilidade de seu fornecimento). Alguns desses novos aglomerantes já existiam bem antes da emergência e consolidação da perspectiva de valor da sustentabilidade (cimentos ricos em belita e cimentos ricos em aluminatos de cálcio), sendo sua pesquisa e desenvolvimento motivados por valores econômicos (perspectiva de valor do capital e mercado), enquanto que outros foram desenvolvidos com vistas a contribuir com a mitigação de impactos ambientais pelo setor (CHS e CCSC), desde que se mostrem economicamente viáveis (perspectiva da sustentabilidade à luz da perspectiva do capital e mercado). Levando em consideração os dois aspectos – econômico e ambiental – outros novos aglomerantes foram desenvolvidos a partir de aglomerantes alternativos já existentes, com vistas a balancear os custos das matérias-primas com os benefícios da redução de emissões de CO₂ por unidade produzida (BCSA e BYF).

Em relação aos dados compilados na Tabela 12, vemos que de todas as inovações tratadas até aqui, o celitamento é o aglomerante alternativo com o maior potencial de abatimento das emissões de CO₂ pelo setor cimenteiro. No entanto, esse dado referente ao celitamento é uma estimativa pouco confiável, devido ao fato de não refletir o real abatimento do aglomerante em condições industriais de produção. Por isso, o BCSA, o BYF e o CCSC mostram-se como as alternativas de aglomerantes mais promissoras em termos de abatimento de emissões de CO₂ por esse ramal da via da ecoeficiência. É importante destacar, porém, que, devido à baixa produção e comercialização desses aglomerantes, por motivos econômicos (maiores custos das matérias-primas) para o BCSA e BYF e por motivos técnicos (CCU e sistemas especiais de curas) para o CCSC, esse potencial de abatimento por unidade produzida não pode ainda ser devidamente projetado para o potencial

de abatimento em termos absolutos. Por isso, essas tecnologias ainda não demonstraram sua efetividade enquanto estratégias mitigadoras de emissões absolutas de CO₂ pelo setor cimenteiro mundial. Por enquanto, elas são promessas baseadas na perspectiva do progresso tecnológico, ou seja, crenças de que as principais barreiras técnicas e econômicas serão superadas pela pesquisa e desenvolvimento apoiados em estratégias descontextualizadoras. Na avaliação de Scrivener, John e Gartner (2016, p. 39, tradução nossa) em relação ao potencial da BYF:

Mais P&D nesta área direcionados para aumentar a relação entre desempenho/custo parecem justificadas, tendo em vista que a BYF pode permitir maior progresso em termos de redução das emissões de CO₂ em relação às abordagens baseadas exclusivamente em clínquer de cimento Portland, e a um custo bem menor do que a CCS.

3.3.6.2 Cimentos alternativos sem conteúdo de cálcio

Desenvolvidos em 1970, os geopolímeros ou materiais ativados por álcalis (AAM) ganharam impulso recentemente com a emergência do valor da sustentabilidade, por causa da baixa emissão de CO₂ em sua produção (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 21). Referem-se a um largo conjunto de aglomerantes que se utiliza de rejeitos industriais (cinzas volantes e escórias granuladas de alto forno) ou de fontes naturais de silicatos de alumínio (metacaulim e pozolanas naturais), capazes de endurecer em meio altamente alcalino (SCHNEIDER et al., 2011, p. 649). Sua pega e ganho de resistência podem ser atribuídas a reações de polimerização por etapas (policondensação), que formam redes tridimensionais inorgânicas de silicatos de alumínio. As características de desempenho desses aglomerantes dependem basicamente de sua composição química e das condições de ativação (ibid.). Particularmente, a sensibilidade desses geopolímeros à diluição em água torna difícil sua aplicação ordinária em concretos, uma vez que os agregados frequentemente possuem umidade em graus variáveis (ECRA/CSI, 2017, p. 129).

Os geopolímeros são atualmente comercializados em pequena escala, não tendo sido ainda aplicados em projetos de larga escala, nos quais a resistência seja parâmetro crítico (IEA/WBCSD, 2009, p. 5). Seu uso no setor construtivo tem sido

para propósitos de demonstração em aplicações não estruturais, como pavimentos, tubos e pisos, sendo a primeira planta industrial para sua produção construída na Austrália (ECRA/CSI, 2017, p. 129).

As vantagens no uso de geopolímeros seriam suas altas resistências iniciais e finais, sua resistência contra ataques químicos, a boa passivação da armadura, sua microestrutura densa e sua resistência ao fogo (SCHNEIDER et al., 2011, p. 649). No entanto, os altos custos dos ativadores (hidróxido de sódio⁷⁰ e hidróxido de potássio⁷¹), o alto consumo energético (associado com as emissões de CO₂) e a baixa disponibilidade das matérias-primas limitam o uso dos geopolímeros e seu potencial para substituir o cimento Portland (*ibid.*). A maior parte da escória granulada de alto forno adequada para a produção de geopolímeros, o principal componente de quase todas as aplicações de sucesso, já é destinada para a produção de cimentos compostos. Se essa escória fosse desviada para a produção de geopolímeros, as emissões específicas de CO₂ decorrentes seriam menores, porém as emissões absolutas globais do setor não seriam diminuídas, talvez aumentassem, em decorrência: do aumento das emissões específicas de CO₂ dos materiais à base de cimento Portland por causa da falta de disponibilidade de escória granulada de alto forno para produzir cimentos compostos; e das emissões de CO₂ associadas com a produção dos ativadores alcalinos (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 21).

Ao se comparar o concreto com cimento Portland e os concretos com geopolímeros com igual desempenho, os estudos têm revelado que os concretos com geopolímeros, apesar de terem menor intensidade de carbono, são mais custosos, demandando maior quantidade de recursos materiais e energéticos (ECRA/CSI, 2017, p. 129). Por isso, o estudo da ECRA/CSI conclui que o uso de cimentos compostos em aplicações ordinárias do concreto é mais conveniente, em termos econômicos e ambientais, do que o uso de geopolímeros no concreto, que devem ser destinados para produtos específicos (*ibid.*).

Para Scrivener, John e Gartner (2016, p. 21), os materiais para a produção de geopolímeros que poderiam verdadeiramente reduzir as emissões de CO₂ no setor (argilas calcinadas e silicato de sódio, seu ativador) dependem da invenção de processos produtivos com menor consumo de energia e que aumentem

⁷⁰ NaOH.

⁷¹ KOH.

significativamente a produção, o que requer significativos investimentos. Para eles, as pesquisas sobre esses AAM são merecedoras de mais fundos, tendo em vista seu potencial para substituir grandes quantidades de cimento Portland nos concreto e, assim, reduzir as emissões de CO₂ no setor construtivo (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 39). Outra área de pesquisa refere-se ao uso de subprodutos de outros setores industriais, como cinzas de carvão e de produtos agrícolas, bem como escórias não ferrosas, como ativadores alcalinos. Essas pesquisas têm atualmente se proliferado, mas têm gerado pouca informação genérica transferível para um entendimento largo dos fatores subjacentes (ibid.). Nos termos do modelo teórico de referência, essas pesquisas não têm sido fecundas.

A produção e uso de geopolímeros na construção civil depende ainda de resolução de várias questões em aberto, como as relacionadas com a definição e a padronização dos métodos de ensaio para validação de suas propriedades, de sua durabilidade e de sua segurança no ambiente de trabalho, que limitam ainda mais sua aplicação atual (ECRA/CSI, 2017, p. 131).

Por fim, outro tipo de aglomerante hidráulico não baseado em óxidos de cálcio, mas sim em óxidos de magnésio, é o Novacem (SCHNEIDER et al, 2011, p. 649). Suas matéria-primas são rochas ricas em silicatos de magnésio (disponíveis globalmente em grandes quantidades), ao invés dos carbonatos de cálcio, responsáveis, como vimos, por mais da metade das emissões de CO₂ devido ao processo de descarbonatação do cimento Portland. Os silicatos de magnésio são processados e convertidos em carbonatos e hidróxidos de magnésio por meio de um processo autoclavado sob temperatura de 180°C. Em seguida, os carbonatos e hidróxidos de magnésio são calcinados numa temperatura aproximada de 700°C, para formar óxido de magnésio (ibid.). À mistura são adicionados ainda aditivos minerais para acelerar o desenvolvimento de resistências pela modificação das reações de hidratação (ibid.). O processo pode ter verdadeiramente pegada carbono negativa, a depender da quantidade de carbonatos de magnésio formados no processo de endurecimento desse aglomerante, pois tal processo leva à absorção de CO₂, enquanto que as rochas ricas em silicatos de magnésio são ausentes de CO₂ (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 13). No entanto, pouco ainda se sabe sobre esse novo aglomerante, a não ser informações disponibilizadas por seus inventores. Artigos científicos sobre seu processo de produção, seus mecanismos

de endurecimento, seu desempenho e durabilidade são esperados à medida que as pesquisas tecnocientíficas avancem (SCHNEIDER et al, 2011, p. 649). Na avaliação de Scrivener, John e Gartner (2016, p. 13), como nenhum processo de manufatura industrial energeticamente eficiente foi ainda inventado, mais pesquisa é necessária para tentar viabilizar no longo prazo, por meio da produção de cimentos baseados em óxidos de magnésio, reduções significativas de emissões de CO₂ no setor.

Em balanço, podemos dizer sobre os novos aglomerantes não baseados em óxidos de cálcio:

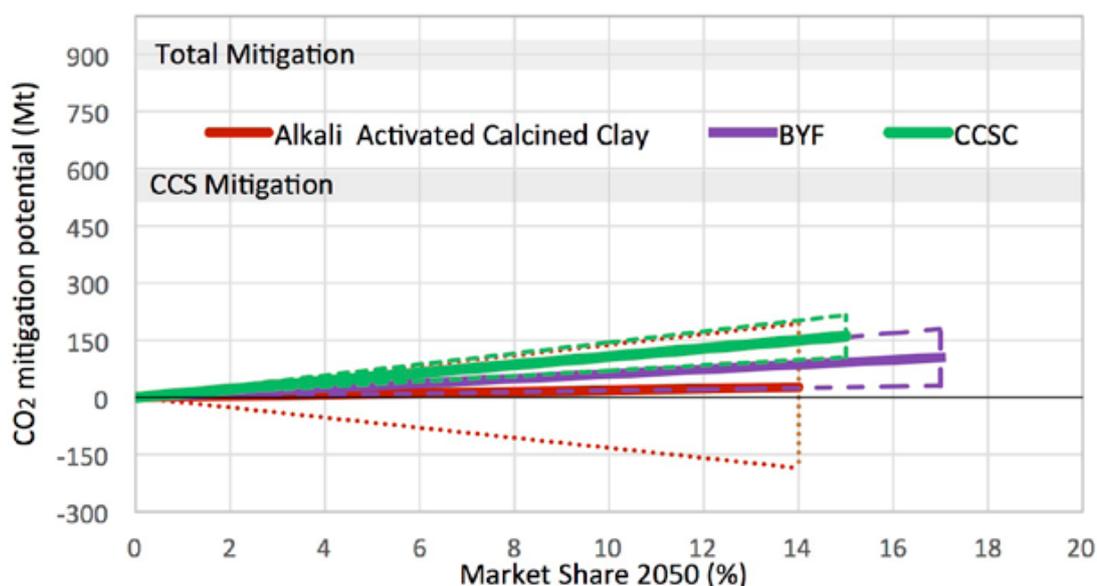
- a) os geopolímeros existem bem antes das preocupações com o meio ambiente, sendo as pesquisas atualmente desenvolvidas com vistas a superar os altos custos de produção dos seus ativadores e a baixa disponibilidade de suas matérias-primas (perspectiva do capital e mercado), para, assim, os viabilizar economicamente, uma vez que existe neles alto potencial para absorver subprodutos de outros segmentos industriais (ecologia industrial) e de reduzir as emissões de CO₂ no setor construtivo, caso seja resolvido o problema com o alto consumo energético na produção desses ativadores (perspectiva da sustentabilidade à luz da perspectiva do capital e mercado e da perspectiva do progresso tecnológico);
- b) os cimentos baseados em óxidos de magnésio têm desenvolvimento recente, sendo as pesquisas motivadas pela promessa de que tenham pegada negativa de carbono (perspectiva da sustentabilidade); no entanto, até o momento não foi desenvolvido nenhum processo energeticamente eficiente de manufatura industrial desses cimentos, de modo que são necessárias mais pesquisas tecnocientíficas para determinar se esses cimentos são ou não viáveis economicamente (perspectiva do capital e mercado).

Importante destacar que os geopolímeros e os cimentos baseados em óxidos de magnésio são potenciais concorrentes tanto dos atuais cimentos Portland como dos novos aglomerantes baseados em óxidos de cálcio, que, como vimos, podem ter sua manufatura facilmente aplicada nas plantas convencionais de cimento. A manufatura desses novos aglomerantes é bastante diversa da produção de cimentos baseados em óxidos de cálcio, assim como as matérias-primas usadas nessa produção são também distintas. Sendo assim, esses novos aglomerantes não baseados em óxidos de cálcio não são estratégias do setor cimenteiro para mitigar

as emissões de CO₂, mas estratégias do setor construtivo. Dessa forma, devemos pesar que as avaliações dos geopolímeros e dos cimentos baseados em óxidos de magnésio feitas em artigos e relatórios ligados às associações, instituições de pesquisa e empresas do setor cimenteiro devem ser vistas com alguma reserva. Como não são estratégias mitigadoras do setor cimenteiro, elas fogem ao escopo desta dissertação e, em razão disso, foram brevemente descritas e comentadas, para fins de comparação.

O Gráfico 20 resume as estimativas do potencial de mitigação dos novos aglomerantes analisados na seção para o ano de 2050, em função da fatia de mercado desses novos cimentos, para o cenário de baixa demanda do IEA ETP 2016. Vemos que os potenciais de mitigação desses novos aglomerantes estão bem abaixo dos potenciais de mitigação dos cimentos compostos com fator clínquer de 50% (Gráficos 18 e 19). Tal comparação parece indicar que a estratégia tecnológica de substituição de clínquer por SCM e fíleres deve continuar como principal estratégia mitigadora do setor cimenteiro, devendo a estratégia de desenvolvimento de novos aglomerantes ser usada complementarmente àquela.

Gráfico 20 - Estimativas do potencial de mitigação dos novos aglomerantes para o ano de 2050, em função da fatia de mercado desses novos cimentos, para o cenário de baixa demanda do IEA ETP 2016



Fonte : Scrivener, John e Gartner (2016, p. 35).

CONCLUSÃO

O objetivo principal desta dissertação foi investigar como os valores cognitivos e não cognitivos têm influenciado as pesquisas tecnocientíficas sobre os cimentos e os aglomerantes alternativos. Para isso, o modelo laceyano das interações entre as atividades científicas e os valores foi aplicado para entender e interpretar os episódios-chave do desenvolvimento científico e tecnológico do cimento, bem como avaliar criticamente as iniciativas que têm sido adotadas pelo setor cimenteiro para cumprir suas metas de abatimento de emissões de dióxido de carbono, no intuito de contribuir para o desenvolvimento sustentável.

Em relação à aplicação do modelo laceyano aos episódios-chave do desenvolvimento científico e tecnológico do cimento, chegamos às seguintes conclusões gerais. O conhecimento tradicional de preparação de argamassas de cal e cimento e de seu uso para diversos propósitos construtivos foi o resultado consolidado do acúmulo de experiências milenares, baseadas em tentativas e erros, de diferentes povos, que foram transmitidas e desenvolvidas sistematicamente ao longo de gerações; esse conhecimento empírico e sistemático é caracterizado à luz do modelo laceyano como conhecimento científico, em razão deste modelo postular para a ciência o pluralismo multiestratégico. Esse conhecimento tradicional sobre argamassas foi posteriormente testado empiricamente em condições laboratoriais controladas, sendo as hipóteses confirmadas mantidas no estoque do conhecimento científico moderno e rearticuladas com novas hipóteses construtivas advindas desses experimentos, para serem usadas em projetos práticos, conforme relatado e comentado nos experimentos de Smeaton com argamassas de cimento para a construção do Farol de Eddystone.

Os traços da moderna metodologia científica estavam presentes nessas investigações realizadas a partir da segunda metade do século XVIII. No relato de Smeaton, destacamos:

- a) a oposição ao dogmatismo, à aceitação de princípios tradicionais sem uma base empírica sólida e consistente (como o princípio da rocha mais dura resultar na argamassa de cal hidráulica mais dura);

- b) o caráter empírico e sistemático dos procedimentos experimentais para testar as hipóteses construtivas em voga (ensaios com bolas de argamassa imersas em água, repetidos várias vezes);
- c) a centralidade dos experimentos, com o controle rigoroso de parâmetros de interesse do pesquisador para o atendimento das condições de intersubjetividade e replicabilidade (medidas dos materiais usados e procedimentos padrão para o preparo dos corpos de prova, para seu teste e para sua avaliação);
- d) a predominância do valor cognitivo da adequação empírica (de tipo qualitativo: avaliação relativa da firmeza, consistência, dureza e consolidação de forma do corpo de prova) na avaliação das hipóteses;
- e) o objetivo mais profundo do controle humano dos materiais para a fabricação de cimentos e argamassas com propriedades ajustadas aos propósitos construtivos nesses experimentos, revelando a influência do valor social do progresso tecnológico nessas investigações no nível da escolha da estratégia de restrição e seleção (ou seja, no nível do tipo de hipóteses e teorias sobre o processo de endurecimento de cimentos e argamassas a serem consideradas como passíveis de uma avaliação empírica e sistemática);
- f) a estratégia de buscar teorias ou hipóteses que explicassem o fenômeno da hidráulidade numa ordem subjacente abstraída dos contextos de sua ocorrência, caracterizada predominantemente por relações quantitativas (variáveis de entrada dos experimentos: proporções entre as matérias-primas consideradas e entre os principais constituintes dessas matérias-primas);
- g) o vínculo indissociável entre a pesquisa teórica (causas da hidráulidade) e a pesquisa prática (formulação de argamassas com propriedades construtivas específicas a partir do controle de matérias-primas), que caracteriza essas investigações como pesquisas tecnocientíficas;
- h) a influência de valores não cognitivos (culturais, sociais, econômicos e políticos) nessas pesquisas tecnocientíficas, determinando objetos de estudo (tipos de materiais pesquisados, suas quantidades e seus custos) e possibilidades de interesse (substituição de um material por

outro por motivos políticos e econômicos), o que demonstra a falta de autonomia dessas investigações (a busca por um cimento econômico mostra que as pesquisas tecnocientíficas eram comercialmente orientadas);

- i) a preservação da imparcialidade nas investigações, uma vez que a influência dos valores não cognitivos não se estende ao momento de escolha entre hipóteses, marcado exclusivamente por valores cognitivos (adequação empírica e consistência).

No relato de Vicat, se sobressai:

- a) o caráter empírico e sistemático das pesquisas (imenso número de experimentos, cujos resultados foram compilados em 25 tabelas);
- b) a centralidade dos experimentos (método de ensaio para classificação das rochas calcáreas quanto à hidraulicidade das cales derivadas delas; análise química das diferentes categorias de cales; ensaios com bolas de argamassa feitas com variadas proporções de cal e argila), caracterizados pelo controle rigoroso e isolamento de parâmetros sob avaliação (pega e tempo de pega; porcentagens entre os materiais constituintes das cales), e pelas condições de intersubjetividade e replicabilidade (tempo de pega e agulha de Vicat);
- c) a predominância do valor cognitivo da adequação empírica (de tipo qualitativo e quantitativo: pega, consistência e dureza e seus respectivos tempos de estabelecimento) na avaliação das hipóteses;
- d) a consistência com os fatos, princípios, métodos e teorias da química moderna, bem como com as descobertas de pesquisas anteriores sobre o objeto de estudo;
- e) o objetivo do controle humano dos materiais, seja por meio da classificação de cales através de método de ensaio, seja para a fabricação de cimento artificial por meio do conhecimento e do controle de suas matérias-primas (proporcionamento entre calcário e argila);
- f) a influência do valor social do progresso tecnológico nessas investigações no nível da escolha da estratégia de restrição e seleção (causas materiais da hidraulicidade: proporção entre calcário e argila);

- g) a estratégia descontextualizadora de buscar por teorias ou hipóteses que explicassem o fenômeno da hidraulicidade numa ordem subjacente abstraída dos contextos de sua ocorrência, caracterizada predominantemente por relações quantitativas (proporção entre calcário e argila e condições de temperatura determinando a formação de compostos com propriedades hidráulicas);
- h) o vínculo indissociável entre a pesquisa teórica (causas da hidraulicidade) e a pesquisa prática (fabricação de cimentos artificiais), que caracteriza as investigações como pesquisas tecnocientíficas;
- i) as relações mutuamente reforçadoras entre a estratégia descontextualizadora da pesquisa sobre as causas da hidraulicidade e as perspectivas de valor do progresso tecnológico (a obtenção de cales, cimentos e argamassas com melhores propriedades hidráulicas e por meios mais fáceis e práticos) e do capital e mercado (a obtenção do melhor custo/benefício na produção de cales, cimentos e argamassas, com o desenvolvimento de um produto construtivo inovador, padronizado, patenteado e competitivo – o cimento moderno), que enquadram essa pesquisa como tecnocientífica comercialmente orientada;
- j) a separação entre o nível das possibilidades investigadas (influenciado por valores não cognitivos, a ponto de Vicat ser considerado o criador da indústria moderna de cimento) e o nível da avaliação das hipóteses e teorias (marcado exclusivamente pelos valores cognitivos, como a adequação empírica e a consistência), que preserva o ideal da imparcialidade, mas não assegura o ideal da autonomia da pesquisa.

Em certos momentos, as pesquisas sobre as causas da hidraulicidade de cales e cimentos não preservaram o ideal da imparcialidade, seja por não considerarem os mais altos padrões de avaliação disponíveis dos valores cognitivos nas hipóteses em disputa (Bergmann), seja por deixarem que valores não cognitivos (prestígio e autoridade) influenciassem furtivamente os juízos na escolha entre hipóteses empiricamente avaliadas (Guyton de Morveau e Nicolas-Théodore de Saussure).

O caráter comercialmente orientado das pesquisas tecnocientíficas sobre cales e cimentos é reiteradamente reforçado com o uso do conhecimento gerado nas investigações científicas para fins de patenteamento de processos e produtos, como ficou demonstrado no caso das patentes de cimentos naturais (a patente de Parker de seu cimento romano teve como ponto de partida as investigações de Smeaton) e de cimentos artificiais (a patente de Saint Leger de seu cimento artificial baseou-se nas pesquisas de Vicat); nesses casos, essas pesquisas tecnológicas apossaram-se do conhecimento público vigente para gerar conhecimento aplicado privado, que, ao contrário daquele, era mantido em segredo, o que pode explicar por que o cimento Portland não tem uma data de origem e um criador historicamente bem determinados.

Até o começo do século XX, as atividades científicas relacionadas às investigações sobre os constituintes químicos da cal hidráulica e do cimento, bem como sobre as reações de hidratação desses compostos, careceram de uma estratégia fecunda de restrição e seleção, isto é, uma estratégia de pesquisa capaz de gerar crescentemente dados, procedimentos empíricos e teorias que, combinados, manifestassem os valores cognitivos no mais alto grau e os padrões mais rigorosos de avaliação disponíveis. Em razão disso, perduraram até o começo do século XX teorias e hipóteses contraditórias sob disputa, derivadas de uma variedade de pesquisas de análise química e petrográfica (pesquisas baseadas em estratégias descontextualizadoras de restrição e seleção, como as de Berthier, Rivot, Fremy, Le Chatelier, Tornebohm, Zulkowski, Meyer e Cobb). Esse panorama começou a mudar com as investigações de Le Chatelier, caracterizadas por:

- a) vínculo entre seu objetivo teórico (entender mais aprofundadamente a natureza dos compostos químicos dos cimentos, suas propriedades e suas reações com a água) e seu objetivo prático (determinar e controlar a formação desses compostos, controlando, assim, as propriedades dos cimentos e, dessa forma, contribuir para o desenvolvimento tecnológico desse material), sendo enquadradas como pesquisas tecnocientíficas comercialmente orientadas (ou seja, em relações mutuamente reforçadoras com a perspectiva de valor do capital e mercado);

- b) estratégia descontextualizadora de restrição e seleção (descrição dos constituintes do clínquer e dos fenômenos relacionados à sua formação durante a calcinação e à formação de compostos hidratados durante seu endurecimento por meio da análise de amostras sob o microscópio para identificar suas espécies químicas);
- c) relações mutuamente reforçadoras entre pesquisa teórica e pesquisa tecnológica, em razão da centralidade dos experimentos, que faz com que os fenômenos da calcinação e hidratação de cimentos sejam descritos em condições laboratoriais controladas, independentemente de seu contexto de aplicação, por meio de fórmulas químicas explicativas das reações químicas de formação dos compostos da calcinação e hidratação do cimento, descrição que é subseqüentemente generalizada para explicação e controle dos processos industriais de fabricação e uso de cimentos (isto é, a estratégia descontextualizadora mantém relações mutuamente reforçadoras com a perspectiva de valor do progresso tecnológico).

Já, no relato do programa do Laboratório Geofísico da Instituição Carnegie em Washington aparecem os seguintes traços característicos nas investigações sobre os constituintes dos cimentos modernos e de seus produtos de hidratação:

- a) relação mutuamente reforçadora entre a pesquisa teórica pura (conhecimento dos produtos formados a partir da cal, alumina e sílica, das propriedades que conferem ao cimento e das condições mais propícias para sua formação) e a pesquisa tecnológica (controle e melhoramento das qualidades construtivas dos cimentos Portland advindos desse conhecimento);
- b) caráter empírico e sistemático do programa de pesquisa (1000 diferentes misturas dos três óxidos, submetidas a 7000 tratamentos térmicos e exames microscópicos dos produtos resultantes);
- c) estratégia descontextualizadora de restrição e seleção, formada pelas análises químicas e petrográficas de sistemas ternários submetidos a altas temperaturas e na condição de equilíbrio de suas fases, que se mostrou fecunda (a aplicação da regra de fase possibilitou relacionar um largo número de fenômenos que lidavam com mudanças

envolvendo diferentes fases) e útil (evolução técnica dos cimentos Portland derivada do conhecimento dos constituintes do clínquer e de suas funções nas reações de hidratação).

Por fim, no relato do programa do Escritório de Padronização, foram destacados:

- a) caráter empírico e sistemático das investigações (série de calcinações, com largas variações na composição das 50 amostras de cimento, seguidas de análises químicas e petrográficas, e de rompimento de corpos de prova cilíndricos de cimentos);
- b) estratégia fecunda (sucesso em corroborar as principais generalizações feitas pelo programa experimental do Laboratório Geofísico quanto às propriedades hidráulicas dos três principais compostos do clínquer, além de mostrar como a variação desses principais compostos altera as qualidades finais do produto) e útil (a importância das pesquisas do programa experimental do Escritório de Padronização está vinculada aos desenvolvimentos tecnológicos do cimento, advindos da aplicação do entendimento teórico dos constituintes do clínquer);
- c) motivação econômica (a pesquisa concluiu não ser competitiva a produção de cimento apenas com o silicato tricálcio, devido às altas temperaturas requeridas no forno), mostrando que, além da estratégia ser influenciada pela perspectiva de valor do progresso tecnológico (controle dos parâmetros de entrada no forno para controlar os parâmetros de saída dos cimentos), ela era circunscrita pela perspectiva de valor do capital e mercado (a análise das qualidades cimentícias do silicato tricálcico puro ficou de fora do programa experimental, em razão do produto puro não ter preço competitivo em relação ao preço do cimento Portland comercializado);
- d) relações mutuamente reforçadoras entre a pesquisa teórica e a pesquisa tecnológica (como o devido proporcionamento entre os compostos do clínquer assegura as características construtivas

almeçadas dos cimentos e seu processo de manufatura em termos economicamente viáveis).

Em resumo: as relações mutuamente reforçadoras entre as estratégias descontextualizadoras consolidadas no campo da química dos cimentos e a perspectiva de valor do progresso tecnológico dominante nas sociedades industriais avançadas delimitaram o campo de investigação às possibilidades de controle dos fenômenos, segundo o modelo laceyano. Toda investigação teórica sobre o cimento exposta e analisada neste capítulo, desde Smeaton, passando por Vicat e Le Chatelier, até os programas experimentais do Laboratório Geofísico e do Escritório de Padronização, objetivou o aperfeiçoamento tecnológico do produto em primeira ou última instância, caracterizando-se como pesquisa tecnocientífica. A tese de que a perspectiva de valor do progresso tecnológico é interpretada nas sociedades modernas à luz da perspectiva de valor do capital e do mercado ficou demonstrada no relato dos episódios-chave de desenvolvimento científico e tecnológico relacionado ao cimento. Apesar de atenderem às condições de fecundidade e utilidade para sua adoção, as estratégias de restrição e seleção no campo da química do cimento restringiram-se às estratégias descontextualizadoras em razão das relações mutuamente reforçadoras que mantêm com as perspectivas de valor do progresso tecnológico e do capital e mercado, dominantes nas sociedades industriais modernas. Sendo assim, as pesquisas no campo, apesar de terem preservado o ideal da imparcialidade, não foram capazes de assegurar o ideal da autonomia (a tradição revela uma autonomia localizada, na medida em que aos cientistas do campo é facultada a liberdade para estabelecer compromissos aceitáveis com a perspectiva do progresso tecnológico, interpretado dentro da perspectiva do capital e mercado) nem o ideal da neutralidade (por estarem associadas de modo exclusivo a uma perspectiva de valor, a tradição de pesquisa no campo da química do cimento não é neutra) do modelo laceyano.

Vimos que o desenvolvimento sustentável é a relação entre o homem e o meio ambiente capaz de satisfazer necessidades presentes da humanidade sem comprometer a habilidade de gerações futuras de satisfazer suas necessidades. Este conceito está atualmente sob disputa: numa perspectiva de valor, a preservação e recuperação de ecossistemas, ou a atuação humana dentro das

fronteiras ecológicas globais, é condição inicial para garantir o desenvolvimento socioeconômico da humanidade, requerendo mudanças profundas de curto prazo no modelo atual de negócios; noutra perspectiva de valor, o solucionamento de questões ambientais deve ser progressivamente incorporado ao modelo atual de negócios, como um requisito a mais para o desenvolvimento humano, que precisa estar assentado no tripé econômico, social e ambiental. A diferença básica entre as duas perspectivas parece dizer respeito à hierarquia de valores, com a sustentabilidade estando no topo dessa hierarquia numa e na base na outra. Nos termos do modelo teórico de referência, numa conceituação de desenvolvimento sustentável (desenvolvimento e meio ambiente como integrais e indivisíveis), a perspectiva de valor da sustentabilidade subordina as perspectivas de valor do capital e mercado, e do progresso tecnológico; noutra conceituação (desenvolvimento em três pilares), essa relação é invertida, sendo a perspectiva de valor da sustentabilidade subordinada às perspectivas do capital e mercado, e do progresso tecnológico.

A perspectiva de valor que tem atualmente predominado nas negociações multilaterais sobre o desenvolvimento sustentável é a dos três pilares. Ela tem sido adotada nos documentos da Organização das Nações Unidas desde 2002. É a perspectiva de valor que foi assumida pelo mundo corporativo reunido no Conselho Corporativo Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD), ao apregoar o desenvolvimento sustentável como aquele capaz de atender a demanda mundial crescente por produtos, em razão do crescimento mundial populacional e do consumo, sem levar ao aumento no uso de recursos energéticos e materiais, bem como ao aumento das emissões de gases do efeito estufa e de outros poluentes ambientais.

O caminho para essa forma de progresso, no qual o impacto ambiental causado pelo aumento da população e do consumo *per capita* é contrabalançado pela eficiência tecnológica no uso de recursos materiais e energéticos e nas emissões de poluentes e gases do efeito estufa, é a via da ecoeficiência. Nela a perspectiva de valor do progresso tecnológico à luz da perspectiva de valor do capital e mercado tem ascendência sobre a perspectiva de valor da sustentabilidade, nos termos do modelo teórico de referência.

Apesar de ainda não comprovada enquanto solução para as questões ambientais locais, regionais e globais, em razão dos avanços tecnológicos na frente ambiental poderem ser anulados pelo crescimento populacional e aumento nos níveis de consumo, a ecoeficiência é a maior aposta do setor cimenteiro reunido na Iniciativa Cimenteira para a Sustentabilidade (CSI) para alcançar o desenvolvimento sustentável. No mapeamento tecnológico promovido pela CSI juntamente com a Agência Internacional de Energia (IEA) em 2009, nos artigos da Academia Europeia para Pesquisa sobre Cimento (ECRA) de 2017, que devem embasar a atualização desse mapeamento tecnológico em breve, e no relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente sobre cimentos ecoeficientes de 2016, são propostas diversas soluções tecnológicas para aumentar a ecoeficiência no setor cimenteiro com vistas a alcançar as metas de redução das emissões de CO₂ assumidas para os anos de 2030 e 2050.

Num balanço dessas iniciativas, concluímos o seguinte. Quanto à eficiência térmica na produção de clínquer:

- a) o que move a indústria cimenteira para adotar tecnologias menos intensivas em energia térmica são basicamente razões econômicas (crise do petróleo, crescimento do mercado e custo/benefício do investimento em tecnologias mais avançadas);
 - o ganho ambiental, em termos do menor consumo de recursos energéticos e de menor emissão de CO₂ na produção, derivado dessa transição em marcha não está entre as razões principais para a decisão ou não dos investimentos em tecnologias mais modernas, pelo menos por enquanto;
 - isto poderá mudar num cenário futuro no qual haverá sanções governamentais para quem consome e polui acima de um limite estipulado, como, por exemplo, com a regulamentação do imposto do carbono pelos países signatários da ONU ;
- b) as tecnologias revolucionárias que poderiam levar a um avanço significativo em termos de eficiência térmica nos fornos de cimento, aproximando-a da eficiência teórica mínima, como a dos fornos operando com oxigênio puro, são apostas tecnológicas de longo prazo

para reduzir o consumo de energia e as emissões de CO₂, que refletem a postura típica da perspectiva de valor do progresso tecnológico segundo a qual os problemas e efeitos colaterais advindos da implantação de certas tecnologias serão resolvidos pela pesquisa, desenvolvimento e implantação de novas tecnologias, pressuposição ainda não comprovada empiricamente;

- c) as projeções de ganhos em eficiência térmica no setor em 2030 e em 2050 ficarão abaixo do consumo específico de energia térmica dos fornos atualmente mais avançados tecnologicamente, mostrando que, neste quesito, não haverá maiores desenvolvimentos tecnológicos no cenário futuro (como o desenvolvimento e implantação de fornos ou pré-calcinadores operando com oxigênio puro), mas apenas a incorporação das tecnologias mais avançadas disponíveis, que poderá trazer queda expressiva na intensidade específica de carbono (16%) no setor, apesar da queda pouco expressiva no consumo específico de energia térmica (7%);
- d) a despeito disso, a queda nas emissões absolutas de CO₂ no setor em 2050 é projetada em apenas 1,8%, devido ao fato de a maioria das plantas de cimento (60%) já ter feito a transição da via úmida para a via seca.

Quanto à eficiência elétrica na produção de cimento:

- a) há margem para melhorar a eficiência elétrica no setor cimenteiro com a utilização das mais modernas tecnologias disponíveis;
 - essa transição, apoiada na perspectiva de valor do progresso tecnológico, é determinada prioritariamente por motivos estritamente econômicos (decisões de implementação das tecnologias mais eficientes são tomadas em termos de seus custos de investimentos e operacionalização versus os benefícios advindos em termos da redução de consumo de energia elétrica e de atendimento de demandas de mercado), sendo, em última

instância, fundamentada na perspectiva de valor do capital e mercado;

- a perspectiva de valor da sustentabilidade tem contornado essa transição, uma vez que no cenário futuro deve haver maiores restrições e sanções relativas ao consumo energético e às emissões de CO₂ e de poluentes ao setor econômico;
- b) as projeções de ganhos em eficiência elétrica no setor em 2050 se equiparão à eficiência elétrica atual das plantas mais modernas de cimento, indicando que, neste quesito, não haverá maiores desenvolvimentos tecnológicos no cenário futuro, mas apenas a incorporação das tecnologias mais avançadas disponíveis;
- por isso, segundo o próprio mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD de 2009, as pesquisas tecnocientíficas que vêm sendo realizadas sobre recuperação do calor perdido e cominuição por pulsos ultrassônicos não têm perspectivas de aplicação no setor até 2050;
 - por outro lado, o impacto da adoção de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) pelo setor em termos do aumento de consumo de energia elétrica poderá reverter os ganhos em eficiência elétrica no setor no médio e longo prazo.

Quanto ao uso de combustíveis alternativos:

- a) o potencial de substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos (45%) no longo prazo (2050) é limitado sobretudo por razões estritamente econômicas (preços relativos dos combustíveis X custos de investimentos e operacionais X disponibilidade local e regional dos combustíveis) e de política econômica (regulamentações relacionadas com o gerenciamento de resíduos, com o coprocessamento e com a taxa futura do uso do carbono);
- b) a taxa global projetada de substituição de combustíveis fósseis em torno de 45% diz respeito ao uso corrente de coque de petróleo e de

carvão, não descartando o continuado uso de combustíveis fósseis com menor intensidade de carbono, como é o caso do gás natural, que leva vantagem em termos de menores emissões de CO₂ em relação aos principais resíduos industriais e materiais descartados usados no coprocessamento (Tabela 7), a despeito da contribuição deste para a melhor destinação final desses rejeitos industriais; por isso, além das barreiras econômicas acima destacadas, existe também uma barreira técnica para a completa abolição do uso dos combustíveis fósseis nos fornos de cimento;

- c) a previsão pelo setor da maior participação do gás natural na matriz energética (por ser economicamente viável no longo prazo) e o uso dessa projeção como estratégia com vistas à redução das emissões de dióxido de carbono (incorporando-a na categoria “combustíveis alternativos”) são sintomáticos da capitalização de estratégias de cunho predominantemente mercadológico como estratégias de compromisso ambiental pelo setor.

Quanto ao uso de matérias-primas alternativas:

- a) a ecologia industrial no setor cimenteiro é limitada por condicionantes técnicas (níveis máximos de substituição do calcário e da argila em função da composição química das matérias-primas alternativas, com enorme variabilidade) e por condicionantes econômicas (disponibilidade das matérias-primas alternativas nas regiões produtoras de cimento, variabilidade de seu fornecimento, custos de seu transporte até as fábricas de cimento e de seu tratamento, e seu uso para outras finalidades), reforçando mais uma vez a percepção de que a transição para as alternativas tecnológicas para mitigação do impacto ambiental do setor é regulada pela perspectiva de valor do progresso tecnológico subordinada à perspectiva de valor do capital e mercado (a baixa taxa prática de substituição (metade) em relação ao máximo nível teórico de substituição é explicada por fatores estritamente econômicos, como a proporção da produção global de

escória e cinzas em relação à demanda global por calcário para a produção de cimento);

- b) neste caso aparentemente não há outro equacionamento possível entre as perspectivas de valor, uma vez que o fator econômico é limitado exclusivamente pelo fornecimento dessas matérias-primas.

Quanto à captura, estoque e uso de carbono:

- a) as rotas biológica, química e mineral da tecnologia de captura e uso (CCU) estão em estágio experimental e têm demonstrado limitações quanto ao potencial de abatimento (grandes superfícies dos biorreatores para capturar quantidades significativas de CO₂ nas plantas; baixa demanda pelos produtos químicos gerados); por isso, elas precisarão demonstrar ainda sua viabilidade técnica, econômica e ambiental;
- b) a tecnologia de captura e estoque de carbono (CCS) está em estágio de concepção e sua viabilidade depende da redução de custos de implantação de tecnologias de captura, bem como da construção e regulação de infraestrutura de transporte e armazenamento no longo prazo, questões difíceis de serem solucionadas no curto e médio prazos;
- c) a despeito dessas questões em aberto, o setor cimenteiro atribuiu a essa tecnologia (CCS) no mapeamento tecnológico de 2009 o maior peso no abatimento das emissões de CO₂ pelo setor em 2050;
- d) nem sequer o aspecto econômico do desenvolvimento sustentável assumido pelo setor foi devidamente equacionado para a implementação dessas tecnologias (a previsão de custos de investimento para implantação de tecnologias de captura de carbono deve impactar de duas a três vezes os custos de produção de cimento, refletindo-se no aumento correspondente dos preços do produto, comprometendo, assim, o aspecto social do desenvolvimento sustentável);

- e) a aposta nessas tecnologias reflete uma postura típica das sociedades industriais avançadas: a de que a resolução dos problemas atuais relacionados ao meio ambiente deve apoiar-se em soluções tecnológicas provenientes de pesquisas tecnocientíficas que devem assegurar o barateamento de seus custos de implantação e operação, bem como o balanço favorável entre o abatimento de CO₂ e o consumo de energia requerido para sua operação;
- esta é uma postura calcada na perspectiva de valor do progresso tecnológico vista à luz da perspectiva de valor do capital e mercado, portanto embasada em valores sociais e pressuposições ainda não devidamente comprovados empiricamente;
- f) essa hierarquização entre as perspectivas deve orientar também a resolução de questões de eficácia e legitimidade dos desafios técnicos relacionados à construção e operação da rede de transporte e de armazenamento de CO₂;
- g) no entanto, de acordo com o modelo das interações entre as atividades científicas e os valores, as questões de legitimidade (segurança do transporte e armazenamento do gás carbônico, bem como sua aceitação local, com a mensuração dos riscos de vazamento e seus potenciais perigos à saúde da população local e ao meio ambiente) devem ser endereçadas por meio estratégias sensíveis ao contexto para serem apropriadamente resolvidas, às quais as estratégias descontextualizadoras devem estar subordinadas, de modo que essas estratégias sensíveis ao contexto mantenham relações mutuamente reforçadoras com uma hierarquia de valores, nas quais a perspectiva de valor da sustentabilidade tenha papel preponderante sobre as perspectivas de valor do progresso tecnológico e do capital e mercado;
- h) a pressuposição fundamental no seio dessa postura em que a perspectiva de valor do progresso tecnológico é predominante é que a tecnologia de captura, essencial para a implantação das tecnologias CCU e CCS, evoluirá o suficiente para manter os preços de produção

de cimento competitivos e num patamar que permita que o produto continue a ser usado em larga escala por populações pobres no mundo no espaço de tempo de 10 anos; tal pressuposição carece ser empiricamente confirmada;

- i) diante dos desafios técnicos, econômicos, sociais, ambientais e políticos a serem superados, a projeção de que, ao menos, 11% dos novos fornos até 2030 (ou seja, metade do investimento previsto para o setor no período) terão tecnologia CCS parece superestimada; parece ser mais realista a projeção de que apenas 6% desses novos fornos terão tecnologia CCS; do cenário superestimado para o realista, a queda na contribuição da tecnologia CCS para o cumprimento da meta de abatimento das emissões de CO₂ de 18% até 2050, assumida no mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD de 2009, passaria de 56% para meros 28% dessa meta, deixando uma lacuna a ser preenchida na atualização do mapeamento, que deve ser feita em breve.

Quanto à substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares e fíleres:

- a) a indústria cimenteira se apropriou de estratégias marcadamente econômicas em voga (a substituição de clínquer por SCM e fíleres para diminuição de custos de produção com a diminuição do consumo de energia térmica na produção de cimentos) para convertê-las atualmente na principal estratégia tecnológica para mitigação das emissões de CO₂ pelo setor;
- b) o uso de SCM e fíleres em substituição ao clínquer no cimento é uma estratégia mitigadora endossada pelo setor cimenteiro que ainda não provou sua efetividade enquanto estratégia tecnológica capaz de contribuir com as reduções absolutas de emissões de CO₂ pelo setor até 2050; isto porque a eficiência específica de redução das emissões precisa mostrar-se suficiente para contrabalançar o aumento projetado de consumo do cimento até 2050, refletindo-se na diminuição absoluta de emissões pelo setor neste período;

c) para se estabelecer como estratégia mitigadora no setor cimenteiro, será preciso romper com o atual cenário relativo à adoção dessas estratégias de substituição do clínquer e das demais estratégias comentadas acima, que vêm sendo há algum tempo implantadas no setor:

- apesar delas existirem desde, pelo menos, a década de 1970 e serem ampliadas desde a década de 1990, não houve redução, mas aumento, das emissões absolutas de CO₂ no setor cimenteiro mundial: em relação ao nível de emissão de 1,88 bilhões de toneladas de CO₂ em 2006, tomado como referência no mapeamento tecnológico (IEA/WBCSD, 2009, p.2), o setor emite hoje em torno de 3,4 bilhões de toneladas, aumento de 1,8 vezes no período (USGS, 2017, p. 45 e SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2016, p. 4);

d) por outro lado, expectativas divergentes quanto ao potencial mitigador dessas estratégias de substituição de clínquer por SCM e fileres reforçam a suspeita que recai sobre elas:

- segundo a modelagem da UNEP 2016, com a adoção de três novas tecnologias (10% de fíler calcário em todos os cimentos Portland produzidos e 40% de cinzas volantes e escórias em 40% dos cimentos produzidos; até 35% de argila calcinada com 15% de fíler calcário em até 60% dos cimentos produzidos; e até 35% de fíler calcário em até 60% dos cimentos produzidos) poderemos atingir, em 2050, o potencial de mitigação das emissões de CO₂ atribuído à tecnologia CCS no mapeamento tecnológico do IEA/WBCSD 2009 (Gráficos 18 e 19);
- além de estarem baseadas em minerais e no processo de produção com os quais a indústria cimenteira está familiarizada, facilitando sua adoção pelo setor, essas tecnologias de substituição de clínquer por SCM e fileres têm menores custos de implantação

em relação à tecnologia CCS, que, como vimos, está em fase inicial de pesquisa e desenvolvimento;

- no entanto, para a ECRA/CSI 2017, a disponibilidade de cinza volante, escória de alto forno e pozolanas aumentando em taxas similares ao consumo de cimento no cenário futuro e o uso de 10% de fíler calcário em substituição ao clínquer deve impactar os custos, consumo de energia e emissões de CO₂ relacionados com seu transporte, implicando num potencial limitado para a redução absoluta na emissão de CO₂ pelo setor por essa via da substituição.

Em resumo, podemos concluir que a aposta nas tecnologias de substituição do clínquer por SCM e fíleres está baseada nas perspectivas de valor do progresso tecnológico e da sustentabilidade vistas à luz da perspectiva do capital e mercado. As projeções quanto à sua disseminação no mercado mundial futuro do cimento e as tendências atuais de correlação entre sua adoção e o abatimento absoluto das emissões não possibilitam concluir que essas tecnologias serão promissoras enquanto estratégias mitigadoras de emissões de CO₂ pelo setor.

Quanto ao uso de novos aglomerantes:

a) cimentos ricos em belita:

- as pesquisas datam do começo do século XX, quando foram feitos experimentos para se descobrir a composição química do clínquer e a função de cada componente na pega e endurecimento do cimento, e foram motivadas pela perspectiva do progresso tecnológico, ou seja, do desenvolvimento técnico de um produto tecnológico;
- essas pesquisas foram também motivadas pela perspectiva do capital e do mercado, tendo em vista que fabricar cimentos com menos calcário poderia implicar a possibilidade da economia de recursos materiais e energéticos, com conseqüente diminuição de seu custo de fabricação e melhoramento das margens de lucro e comercialização do produto;

- num momento mais recente, com a emergência da sustentabilidade como valor social, esses estudos passaram também a ser motivados por este complexo de valor, mas numa perspectiva valorativa da dependência da sustentabilidade em relação ao complexo de valor do capital e do mercado, que ficou clara no episódio do abandono dos estudos para aumentar a reatividade da belita por razões estritamente econômicas, na formulação de cimentos ricos em belita com até 90% de seu conteúdo e no uso atualmente muito limitado desses cimentos no setor;
- b) cimentos ricos em aluminatos sulfúricos de cálcio (CSA):
- apesar de seu grande potencial de abatimento das emissões de CO₂, esses cimentos sofrem com limitações econômicas para sua maior produção e uso (maior custo e a menor disponibilidade de matérias-primas em relação ao cimento Portland comum); por isso, vistos dentro da perspectiva do capital e mercado, a expectativa é que tenham apenas um papel suplementar na substituição do cimento Portland;
 - em razão disso, as pesquisas tecnocientíficas sobre esses novos cimentos encontram barreiras similares às vistas para os cimentos ricos em belita, por serem realizadas e avaliadas no interior do marco institucional regulatório no qual predomina o complexo de valor do capital e do mercado, com a sustentabilidade subordinada a ele, bem como à perspectiva do progresso tecnológico;
- c) cimentos baseados em clínqueres constituídos majoritariamente por belita, yelimita e ferrita (BYF):
- têm potencial para substituir o cimento Portland na maioria das aplicações por suas propriedades similares, com intensidade específica de CO₂ 20% menor, no mínimo;
 - no entanto, a principal barreira atual para sua comercialização são os altos custos de suas matérias-primas;

- por isso, sua produção em larga escala deve ocorrer apenas quando os custos de emissão de CO₂ forem significativamente maiores do que são atualmente;

d) hidrossilicatos de cálcio (CSH):

- sendo reportado que o celitamento é compatível com os cimentos convencionais e com os aditivos em uso, com suas propriedades hidráulicas sendo similares aos dos cimentos convencionais, esse tipo de aglomerante tem grande potencial para substituir o cimento Portland, com vistas a mitigar as emissões de CO₂ pelo setor;
- mas, em razão da tecnologia estar ainda em desenvolvimento em nível laboratorial, nenhuma estimativa confiável pode ainda ser feita com relação à sua eficiência energética e ao seu impacto na redução das emissões de CO₂ para o contexto real de sua produção industrial;

e) clínqueres de silicatos de cálcio curados por carbonatação (CCSC):

- apesar de serem aglomerantes com futuro tão promissor quanto o do celitamento, seu uso depende, em contrapartida, de uma série de questões em aberto, tais como :
- desenvolvimentos no reuso, condicionamento e armazenamento de CO₂ (tecnologia que, como vimos, está ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento, e cuja implantação depende do encaminhamento e resolução de um conjunto de problemas de ordem técnica, econômica, política e social);
- aperfeiçoamentos técnicos quanto ao fornecimento, estocagem, segurança e otimização de sistemas de cura (que dependem também da resolução de questões técnicas, econômicas, políticas e sociais em aberto);
- expansão do mercado de elementos pré-fabricados não estruturais (por meio de estratégias mercadológicas ou de políticas setoriais de governo para incentivo de sua comercialização e uso);

- e desenvolvimentos de armaduras resistentes à corrosão, para possibilitar sua aplicação técnica e econômica na indústria de pré-fabricados com função estrutural.

Em suma: devido à baixa produção e comercialização desses aglomerantes, por motivos econômicos (maiores custos das matérias-primas no caso dos cimentos ricos em belita, CSA e BYF) e por motivos técnicos (implantação de CCU e sistemas especiais de curas no caso do CCSC e estágio de desenvolvimento laboratorial no caso do CSH), seus potenciais de abatimento por unidade produzida não podem ainda ser devidamente projetados para os potenciais de abatimento em termos absolutos. Em razão disso, essas tecnologias ainda não demonstraram sua efetividade enquanto estratégias mitigadoras de emissões absolutas de CO₂ pelo setor cimenteiro mundial. Elas são promessas baseadas na perspectiva do progresso tecnológico, ou seja, nas crenças de que as principais barreiras técnicas e econômicas serão superadas pela pesquisa e desenvolvimento apoiados em estratégias descontextualizadoras.

Com relação às pesquisas tecnocientíficas que vem sendo desenvolvidas no setor cimenteiro com vistas a apoiar essas iniciativas, chegamos às seguintes conclusões.

Predominam relações mutuamente reforçadoras entre a perspectiva de valor do progresso tecnológico e o tipo de estratégias de restrição e seleção que balizam essas pesquisas. Em geral, essas pesquisas têm o objetivo teórico de gerar entendimento dos fatores subjacentes aos fenômenos estudados (pesquisas teóricas conduzidas por estratégias descontextualizadoras) para subsequentemente aplicá-lo aos processos de fabricação e de formulação de cimentos e aglomerantes alternativos (pesquisas tecnológicas), caracterizando-se como pesquisas tecnocientíficas comercialmente orientadas. Por isso, essas pesquisas tecnocientíficas mantêm também relações mutuamente reforçadoras com a perspectiva de valor do capital e mercado, o que faz com que prevaleça o aspecto econômico sobre o aspecto ambiental do desenvolvimento sustentável na avaliação da viabilidade técnica dessas pesquisas.

Num quadro institucional em que a perspectiva de valor da sustentabilidade fosse predominante, isto é, que colocasse o aspecto ambiental em primeiro lugar

relativamente aos aspectos econômico e social do desenvolvimento sustentável, os problemas técnicos de certas iniciativas adotadas pelo setor para mitigar emissões de gás carbônico (como as flutuações nas condições de combustão do clínquer e a qualidade inferior dele com o uso de combustíveis alternativos, ou o uso de SCM alternativos, como novas escórias e cinzas volantes) não seriam simplesmente descartados nas investigações por não se encaixarem no modelo atual de negócios do setor, mas seriam aprofundados no sentido de buscar equacionar sua viabilidades técnica, econômica, social e ambiental por meio de estratégias sensíveis ao contexto, como sugere o modelo laceyano, ainda que isso levasse a uma mudança profunda das instalações industriais e do cenário futuro de produção de cimentos.

As pesquisas sobre a substituição do clínquer por SCM e fíleres consistem em abordagens baseadas no entendimento das características e interações de matérias-primas, bem como seu desenvolvimento microestrutural e de reações de hidratação, que poderão ser adaptadas a uma larga variedade de matérias-primas reais sem a necessidade de extensivos testes empíricos de caráter local (SCRIVENER ; JOHN ; GARTNER, 2006, pp. 38-39). Sendo assim, podemos constatar que se trata de pesquisas tecnocientíficas baseadas em estratégias descontextualizadoras voltadas a gerar conhecimento básico que poderá ser facilmente aplicado no desenvolvimento de novos cimentos compostos, sendo, portanto, comercialmente orientadas e assentadas na pressuposição da ecoeficiência como caminho mais promissor para que o setor cimenteiro mundial alcance o desenvolvimento sustentável, em especial, sua meta de redução de emissões de CO₂. A utilidade dessas pesquisas em termos de contribuição com as estratégias mitigadoras do setor vai depender da comprovação empírica da efetividade das estratégias de substituição do clínquer por SCM e fíleres na redução das emissões absolutas de CO₂ pelo setor no longo prazo.

As pesquisas tecnocientíficas que buscam investigar a viabilidade técnica, econômica e ambiental das tecnologias CCU e CCS estão em estágio inicial, não tendo evoluído a ponto de mostrar sua utilidade em termos de sua contribuição para o desenvolvimento e a implantação dessas tecnologias no setor.

A incerteza das projeções quanto à implementação das tecnologias vistas pelo setor cimenteiro como promissoras para abatimento de seu impacto ambiental até 2050 pode decorrer tanto de uma base de dados pouco significativa ou pouco

confiável quanto de assunções e generalizações não devidamente embasadas empiricamente para projeções de longo prazo. Com isso, podemos pôr em questão se os padrões de avaliação dos valores cognitivos das hipóteses dos modelos do IEA/WBCSD (2009) e da UNEP (2016) são suficientemente rigorosos para assegurar a imparcialidade dessas hipóteses. Como exemplo, citamos a disparidade de projeções para o fator clínquer nos diferentes modelos (70% e 50% para a UNEP 2016 e 60% para ECRA/CSI 2017). Essa incerteza pode indicar a influência indevida e furtiva de valores não cognitivos advindos das perspectivas de valor do progresso tecnológico e do capital e mercado nas projeções. Sendo assim, esses modelos seriam válidos enquanto marcos para orientar os investimentos em pesquisas voltadas a diminuir o impacto ambiental do setor cimenteiro no médio e longo prazo?

Em síntese: o modelo laceyano das interações entre as atividades científicas e os valores contribui para lançar luz sobre os fundamentos das estratégias tecnológicas e das pesquisas tecnocientíficas que vêm sendo endossadas pelo setor cimenteiro como apostas para a redução de suas emissões absolutas de gás carbônico no longo prazo. Ficou claro que essas estratégias e pesquisas baseiam-se fundamentalmente na conjunção das perspectivas de valor do progresso tecnológico, do capital e mercado, e da sustentabilidade, na qual as duas primeiras têm ascendência sobre a última, razão pela qual o setor adotou o caminho da ecoeficiência como única opção para cumprimento de suas metas de abatimento de CO₂ para 2030 e 2050. Se esse caminho será suficiente como forma de contribuição do setor para o desenvolvimento sustentável é ainda uma questão em aberto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BATES, P. H. The application of the fundamental knowledge of Portland cement to its manufacture and use. **Journal of The Franklin Institute**, Washington, v. 193, n. 3, pp. 289-309, 1922.

BLEZARD, R. G. **Reflections on the history of the chemistry of cement**. London: SCI Lecture Papers Series, 1998. Disponível em: <<http://sci.mond.org/lps>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

BOGUE, R. H. **The chemistry of Portland Cement**. New York: Reinhold, 1947.

BRASIL. Lei 10.973, de 2 de dezembro de 2004. Dispõe sobre incentivos à inovação e à pesquisa científica e tecnológica no ambiente produtivo. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 3 dez. 2004. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2004-2006/2004/lei/l10.973.htm. Acesso em: 13 abr. 2018.

BRASIL. Lei 13.243, de 11 de janeiro de 2016. Presidência da República do Brasil, 2016. Dispõe sobre estímulos ao desenvolvimento científico, à pesquisa, à capacitação científica e tecnológica e à inovação. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 12 jan. 2016. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2015-2018/2016/lei/l13243.htm. Acesso em: 13 abr. 2018.

CONGRESSO BRASILEIRO DO CIMENTO, 7, 2016, São Paulo. **Anais do 7º Congresso Brasileiro do Cimento**. São Paulo: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND ; SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (ABCP/SNIC), 2016. 1 CD-ROM.

COWAN, H. J.; SMITH, P. R. **The science and technology of building materials**. Estados Unidos da América: Van Nostrand Reinhold Company, 1988.

DAMTOFT, J.S.; LUKASIK, J.; HERFORT, D.; SORRENTINO, D.; GARTNER, E.M. Sustainable development and climate change initiatives. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], n. 38, pp. 115-127, 2008. doi:10.1016/j.comconres.2007.09.008.

DAVEY, N. **A history of building materials**. London: Phoenix House, 1961.

DORFMAN, G. **História do Cimento e do Concreto**: desde os primórdios até a primeira guerra mundial. Brasília: Editora UnB, 2003 (Cadernos de história da construção).

ELLIOTT, C. D. **Technics and architecture**: the development of materials and systems for buildings. Massachusetts: MIT Press, 1992.

EUROPEAN CEMENT RESEARCH ACADEMY e CEMENT SUSTAINABILITY INICIATIVE. **Development of state of the art-techniques in cement manufacturing**: trying to look ahead. Duesseldorf, Geneva: ECRA/CSI, 2017. Disponível em: <<http://www.wbcscement.org/technology>>. Acesso em: 20 dez. 2017.

GARFINKEL, Y. Burnt lime products and social implications in pre-pottery Neolithic B villages of near East. **Paléorient**, [S.l.], v. 13, n. 1, pp. 69-76, 1987.

GARTNER, E.M.; MACPHEE, D.E. A physico-chemical basis for novel cementitious binders. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], n. 41, pp. 736-749, 2011. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.006.

GOURDIN, W.H.; KINGERY, W.D. The beginnings of pyrotechnology: Neolithic and Egyptian lime plaster. **Journal of Field Archaeology**, [S.l.], v. 2, n.1-2, pp. 133-150, 1975.

HABERT, G.; BILLARD, C.; ROSSI, P.; CHEN, C.; ROUSSEL, N. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], n. 40, pp. 820-826, 2010. doi: 10.1016/j.cemcores.2009.09.031.

HANZLÍČEK, T.; PERNÁ, I.; ERTL, Z.; MILLER, S.M. Pre-Portland cements and geopolymers. **Acta Geodyn. Geomater**, [S.l.], v. 9, n. 1 (165), pp. 57-62, 2012.

HEWLETT, P. **LEA'S Chemistry of cement and concrete**. Estados Unidos: Elsevier, 1988.

HUNTZINGER, D.N.; EATMON, T.D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], n. 17, pp. 668-675, 2009. doi: 10.1016/j.cleopro.2008.04.007.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Cement Technology Roadmap 2009**: carbon emissions reductions up to 2050. France, Switzerland: IEA/WBCSD, 2009. Disponível em: <<http://www.wbcscement.org/technology>>. Consultado em: 30/03/2018.

JONES, T. Vicat on cements. **Franklin Journal and American Mechanics Magazine**, Philadelphia, v. 1, pp. 371-374, 1826.

KIM, M. G. **Affinity, that illusive dream**: a genealogy of chemical revolution. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2003.

KINGERY, W.D.; VANDIVER, P.B.; PRICKETT, M. The beginning of pyrotechnology: production and use of lime and gypsum plaster in the Pre-Pottery Neolithic Near East. **Journal of Field Archaeology**, [S.l.], v. 15, n. 2, pt. 2, pp. 219-244, 1988.

KIRCA, Ö. Ancient binding materials, mortars and concrete technology: history and durability aspects. In: MODENA, L.; MODENA, R. (Ed.). **Structural Analysis of Historical Construction**. London: Taylor & Francis, 2005.

KOZŁOWSKI, S.; KEMPISTY, A. Architecture of the pre-pottery Neolithic settlement in Nemrik, Iraq. **World Archeology**, [S.l.], v. 21, n. 3, pp. 348-362, 1990.

KRUMNACHER, P. **Lime and cement technology**: transition from traditional for standardized treatment methods. 2001. 90p. Dissertação (Mestrado em Ciência) - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virgínia, 2001.

KUHN, T. S. **A Estrutura das Revoluções Científicas**. São Paulo: Perspectiva, 2009.

LACEY, H. **Is science value free?** values and scientific understanding. London; New York: Routledge, 1999.

_____. **Valores e atividades científicas 1**. São Paulo: Editora 34, 2008.

_____. **Valores e atividades científicas 2**. São Paulo: Editora 34, 2010.

_____. Tecnociência comercialmente orientada ou investigação multiestratégica? **Scientiae Studia**, São Paulo, v.12, n.4, p. 669-695, out./dez. 2014.

LACEY, H; MARICONDA, P. R. O modelo das interações entre as atividades científicas e os valores. **Scientiae Studia**, São Paulo, v.12, n.4, p. 643-668, out./dez. 2014.

LACEY, H.; SCHWARTZ, B. The formation and transformation of values. In: O'DONOHUE, W.; KITCHENER, R. **The philosophy of psychology**, London: Sage, 1996.

LE CHATELIER, H. **Experimental researches on the constitution of hydraulic mortars**. New York: McGraw, 1905.

LOSEE, J. **A Historical Introduction to the Philosophy of Science**. New York: Oxford University Press, 1984.

MAINSTONE, R. The Eddystone Lighthouse. In: SKEMPTON, A. W. **John Smeaton**, FRS. London: Thomas Telford Limited, 1981.

MCMULLIN, E. *Values in Science*. In: Newton-Smith. **A companion to the philosophy of science**. Malden;Oxford: Blackwell Publisher, 2001.

MOORE, H. F. **Textbook of the materials of engineering**. New York; London: McGraw-Hill, 1947.

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; ANAGNOSTOPOULOU, S. Composite materials in ancient structures. **Cement & Concrete Composites**, [S.l.], v. 27, pp. 295-300, 2005. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.018.

OLIVEIRA, M. B. A epistemologia engajada de Hugh Lacey. **Manuscrito**, v. XXI, n. 2, pp.113-13, São Paulo, 1998.

_____. Desmercantilizar a tecnociência. In: SANTOS, B. S. **Conhecimento prudente para uma vida decente**: um discurso sobre as ciências revisitado. São Paulo: Cortez Editora, 2004.

_____. Formas de autonomia da ciência. **Scientiae Studia**, São Paulo, v. 9, n. 3, pp. 527-561, 2011.

_____. On the commodification of science: the programmatic dimension. **Science & Education**, [S.l.], v.22, n. 10, p. 2463–2483, 2012.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Transformando nosso mundo**: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro : Centro de Informação das Nações Unidas para o Brasil (Unic Rio), 2015. Disponível em : <<https://sustainabledevelopment.un.org>>. Acesso em : 30 mar. 2018.

RANKIN, G.A. Portland cement. **Journal of the Franklin Institute**, Washington, pp. 747-784, 1916.

REHAN, R.; NEHDI, M. Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry. **Environmental Science & Policy**, [S.l.], n. 8, pp. 105-114, 2005. doi: 10.1016/j.envsci.2004.12.006.

REID, H. **The science and art of the manufacture of Portland Cement with observations on some of its constructive applications**. London: E&F. N. Spon, 1877.

SABIN, L. C. **Cement and concrete**. New York: McGraw, 1907.

SCHNEIDER, M.; ROMER, M.; TSCHUDIN, M.; BOLIO, H. Sustainable cement production: present and future. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], n. 41, pp. 642-650, 2011. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.019.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry**. Paris: United Nations Environment Programme (UNEP), 2016.

SHINN, T.; RAGOUET, P. Controvérsias sobre a ciência: por uma sociologia transversalista da atividade científica. São Paulo: Associação Filosófica Scientia Studia: Editora 34, 2008.

SINGER, C.; HOLMYARD, E.J.; HALL, A.R.; WILLIAMS, T.I. **A history of technology**. Oxford: Clarendon Press, 1958, 2 v.

_____ **A history of technology**. Oxford: Clarendon Press, 1958, 4 v.

SKEMPTON, A. W. **John Smeaton**, FRS. London: Thomas Telford Limited, 1981.

SMEATON, J. **A narrative of the building and a description of the construction of the Edystone Lighthouse with stone**. London: G. Nicol, 1793.

TREVOR, T.; SKEMPTON, A. W. John Smeaton. In: SKEMPTON, A. W. **John Smeaton**, FRS. London: Thomas Telford Limited, 1981.

UNITED KINGDOM OF GREAT BRITAIN AND IRELAND. James Frost. **Specification for cement or artificial stone**. 4679, 1822.

UNITED KINGDOM OF GREAT BRITAIN AND IRELAND. James Parker. **Specification for Cement for Building Purposes**. 2120, 1796.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summary**. Estados Unidos: USGS, 2004. Disponível em: <<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/>>. Acesso em: 20 mar. 2018

_____. **Mineral Commodity Summary**. Estados Unidos: USGS, 2017. Disponível em: <<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/>>. Acesso em: 20 mar. 2018

UWASU, M.; HARA, K.; YABAR, H. World cement production and environmental implications. **Environmental Development**, [S.l.], n. 10, pp. 36-47, 2014. doi: 10.1016/j.envdev.2014.02.005.

VAN DEN HEEDE, P.; DE BELIE, N. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: literature review and theoretical calculations. **Cement & Concrete Composites**, [S.l.], n. 34, pp. 431-442, 2012. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004.

VEIGA, J. E. **A desgovernança mundial da sustentabilidade**. São Paulo: Editora 34, 2013.

_____. O âmago da sustentabilidade. **Estudos Avançados** (IEA), São Paulo, v. 28, n. 82, pp. 7-23, 2014.

VICAT, L. J. **A practical and scientific treatise on calcareous mortars and cements, artificial and natural.** London: John Weale, Architectural Library, 1837.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Climate Actions.** [S.l.]: The Cement Sustainability Initiative (CSI): WBCSD, 2008.

_____. **Low Carbon Technology Partnerships initiative (LCTPi):** Cement. [S.l.]: The Cement Sustainability Initiative (CSI): WBCSD, 2015.

_____. **Cement Industry Energy and CO₂ Performance: getting the numbers right (GNR).** [S.l.],: The Cement Sustainability Initiative (CSI): WBCSD, 2016.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas.** 1989. 191 p. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.