DANIEL DA COSTA REIS

**Fluxo de materiais e eficiência no uso de recursos na indústria da
construção**

Versão corrigida

São Paulo
2020

DANIEL DA COSTA REIS

**Fluxo de materiais e eficiência no uso de recursos na indústria da
construção**

Tese apresentada ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências.

São Paulo
2020

DANIEL DA COSTA REIS

Fluxo de materiais e eficiência no uso de recursos na indústria da construção

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências

Área de concentração: Engenharia de construção civil e urbana

Orientador: Prof. Dr. Vanderley M. John

São Paulo
2020

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.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

Catálogo-na-publicação

Reis, Daniel

Fluxo de materiais e eficiência no uso de recursos na indústria da construção / D. Reis -- versão corr. -- São Paulo, 2020.
156 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Pegada de material 2.Balanço de massa 3.Desmaterialização
4.Eficiência de recursos 5.Ecologia Industrial I.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

Nome: Reis, Daniel Costa

Título: Fluxo de materiais e eficiência no uso de recursos na indústria da construção

Tese submetida a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para cumprimento dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia Civil.

Aprovado em: 11/11/2020

Comissão julgadora

Prof. Dr.	Paulo Manuel Cadete Ferrão
Instituição	Instituto Superior Técnico de Lisboa/MIT Portugal
Decisão	Aprovado

Prof. Dr.	Ramzy Kahhat
Instituição	Pontificia Universidad Católica del Perú
Decisão	Aprovado

Prof. Dr.	Sérgio Almeida Pacca
Instituição	Universidade de São Paulo
Decisão	Aprovado

Prof. Dr.	Sérgio Cirelli Angulo
Instituição	Universidade de São Paulo
Decisão	Aprovado

AGRADECIMENTOS

É praticamente impossível enumerar todos aqueles que contribuíram, de uma forma ou de outra, para a concretização deste trabalho. Não é possível, contudo, deixar de salientar contribuições que pela sua marcada influência passaram a fazer parte integrante.

Assim, desejo agradecer em primeiro lugar ao meu orientador o Professor Vanderley M. John pelo seu apoio, disponibilidade, e contribuições científicas que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. A sua dedicação a Universidade e a pesquisa é uma inspiração enorme para todos nós.

Aos Professores Sérgio Pacca e Sérgio Ângulo pelos ensinamentos iniciais sobre as metodologias e ferramentas da Ecologia Industrial. Ao longo dos últimos anos participamos em vários projetos e workshops e foi um prazer contar com a vossa colaboração e entusiasmo.

A todos os colegas do CICS em particular a Liz Zanchetta e o Max Junginger pelo apoio proporcionado ao longo destes últimos anos. Aos elementos do grupo de pesquisa pelas sugestões e discussões sobre ACV, nomeadamente, Fernanda Belizario, Lidiane Oliveira, Carolina Sonvezzo, Pedro Abrão, Tiago Vasconcelos e Natália Vieira.

Cumpre igualmente mencionar os apoios financeiros recebidos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), da Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo (FUSP), e do Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência (LME) da Universidade de São Paulo.

Por fim, desejo exprimir o meu profundo reconhecimento a todos os familiares e em particular aos meus pais e a minha esposa Tainá Oliveira por terem-me apoiado ao longo destes últimos anos.

RESUMO

A indústria da construção é responsável pelo consumo de mais de 50% de todos os recursos extraídos globalmente, exercendo uma pressão ambiental significativa. Manter ou aumentar os níveis de produção e, ao mesmo tempo, reduzir a pressão ambiental é um dos desafios da atualidade e está igualmente previsto nas metas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Por outro lado, apesar da indústria da construção evidenciar oportunidades para promover o descolamento entre o crescimento econômico e os aspetos ou impactos ambientais, estas oportunidades muitas vezes não são atendidas, em especial nos países em desenvolvimento onde, nos próximos anos, devem liderar a demanda por recursos naturais. Para promover o descolamento e a sustentabilidade na indústria da construção é necessário o uso de indicadores que permitam quantificar o desempenho ambiental de produtos, estabelecer metas e monitorar o progresso. Este estudo tem como objetivo desenvolver um conjunto de indicadores para quantificar o uso de recursos de forma simples e acessível a pequenas e médias empresas, auxiliando os vários profissionais e gestores a promoverem estratégias para aumentar a eficiência no uso de recursos e o potencial de desmaterialização. O método de pesquisa inicia-se por uma análise setorial identificando aqueles que são *foreground* ou *background* definidos em função da participação de mercado, em termos de massa e energia, dentro da indústria da construção. Os setores *foreground* são aqueles controlados ou influenciados pela indústria da construção; enquanto os setores *background* pela baixa participação são menos sensíveis a inventariar dados e a colaborar com diretrizes ou políticas públicas da indústria. Dentro dos vários setores, destacam-se os materiais a base de cimento, com uma participação superior a 60% (em massa). Para este setor foi conduzido uma Análise de Fluxo de Materiais (MFA) para quantificar as principais etapas e atividades que mais afetam a eficiência de recursos, bem como o potencial da industrialização para promover a desmaterialização do setor. Por fim, utilizado os conceitos de MFA e considerando uma perspectiva de ciclo de vida, foi desenvolvido um conjunto de indicadores – intensidade de material e eficiência, circularidade, e taxa de geração de resíduos – voltados para indústria da construção para contabilizar o consumo de materiais. Estes indicadores podem ser utilizados em diferentes

etapas (projeto, produto ou construção) e diferentes escalas (local, regional, nacional). Os indicadores foram desenvolvidos para serem fáceis de aplicar e de entender pela indústria de forma a permitir a comparabilidade setorial identificando as melhores práticas.

Palavras-chave: Pegada de material. Balanço de massa. Desmaterialização. Eficiência de recursos. Ecologia Industrial.

ABSTRACT

The construction industry is responsible for consuming more than 50% of all resources extracted worldwide, exerting a significant environmental pressure. Maintaining or increasing production levels and while reducing environmental pressure is a challenge and is also foreseen by the Sustainable Development Goals. Although construction industry has opportunities to decouple growth and environmental impacts, these opportunities are often missed, especially in developing countries which are expected to take the lead of natural resources consumption. To promote decoupling and sustainability in the construction industry, it is necessary indicators that allow quantifying the environmental performance of products, establishing goals and monitoring progress. This study aims to develop a set of indicators to quantify the use of resources in a simple and accessible way for small and medium-sized companies, helping professionals and managers to engage in strategies to increase resource efficiency and dematerialization. The research method starts evaluating the economic sectors and classified them as belonging to the foreground or background system from the perspective of construction industry. Foreground sectors are those controlled or influenced by the construction industry and are defined based on the production share consumed by the construction value chain; while the background sectors are those that has a low market-share and less sensitive to inventory data and to collaborate with industry procedures or even public policies. Within the several sectors, cement-based materials are stand out since as a market-share above 60% (by mass). For this sector, a Material Flow Analysis (MFA) was conducted to quantify the main activities that influence the resource efficiency and the dematerialization potential between industry and on-site mix production. Finally, using the concepts of MFA and considering a life cycle perspective, a set of indicators was developed - material intensity and efficiency, circularity, and waste generation rate - to quantify the use of materials. These indicators can be used in different scales (construction designers, material producers, builders, developers) and for several industrial sectors. Since they are simple to understand and easy to measure, it allows developing of benchmarking and ranking designs, facilities, and firms according to the best practices.

Keywords: Material footprint. Mass balance. Dematerialization. Resource efficiency. Industrial Ecology.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Evolução da extração global de recursos naturais no período 1970-2017 para as quatro principais categorias de materiais – minerais não metálicos (cinza), biomassa (verde), combustíveis fósseis (azul), e minerais metálicos (amarelo). Adaptado da base de dados UNEP. Unidade: milhões de toneladas (10^6t)..... 32
- Figura 2 Esquematização do descolamento no uso de recursos e impactos ambientais. O descolamento correlaciona consumo de recursos e crescimento econômico. Imagem adaptada de (UNEP, 2011). 36
- Figura 3: Evolução da extração de recursos naturais no Brasil no período 1970-2017 para as quatro principais categorias de materiais. Adaptado da base de dados CSIRO. Unidade: milhões de toneladas (10^6t)..... 43
- Figura 4 Balanço comercial das matérias primas extraídas no Brasil entre 1970-2017 para as quatro categorias de materiais. Valores estimados pela diferença entre importação e exportação. Adaptado da base de dados UNEP. Unidade: milhões de toneladas (10^6t)..... 44
- Figura 5: Linha de tendência entre 1970-2009 correlacionando o consumo de cimento (dados obtidos no SNIC) e consumo de minerais não metálicos (dados da UNEP) utilizada para estimar o consumo de minerais não metálicos a partir dessa data (2009) até 2017. O cimento entra também no consumo de minerais (eixo vertical). 45
- Figura 6: Consumo de cimento (linha laranja) e minerais não metálicos (área azul) entre 1970-2017 para o Brasil. Unidade: milhões de toneladas (10^6t). A redução no consumo de cimento e minerais de construção a partir de 2014 foi devido a problemas econômicos e políticos que afetaram o país. 46
- Figura 7 Consumo de materiais na dosagem de um metro concreto em obra (kg/m^3): cimento, água, areia e brita. É ilustrado a distribuição da amostragem, bem como a mediana, primeiro quartil, terceiro quartil e valor máximo e mínimo de cada material. 48
- Figura 8 Market-share do consumo de cimento para produção de concreto armado, baseado em dados de consumo de cimento e aço. Produção de concreto armado estimado em função da taxa de armadura..... 49
- Figura 9 Consumo de materiais para produzir um metro cúbico de argamassa dosada em obra (kg/m^3): cimento, água, areia e cal. 51
- Figura 10 Participação em porcentagem da indústria da construção dentro de cada setor dos materiais que consome. Porcentagem em função da massa ou energia. 65
- Figura 11 Participação dos materiais na indústria da construção e a distribuição acumulada (linha azul). Valores em função da massa. 67

Figura 12 Consumo de produtos na indústria da construção. Valores (%) em função da massa..... 70

Figura 13: Consumo de energia em função das principais categorias de produtos usados na construção civil..... 72

Figura 14 Modelo simplificado do fluxo de massas usado neste estudo que inclui as seguintes etapas: Extração e processamento de recursos naturais, produção de ligantes, produção de cimento, produção de concreto e argamassa, e aplicação no canteiro de obra. Onde (HF) são hidden flows, RP são resíduos de processamento, MCS são os materiais cimentícios suplementares. Vários tipos de saída de água foram considerados: Ai é água incorporada, Av é vapor de água, Ad é água descartada e Ae é efluentes de água. Os processos de cor azul referem-se aos processos de uso de água, vermelho combustíveis e CO₂, e laranja perdas e resíduos no canteiro de obra..... 76

Figura 15 Fluxo de materiais na etapa de extração de matérias primas. Brasil. Unidade de massa: 10³t..... 83

Figura 16 Fluxo de materiais para produção de clínquer e cal hidratada. Brasil. Unidade de massa: 10³t..... 85

Figura 17 Fluxo de materiais na produção de concreto e argamassa. Unidade de massa: 10³t 88

Figura 18 Contabilização total do fluxo de massas de concreto e argamassa. Brasil, 2015. Unidade de massa: 10³t..... 89

Figura 19 Consumo de materiais e estimativa da eficiência (%) para produzir um metro cúbico de concreto (linha superior) e argamassa (inferior), produzido no local (esquerda) ou industrialmente (direita). A produção de argamassa industrial, devido à menor densidade, consome até 20% menos material em volume. As perdas em obra incluem todos os materiais (incluindo água) utilizados nas atividades de mistura de concreto e argamassa e perdas de aplicação nos canteiros de obras. O CO₂ e o vapor de água liberados na calcinação são contabilizados separadamente e representam apenas as perdas de calcário e argila, respectivamente. Emissões de CO₂ e outros poluentes atmosféricos da combustão de combustíveis não estão incluídos. A cor verde no círculo interno representa os materiais úteis em um metro cúbico de produto; a cor vermelha é o consumo adicional de materiais que inclui as perdas em obra (cor laranja), estéril/hidden flows (cor cinza), rejeitos de mineração (cor marrom), consumo de água (cor azul) e emissões de CO₂ (cor roxa). Unidade de massa: quilograma (kg). 91

Figura 20 Consumo de material para produzir um metro cúbico de concreto (em cima) e argamassa (em baixo). As barras verdes se referem aos materiais utilizados no produto final; barras vermelhas representam o consumo de materiais adicionais; barras amarelas representam o potencial de desmaterialização resultante da industrialização do processo. Unidade de massa: os valores sobrepostos nas barras são porcentagens e a escala está em kg..... 94

Figura 21 Fluxo de materiais global na produção de materiais cimentícios – concreto, argamassa e outros produtos à base de cimento. Os materiais incluídos no fluxo são minerais não metálicos – calcário, argila, gipsita, filitos, agregados; minerais metálicos – ferro (ou aço depende da etapa). Não

estão incluídos combustíveis, ar, aditivos, formas de madeira, e fluxos de água. Calcinação devido a descarbonatação do calcário (cor azul) não é contabilizado como resíduo. Ano base 2018. O fim de vida útil foi estimado em 50 anos e, por este motivo, os fluxos de saída dos estoques são superiores aos fluxos de entrada. Hidden flows representado a cor cinza não foi incluído como resíduo porque atualmente não fazem parte da metodologia MFA como Eurostat ou OECD. 100

Figura 22 Benchmark na intensidade do uso do concreto para edifícios não residenciais. Apenas os fluxos diretos estão incluídos. Para o mesmo serviço, diferentes consumos. Pontos amarelos foram adaptados de (BCA, 2012). Os pontos vermelhos são duas soluções estruturais do novo edifício CICS - viga + laje ou laje “T”. Em ambos os casos não foi contabilizado o concreto usado nas fundações. 108

Figura 23 Intensidade de material e resistência a compressão do concreto. Fluxos diretos e indiretos incluídos. Os fluxos indiretos, que inclui os rejeitos, foram estimados com base nos coeficientes do MFA do cimento (capítulo 4). 109

Figura 24 Comparação entre a intensidade de materiais e intensidade de carbono no desempenho do concreto. O CO₂ do concreto foi estimado considerando os seguintes fatores (kg/t): 866 para clínquer, 38 para escória, 82 para cinza volante, 5 para sílica e filler, 1,5 para a brita, 11,8 para areia, 2,3 para agregados reciclados. Estes fatores representam a realidade brasileira e foram obtidos em (MILLER et al., 2018) para os SCM e clínquer, e (ROSSI, 2013; ROSSI; SALES, 2014; SOUZA, 2012) para os agregados. As emissões dos aditivos e energia elétrica (moagem e mistura do concreto) não foram incluídos. A intensidade de material foi obtida apenas dividindo os valores da Figura 23 pela resistência a compressão do concreto. 110

Figura 25 Influência da resistência a compressão do concreto na intensidade de recursos. Concretos de mais alta resistência reduz a intensidade de recursos. As linhas roxas representam concretos com o mesmo consumo de recursos em kg/m³. 111

Figura 26 Benchmark da influência da circularidade na performance do concreto. 113

Figura 27 Produção e aplicação de argamassa industrializada. Dados coletados por Carolina Sonvezzo e Daniel Reis (USP). Cor azul representa os fluxos de água, cor vermelha os resíduos diretos na produção e aplicação da argamassa, cor amarela os resíduos incorporados, cor verde representa o “produto útil”. 115

Figura 28 Esquema dos fluxos de materiais para os conceitos abordados neste capítulo numa abordagem cradle-to-grave ou cradle-to-cradle - desde a etapa de extração até ao fim de vida do produto. Adaptado de (GRAEDEL et al., 2011). 144

Figura 29 Exemplo de MFA para estimar as emissões de carbono na extração de madeira nativa na Amazônia. Imagem obtida em (CAMPOS; JOHN, 2012). 145

Figura 30 Fluxo de materiais da UE para minerais não metálicos, minerais metálicos, biomassa e combustíveis fósseis. Unidade de massa: Gigatons (Gt). Imagem obtida em (MAYER et al., 2019). 147

Figura 31 Histograma e parâmetros estatísticos utilizados para determinar a incerteza nas perdas de concreto na etapa de aplicação no canteiro de obra..... 154

Figura 32 Histograma e parâmetros estatísticos utilizados para determinar a incerteza nas perdas de argamassa na etapa de aplicação no canteiro de obra..... 154

Figura 33 Eixo esquerdo indica o consumo de recursos naturais para produzir 1m^3 de concreto e argamassa em obra e industrializado. Eixo direito a eficiência de cada recurso utilizado em porcentagem. 156

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Consumo de materiais adotado para estimar o consumo total de concreto e argamassa.	52
Tabela 2 Perda de material na recepção e estocagem de cimento, areia, brita e cal usado na produção de concreto e argamassa. Perda de cimento e cal é indicado para produto ensacado, que a média é perto de zero.	53
Tabela 3 <i>Market share</i> no uso de cimento e produção de materiais cimentícios para o Brasil e para ano 2015. Unidade de massa 10^3t (quilotone – kt).....	54
Tabela 4 Demanda de insumos para produzir clínquer (combustíveis fósseis, combustíveis alternativos e biomassa). Quantidade de energia usada obtido no (GNR, 2016). Energia incorporada obtida no: a) (BEN, 2016); b) (KÄÄNTEE et al., 2004); c) (PIPILIKAKI et al., 2005); d) (LAMAS; PALAU; CAMARGO, 2013).	54
Tabela 5 Demanda de insumos energéticos para produzir cerâmica. Última linha da tabela (madeira) representa a demanda de energia e insumos do setor informal.....	56
Tabela 6 Demanda de insumos energéticos na produção de gesso.	57
Tabela 7 Demanda de insumos energéticos para produzir cal virgem (combustíveis fósseis e biomassa). Estimativas obtidas no relatório (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014). Adotou-se $0,74 \text{ kg m}^{-3}$ massa específica para o gás natural obtida no Balanço Energético Nacional (BEN, 2016)....	58
Tabela 8 Demanda de gás natural para atender ao mercado do vidro. Considerando energia incorporada de $36,84 \text{ MJ/cm}^3$ e densidade 0,74. Nota: Produção total é para um ano, enquanto valores da tabela são diários.....	59
Tabela 9 Demanda de insumos energéticos para produção do alumínio no brasil. Os valores apresentados são referentes a totalidade de produção de alumínio primário e secundário. O consumo foi estimado com base no balanço comercial alocando 15% para a indústria da construção.	60
Tabela 10 Demanda de insumos energéticos para produção do aço no brasil. Os valores apresentados são referentes a produção.	61
Tabela 11 Comparação entre o consumo de materiais no setor da construção (top-down) e da casa típica brasileira (bottom-up). Asfalto não foi incluído pois é utilizado em outro tipo de obras. Parte da massa de gesso, cal e dióxido de titânio foram descontadas pois já são contabilizados no cimento, aço e tintas, respectivamente, evitando dupla contagem. As unidades são quilograma para casa e quilo tonelada para o setor da construção.	71

Tabela 12 Participação da indústria da construção no consumo de energia térmica e elétrica brasileira. Consumo total de energia no Brasil e no setor dos transportes obtido no Balanço Energético Nacional. 72

Tabela 13 Coeficientes adotados de estéril e rejeitos de mineração. Unidade: t/t de produto. 79

Tabela 14 Perdas na aplicação de concreto e argamassa. Apenas valores positivos foram considerados. Referência: (FINEP, 2003). 79

Tabela 15 Traços de produção de concreto dosado em obra. Todos os traços, com exceção dos dois primeiros, foram obtidos em manuais de construção, relatórios técnicos e receitas do YouTube. Maioria dos traços são informados em volume, as seguintes densidades foram adotadas: 1,25kg dm⁻³ para cimento, 1,20kg dm⁻³ para areia, e 1,45kg dm⁻³ para brita. De acordo com curva de Abrams da ABCP a resistência a compressão para esses traços se situa entre 12-35Mpa com mediana de 25Mpa. 148

Tabela 16 Traços de produção de argamassa dosada em obra. Todos os traços, com exceção dos dois primeiros, foram obtidos em manuais de construção, relatórios técnicos e receitas do YouTube. Densidades adotadas iguais às do concreto, cal com 0,70 dm⁻³. 149

Tabela 17 Consumo de materiais no Brasil e no setor da construção, e participação de mercado de cada um. Dados utilizados para definir os setores foreground e background. 150

Tabela 18 Análise do consumo de energia térmica e elétrica para a produção dos vários produtos de construção, e energia térmica usada no transporte. Dados utilizados para plotar a Figura 13. Unidades energéticas em toneladas equivalentes de petróleo (tep) 152

Tabela 19 Estimativa de estéril e rejeitos para produção de cimento e agregados. Unidade: t t⁻¹ de produto vendável. Os finos de mineração foram estimados com base no pó de pedra. De acordo com as visitas técnicas existem dois tipos de pó de pedra: a primeira com granulometria entre 2,4 e 4,7mm é vendável e não é considerado como rejeitos, o segundo tipo apresenta uma granulometria variada, com menos 2,6 mm, que não é vendável e foi contabilizada como rejeito. Algumas pedreiras podem processar esse segundo tipo de pó de pedra e recuperar como areia artificial. Os resíduos gerados durante o processo de desmonte e transporte até ao britador primário não foram contabilizadas nas visitas técnicas. 153

Tabela 20 Variação dos coeficientes de estéril e rejeitos. Neste caso, a literatura agrega os coeficientes de estéril e rejeito num só. Unidade: t t⁻¹ de produto vendável. 153

Tabela 21 Quantificação das incertezas associadas ao uso de recursos - areia, brita, filitos, cal hidratada, cimento e água na produção de concreto e argamassa. A incerteza foi realizada considerando a variabilidade das perdas em obra, estéril, rejeitos e consumo de água. As perdas em obra um intervalo de confiança de 95% para a mediana foi utilizado; os demais indicadores valores máximos e os mínimos foram utilizados. A faixa de incerteza é apresentada em porcentagem, onde valores mais altos refletem uma maior eficiência. Foi considerado a propagação do erro ao longo do MFA para quantificar a causa-efeito de cada uma das incertezas estudadas, por exemplo:

aumentando a perda em obra demanda mais recursos naturais na extração, e por conseguinte, gera mais resíduos e consome mais água. 155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAI	Associação Brasileira de Argamassa Industrializada
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
ABRAFIT	Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
ACV-m	Avaliação de Ciclo de Vida Modular
ADP	Abiotic Depletion Potential
ANICER	Associação Nacional da Indústria da Cerâmica
CO ₂	Carbon Dioxide
CO	Carbon Monoxide
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
DAP	Declaração Ambiental de Produto
DE	Domestic Extraction
DMI	Direct Material Input
DPO	Domestic Processed Output
EW-MFA	Economic-wide material flow accounting
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GEE	Gases de Efeito de Estufa
IAbr	Instituto de Aço Brasil
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	International Organization for Standardization
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
LCI	Life cycle inventory
MCS	Materiais cimentícios suplementares

MFA	Material Flow Analysis
MF	Material footprint
NIMBY	Not In My Back Yard
NOx	Nitrogen Dioxide
ODM	Objetivos de Desenvolvimento do Milênio
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
PCR	Product Category Rules
PIB	Produto Interno Bruto
PM	Particulate Matter
PVC	policloreto de vinila
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RE	Resource efficiency
RME	Raw material equivalent
SCM	Supplementary Cementitious Materials
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SO ₂	Sulfur Dioxide
TMC	Total material consumption
UHPC	Ultra-High Performance Concrete
UNEP	United Nations Environment Programme
VSI	Vertical Shaft Impact
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
WRI	World Resources Institute

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABELAS.....	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	18
SUMÁRIO.....	20
1. INTRODUÇÃO.....	23
1.1 Objetivo	25
1.2 Estrutura da tese	25
2. METODOLOGIAS PARA QUANTIFICAR O FLUXO DE MATERIAIS E OS IMPACTOS AMBIENTAIS	28
2.1 Análise de Fluxo de Materiais	28
2.2 Consumo de recursos naturais.....	31
2.3 Indicadores ambientais e descolamento no uso de recursos	34
2.4 Avaliação de Ciclo de Vida.....	36
2.5 Avaliação de Ciclo de Vida modular.....	39
3. CONSUMO DE MATERIAIS E INSUMOS ENERGÉTICOS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL	42
BRASILEIRA.....	42
3.1 Panorama geral de consumo de materiais no Brasil	43
3.2 Demanda de insumos minerais e energéticos consumidos na indústria da construção	47
civil brasileira.....	47
3.2.1 Materiais cimentícios	47
3.2.2 Materiais cerâmicos e rochas ornamentais	55
3.2.3 Gipsita, cal e filitos	56
3.2.4 Vidro	58
3.2.5 Alumínio e aço.....	59
3.2.6 Pavimentos asfálticos e sub-base de pavimentos e fundações	61
3.2.7 Madeira e celulose	62
3.2.8 Cobre, zinco e outros metais.....	63
3.2.9 Termoplásticos, tintas, e dióxido de titânio	64
3.3 Consumo e participação de mercado de cada setor na indústria da construção.....	65
3.4 Conclusão do capítulo	73
4. ANÁLISE DO FLUXO DE MATERIAIS NA PRODUÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS	75
4.1 Contextualização	75

4.2	Metodologia	76
4.2.1	Consumo de recursos minerais e energéticos, e emissões de CO ₂	77
4.2.2	Geração de estéril, rejeitos, resíduos e consumo de água	78
4.2.3	Quantificação da eficiência e potencial de desmaterialização	80
4.2.4	Quantificação da incerteza	82
4.3	Resultados e discussão	82
4.3.1	Extração e beneficiamento de matérias primas	82
4.3.2	Produção de ligantes e cimento	84
4.3.3	Produção de concreto e argamassa	87
4.3.4	Consumo total de materiais e taxa metabólica	90
4.3.5	Eficiência no uso de materiais e potencial de desmaterialização	90
4.3.6	Políticas Públicas	94
4.4	Conclusão do capítulo	96
5.	INDICADORES PARA MEDIR USO DE RECURSOS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO	98
5.1	Contextualização	98
5.2	Indicadores para medir uso de recursos na indústria da construção	101
5.2.1	Escopo para inventário do fluxo de materiais	103
5.2.2	Intensidade e eficiência de material	103
5.2.3	Circularidade	105
5.2.4	Taxa de geração de resíduos	106
5.3	Aplicação prática dos indicadores	107
5.3.1	Intensidade de material no consumo de concreto	107
5.3.2	Circularidade no concreto	111
5.3.3	Resíduos na aplicação de argamassa	114
5.4	Conclusão do capítulo	115
6.	CONCLUSÕES GERAIS	117
7.	ARTIGOS PUBLICADOS	119
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
	ANEXOS	141
	Anexo 1 – Terminologia (comentada)	141
1.1	Termos e definições	141
1.2	Indicadores de uso de recursos	145

Anexo 2 – Informações adicionais sobre o traço de concreto e argamassa e participação de mercado de vários setores na construção	148
Anexo 3 – Informações adicionais sobre estéril, rejeitos, e perdas em obra	153
Anexo 4 – Informações adicionais sobre eficiência no uso de material cimentícios	156

1. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas a demanda por recursos naturais tem aumentado de forma significativa e, atualmente, a indústria da construção responde por mais da metade de todos os recursos extraídos globalmente. O consumo de recursos desempenha um papel importante em termos sociais e econômicos, promovendo a construção de infraestrutura, habitação, saneamento básico e, em termos gerais, possibilita melhores condições de vida para a sociedade. Existe ainda uma correlação direta entre Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e o consumo de recursos, onde países com maior consumo têm IDH mais elevado (UNEP, 2016). Por outro lado, os impactos ambientais associados ao uso de recursos, desde a extração até ao fim de vida são relevantes, desde perda de biodiversidade, mudanças climáticas, esgotamento de recursos, degradação dos ecossistemas, entre outros (HABERT et al., 2010). Uso sustentável de recursos, juntamente com a redução de resíduos, é uma das metas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (UNITED NATIONS, 2019), bem como vários trabalhos e iniciativas têm sido desenvolvidos pela neste sentido *United Nations Environment Programme* (UNEP).

A transição para um modelo mais eficiente de produção e uso de recursos necessita de ferramentas e indicadores para medir quantitativamente o fluxo de materiais e os impactos ambientais numa perspectiva de ciclo de vida. Os problemas na indústria da construção são essencialmente a elevada quantidade consumida pelo setor; os resíduos gerados ao longo do ciclo de vida; e baixa taxa de reciclagem, em especial nos países em desenvolvimento. Dentro da área da Ecologia Industrial existem diversas ferramentas analíticas e indicadores para quantificar os fluxos materiais e os impactos ambientais. A metodologia de ACV é uma das principais ferramentas para medir o impacto ambiental associado ao uso de recursos. Porém, existem alguns problemas. A categoria de impacto Depleção de Recursos Abióticos (ADP) estima o esgotamento de recursos naturais não renováveis. No entanto, no caso dos minerais não metálicos as reservas são consideradas globalmente infinitas, enquanto o impacto ambiental destes materiais é essencialmente local. Deste modo a ADP pouco contribui para aumentar a eficiência no uso de recursos na construção, usualmente materiais de baixo valor agregado e muita massa. Também a geração de resíduos inertes,

que representam sérios problemas urbanos, não são contabilizados na maioria dos estudos de ACV e não possuem uma categoria de impacto (ILCD, 2012)

Por serem mais fáceis de comunicar para um público não especializado o uso de indicadores para quantificar métricas ambientais (ex.: pegada carbono, pegada ecológica, etc.) tem sido utilizado na literatura (SOLÍS-GUZMÁN; MARRERO; RAMÍREZ-DE-ARELLANO, 2013). Porém não existe uma metodologia padrão o que dificulta a sua aplicação nos diversos setores que integram a indústria da construção. Por outro lado, o uso de indicadores simples e que sejam fáceis de aplicar e de entendimento pela sociedade pode gerar um impacto positivo no desenvolvimento sustentável. Por exemplo, quando EUA elaboraram uma nova lei determinando que as empresas divulgassem as emissões atmosféricas tóxicas, foi criado um indicador. Quando os jornais locais começaram a divulgar o TOP-10 as empresas agiram rapidamente para saírem da lista e as emissões reduziram 40% em apenas 3 anos (MEADOWS, 1998).

Para reduzir os impactos ambientais e promover a eficiência é importante utilizar indicadores simplificados que permita quantificar o uso de recursos de forma simples e acessível para pequenas e médias empresas sem necessidade de adquirir equipamentos de medição complexos ou contratar consultores especializados. Este estudo propõe uma abordagem simplificada com base em três indicadores padronizados para quantificar os principais aspectos ambientais associados ao uso de recursos e geração de resíduos na indústria da construção. Numa perspectiva de ciclo de vida os indicadores serão testados na indústria cimenteira, identificando as etapas mais importantes, bem como os principais fluxos de material e onde é possível simplificar o processo de medição. Por exemplo, nas etapas de extração e beneficiamento das matérias primas a geração de *hidden flows* e rejeitos são representativas na pegada de material? Dependendo do material, quanto perdemos ao não medir esta etapa? Se for representativo, qual melhor forma ou método para coletar estas informações? Como contabilizar a reciclagem considerando as várias definições de circularidade?

Os indicadores propostos procuram responder a estas questões, bem como podem ser utilizados dentro da metodologia de ACV modular (ACV-m) que no seu módulo básico contabiliza cinco indicadores (ou pegadas) incluindo consumo de matérias primas e geração de resíduos. A principal vantagem da ACV-m está na menor complexidade do levantamento de dados primários, centrado nos aspetos ambientais mais relevantes, apresentando ao mesmo tempo uma estrutura em sincronia com a ACV tradicional e refletindo nos resultados os efeitos principais mais relevantes.

1.1 Objetivo

O objetivo deste estudo é desenvolver um conjunto de indicadores que permita a indústria da construção quantificar de forma simplificada e consistente o uso de recursos naturais e seus produtos. Os indicadores deverão permitir quantificar as perdas e resíduos, consumo de materiais, e circularidade. Será feita uma abordagem do berço a obra (*cradle-to-site*). A unidade funcional foi deixada em aberto para melhor representar o ciclo de vida do produto ou do edifício.

Não se pretende medir o alcance de diferentes estratégias para aumentar a eficiência no uso de recursos, apenas quantificar o resultado através de um critério padronizado de medição. Espera-se que cada empresa consiga inventariar o consumo de recursos primários e secundários, geração de resíduos, e ao mesmo tempo incluir esse dado no inventário do módulo básico de ACV-m. Como os indicadores gerados irão certamente variar entre diferentes empresas e fornecedores, será possível estimar valores máximos e mínimos, evidenciando as empresas que melhor cumprem com os critérios avaliados.

1.2 Estrutura da tese

A tese contém cinco capítulos desenvolvidos de forma independente. O primeiro capítulo (atual) representa uma introdução ao tópico da pesquisa identificando o problema, objetivo, e a estrutura da tese.

No segundo capítulo foi realizada uma revisão conceitual sobre o assunto em estudo. É apresentado o consumo de recursos naturais ao longo das últimas décadas, e são identificadas as principais metodologias para quantificar os fluxos de materiais e os impactos ambientais, bem como as limitações encontradas em cada um para serem utilizadas na indústria da construção.

No terceiro capítulo a demanda de materiais e insumos energéticos foram estimados para a indústria da construção civil brasileira. O objetivo é quantificar a capacidade de influência da indústria da construção em cada setor – *foreground* e *background*. Cadeias produtivas que dependem mais da indústria da construção são mais perenes para inventariar fluxos de materiais e adotar medidas ambientais que outros setores. Por exemplo, a indústria da construção consome a totalidade do cimento produzido, enquanto outro setor como alumínio consome apenas uma parte. Setores com cota de mercado limitada dificilmente a indústria da construção irá conseguir interferir processo produtivo e propor políticas públicas.

No quarto capítulo, utilizando a metodologia de MFA, foi conduzido um estudo para mensurar os indicadores de eficiência e uso de recursos minerais para concreto e argamassa que são os produtos de construção mais consumidos. Considerando uma abordagem do berço a obra (*cradle-to-site*) estimou-se os seguintes aspectos ambientais: i) estéril de mineração (ou *hidden flows*); ii) rejeitos de mineração; iii) consumo de água; iv) emissões de CO₂; v) consumo de matérias primas. Com base nos resultados obtidos estimou-se o consumo total de recursos, eficiência no uso e potencial de desmaterialização comparando as duas rotas tecnológicas – produção industrialização e produção no canteiro de obra.

No quinto capítulo um conjunto de indicadores para medir o uso de recursos na indústria da construção – intensidade de material, circularidade e geração de resíduos – foram propostos. Como o objetivo é viabilizar benchmarks entre diferentes empresas e fornecedores para um mesmo produto, o número de dados primários a coletar deverá ser limitado, mas ter uma abrangência suficiente que permita avaliar os aspectos mais críticos no uso de recursos naturais. Serão analisadas as várias operações da cadeia produtiva desde

extração, beneficiamento e produção identificando os componentes que seguem para cada uma das correntes de saída, sua origem e quantidades; como se forma o produto, coproduto e resíduos. Os indicadores deverão ser multiescala, ou seja, podem ser utilizados ao nível dos edifícios (construção), dos fornecedores, de uma cidade, ou globalmente. Por serem simples de medir os indicadores podem ser utilizados dentro das ferramentas de gestão das empresas e permitir a rastreabilidade de eventuais melhorias ambientais ao longo do tempo.

Ao longo deste trabalho são apresentados diversos conceitos e indicadores comumente utilizados no campo da Ecologia Industrial, cuja terminologia de cada um está disponível no Anexo 1. Todas as unidades de massa usadas neste estudo são métricas. Uma tonelada (t) = 1000 quilogramas (10^3kg). Para múltiplos de toneladas foi adotada quilo tonelada (kt) = 10^3t ou milhões de toneladas (Mt) = 10^6t .

2. METODOLOGIAS PARA QUANTIFICAR O FLUXO DE MATERIAIS E OS IMPACTOS AMBIENTAIS

A cúpula do Milênio das Nações Unidas em 2000 definiu as principais ações e políticas públicas sobre desenvolvimento humano, centrando-se sobretudo em aspetos económicos tais como aumento do emprego e crescimento económico (BARTELMUS, 2003; GRIGGS et al., 2013). Este paradigma mudou após o ano de 2015 com o aparecimento da nova agenda - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) (UNITED NATIONS, 2019), substituindo a agenda anterior dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM). Os novos ODS reconhecem a importância do uso sustentável de recursos naturais e mitigação das mudanças climáticas para alcançar os objetivos gerais do desenvolvimento. O uso de recursos é igualmente importante em outros objetivos, tais como, saúde e bem-estar, cidades e comunidades sustentáveis, saneamento, e infraestruturas resilientes. O desenvolvimento de pesquisa e inovação em soluções que promovam a sustentabilidade ambiental na indústria da construção é essencial para promover os ODS (OLIVETTI; CULLEN, 2018).

Este capítulo faz um enquadramento do consumo de recursos naturais (metálicos, não metálicos, biomassa e fósseis) considerando a escala global e apresenta as principais metodologias, dentro da área da Ecologia Industrial, disponíveis para reduzir a pressão ambiental.

2.1 Análise de Fluxo de Materiais

Desde a década de setenta tem sido progressivamente reconhecido que a quantidade de fluxos de materiais – em massa é uma métrica ambiental e económica relevante (ADRIAANSE et al., 1997; MEADOWS et al., 1972). A massa de um material é uma informação importante do processo produtivo, fácil de medir e de entendimento pelo público em geral.

A MFA é uma das metodologias mais importantes para quantificar o uso de recursos através da contabilização de fluxos de massa, energia ou água (BLEISCHWITZ, 2010) dentro de um sistema definido em espaço e tempo (BRUNNER; RECHBERGER, 2003). Atualmente, o MFA é a metodologia padrão no Gabinete de Estatísticas da União Europeia (EUROSTAT, 2001, 2018), da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD, 2008), do Instituto de Ecologia Social de Viena (KRAUSMANN et al., 2015), da organização não governamental do World Resources Institute (WRI, 2008), das Nações Unidas (UNEP, 2016, 2019a).

Devido a sua importância, vários grupos de pesquisa acadêmica fizeram importantes contribuições metodológicas (FISHER-KOWALSKI et al., 2011; KRAUSMANN et al., 2017), rastreando e contabilizando os fluxos de materiais geralmente em massa e em escala nacional ou global (HAAS et al., 2015; KRAUSMANN et al., 2018; MAYER et al., 2019; SCHANDL et al., 2017). Existem bancos de dados nacionais e internacionais sobre os fluxos dos materiais, incluindo minerais de construção. Com o uso de dados de proxy (por exemplo estimar consumo de agregados ou calcário em função da produção de cimento) foi possível reconstruir fluxos globais desde o ano de 1900 (KRAUSMANN et al., 2009).

Pode ser usada em diferentes escalas, desde simples cadeias produtivas até a compilação de todas as categorias de materiais extraídos e/ou consumidos dentro de um sistema econômico (EW-MFA) (OECD, 2008). Apesar da EW-MFA ser mais abrangente, não permite uma análise detalhada por sistema produtivo e identificar oportunidades de ganho de eficiência por setor.

A nível setorial, os fluxos de massa são quantificados com base em dados primários ou secundários fornecidos em relatórios ou manuais estatísticos de produção/consumo (ex. SNIC fornece informações precisas da produção de cimento no Brasil). O uso de matrizes de insumo-produto, teoria originalmente proposta por Leontief (1970), são desenvolvidas a partir de dados de contas nacionais onde podem fornecer estimativas sobre o consumo de material.

Outra possibilidade é utilizando coeficientes obtidos por meio de informações setoriais (ex.: demanda de agregados na construção civil pode ser estimada com base em coeficientes que derivam do consumo de concreto e asfalto) (KRAUSMANN et al., 2017). Os conceitos de MFA setoriais já foram aplicados anteriormente em outras pesquisas, tais como para identificar e medir os potenciais ganhos em termos de eficiência energética, como a indústria de aço e alumínio (ALLWOOD, 2011).

O consumo doméstico de material (DMC), é o principal indicador da metodologia de MFA (EISENMENGER et al., 2016), e pode ser obtido através da soma da extração de recursos naturais utilizados (DE) com a diferença entre o balanço comercial ($DMC = DE + \text{importação} - \text{exportação}$). O indicador DMC refere-se apenas aos materiais que *entram* na economia e não representa a demanda de recursos necessários em toda a cadeia produtiva devido a trocas comerciais entre países.

A pegada de material é um indicador mais rigoroso pois contabiliza o consumo de recursos desde a etapa de beneficiamento (WIEDMANN et al., 2015), independentemente do local onde ocorreu. O conceito pegada de material (MF) contabiliza todos os fluxos de materiais utilizados para produzir um produto, medido ao longo da cadeia produtiva (WIEDMANN et al., 2015). É expressa em massa por unidade de tempo ou, quando dividida pela quantidade de produtos pode ser expressa como massa por unidade de produto. Por exemplo a pegada material de um metro cúbico de concreto é o somatório de todas as matérias primas extraídas e usadas para produzir o concreto (massa/m^3). O balanço comercial deve acompanhar o fluxo de massa de forma a alocar a extração ao local onde os produtos são consumidos (matérias primas equivalentes – RME).

A pegada de material pode ser calculada da seguinte forma $MF = DE + RME_{\text{imp.}} - RME_{\text{exp.}}$. Caso se pretenda incluir *hidden flows*, o indicador consumo total de material (TMC), semelhante a MF, é o mais adequado ($TMC = MF + HF$). Porém, ainda não existe uma metodologia que permita calcular de forma rigorosa os *hidden flows*. Tal situação deve-se, pelo menos em parte, à ausência de uma abordagem padronizada que especifique a melhor forma de coletar essas informações (FISHER-KOWALSKI et al., 2011).

Atualmente os *hidden flows* podem ser estimados com base em coeficientes. O Instituto Wuppertal desenvolveu o conceito MIPS (Material Input per Service Unit) que são coeficientes que permitem estimar a intensidade no uso de três recursos: materiais (bióticos e abióticos), água e ar (WUPPERTAL INSTITUTE, 2014). Embora sejam valores aproximados e não refletem a variabilidade regional e tecnológica, permitem obter uma boa visão integrada da cadeia produtiva. É uma metodologia importante que inclui todo ciclo de vida do produto ou serviço e com várias aplicações encontradas na literatura – desde produtos e sistemas produtivos (HERTWICH; PEASE; KOSHLAND, 1997) até pequenas cidades (ou bairros) (DENG; PRASAD; OSMOND, 2011). No Brasil (J. MENDO, 2009a) desenvolveu um relatório de fluxo de massa, porém alguns valores apresentam problemas, por exemplo o beneficiamento da areia tem um rejeito superior a 90%, que não é viável, além que o volume de produção informado não é insuficiente para atender a demanda interna brasileira.

2.2 Consumo de recursos naturais

O consumo de recursos naturais, principalmente os não renováveis, vem crescendo de forma acentuada ao longo os últimos 50 anos (OECD, 2015). Apesar de existirem até cerca de 70 grupos de materiais é usual serem agregados em quatro grupos distintos: biomassa, minerais metálicos e não metálicos, e combustíveis fósseis (KRAUSMANN et al., 2018). Para estes grupos e com base na plataforma da UNEP quantificou-se a evolução da extração nos últimos 40 anos – Figura 1. Entre 1970 e 2017, a nível mundial, a extração de recursos naturais aumentou de 30 para 90 Giga toneladas (Gt) que equivale a uma taxa metabólica (massa/capita/ano) cerca de 11,8t/cap./2017. Porém, como as demandas por recursos variam entre países os padrões de consumo serão diferentes, em especial entre países desenvolvidos e em desenvolvimento (GILJUM; BRUCKNER; MARTINEZ, 2015). A faixa temporal também influencia o padrão de consumo, tais como nos países em desenvolvimento existe um consumo elevado de minerais não metálicos para atender a demanda de infraestruturas ou habitações, como China ou Índia e, numa fase posterior essa

demanda tende a estabilizar em função do tipo de modelo econômico (NIZA; FERRÃO, 2006).

Alguns autores sugerem o consumo de 8t/cap./ano como o valor ideal para sustentabilidade no uso de recursos (DITTRICH et al., 2012; LETTENMEIER; LIEDTKE; ROHN, 2014). Porém como a maioria dos recursos consumidos são não renováveis e finitos, além do previsível aumento populacional nos próximos anos, esse valor parece demasiado otimista. Desde 1970 a taxa metabólica dos minerais não metálicos mais que duplicou enquanto que as demais categorias de materiais se mantiveram constantes ou sofreram uma pequena redução (KRAUSMANN et al., 2009).

Figura 1: Evolução da extração global de recursos naturais no período 1970-2017 para as quatro principais categorias de materiais – minerais não metálicos (cinza), biomassa (verde), combustíveis fósseis (azul), e minerais metálicos (amarelo). Adaptado da base de dados UNEP¹. Unidade: milhões de toneladas (10⁶t).

¹ Uma descrição alargada da base de dados e acesso aos dados usados na construção da Figura 1 pode ser obtido no site: <https://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database>.

Ainda de acordo com a Figura 1, no canto superior esquerdo, é ilustrado a participação em porcentagem de cada categoria de material entre 1970 e 2017. A categoria de minerais não metálicos - onde se inclui a maioria dos materiais de construção – são os mais consumidos, respondendo globalmente por quase 50% de todos os materiais extraídos (SCHILLER; GRUHLER; ORTLEPP, 2017). A construção civil demanda ainda outros materiais como biomassa (construções em madeira, formas para concreto etc.), metais (aço para concreto armado, alumínio etc.), e combustíveis (calcinação do clínquer, redução do minério de ferro, transporte etc.). É razoável assumir que a construção civil representa mais de metade de todos os recursos extraídos globalmente.

O aumento expressivo no consumo minerais de construção gera impactos ambientais e sociais relevantes, tais como poluição do ar e água, alterações nos ecossistemas (HABERT et al., 2010), além da escassez regional mesmo em materiais considerados abundantes tais como de areia e brita (IOANNIDOU et al., 2017). Dos vários materiais extraídos destacam-se os materiais cimentícios que sozinhos correspondem cerca de um terço de todos os materiais extraídos (UNEP, 2017) e sua acumulação na sociedade, juntamente com o surgimento de resíduos radioativos e plásticos, estão entre os marcos materiais mais importantes que identificam uma nova época geológica, o Antropoceno (WATERS et al., 2016). Adicionalmente, o aumento da população mundial, a industrialização dos países, e a tendência do índice de desenvolvimento humano (IDH) para níveis mais elevados poderá elevar o consumo de recursos até 218Gt em 2050 (KRAUSMANN et al., 2018; SCHANDL et al., 2017) considerando constante os padrões de consumo e de produção atuais.

Em consequência das elevadas taxas de extração dos materiais cimentícios, em particular dos agregados tem levado à exaustão destes recursos em algumas regiões do mundo (UNEP, 2019b). Devido à ausência de regulação e fiscalização, a extração ilegal é prática comum em 70 países, agravando os problemas ambientais e sociais (TORRES et al., 2017), onde as taxas de extração são superiores a capacidade de substituição do material (BENDIXEN et al., 2019). A escassez regional e a legislação ambiental mais rígida levam a redução da disponibilidade e consequente aumento das distâncias de transporte entre a extração e os consumidores finais pode provocar um aumento no preço do produto, além

que é um tipo de atividade econômica que afeta negativamente a população local (síndrome *Not-In-My-Back-Yard* (NIMBY)) (DREW; LANGER; SACHS, 2002). Por outro lado, as restrições ambientais e um eventual impacto no preço é também um fator para promover soluções inovadoras para promover o descolamento no uso de recursos.

Até ao momento as estratégias da indústria na redução dos impactos ambientais focam sobretudo na redução do aquecimento global, melhorando a eficiência energética e procurando fontes de energia limpa (renováveis). A eficiência no uso de recursos é usualmente é relegado para segundo plano. Considerando que a produção de materiais consome cerca de $\frac{1}{4}$ de toda a energia produzida globalmente, aumentar a eficiência no uso de materiais pode permitir reduções adicionais dos GEE (HERTWICH et al., 2019), tais como desmaterialização, redução de perdas e resíduos, reuso e reciclagem, aumentar a intensidade de uso (redução da área útil por habitante), aumentar vida útil, e uso de materiais menos intensivos em energia (UNEP, 2020). Reduzir a produção não é uma solução viável do ponto de vista social pois implicaria deixar uma fração da população sem acesso a importantes materiais de construção.

Para reduzir a pressão ambiental e promover a eficiência no uso de recursos é necessário metodologias e indicadores para quantificar os fluxos e os impactos ambientais dos produtos. Para tal é usual recorrer a ferramentas da área da Ecologia Industrial tais como Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) ou Análise de Fluxo de Materiais (MFA) para identificar, quantificar, e caracterizar os fluxos de materiais e energia associados aos processos de extração, produção e consumo. Existem outros métodos de avaliação usando recursos energéticos, tais como a Emergia ou a Exergia, que contabilizam a energia útil necessária para produzir um produto ou serviço (HOQUE et al., 2012).

2.3 Indicadores ambientais e descolamento no uso de recursos

A base conceitual e metodológica para contabilizar os fluxos de materiais e respetivos indicadores de entrada, balanço comercial, consumo e saída estão bem estabelecidos internacionalmente (EUROSTAT, 2018; OECD, 2008). Com base nos fluxos de materiais, é

possível estimar indicadores ambientais tais como circularidade, produtividade, intensidade etc. Os indicadores são formas de comunicar informações quantitativas com base no fluxo de massa.

Por outro lado, diferentes definições estão disponíveis na literatura dificultando o entendimento e aplicabilidade dos indicadores ambientais. Por exemplo, a eficiência de recursos é geralmente entendida como um indicador econômico (isto é, PIB/DMC ou PIB/MF) ou indicador ambiental, podendo ser contabilizado em massa ou em termos de impacto ambiental (HUYSMAN et al., 2015). Economia circular, que está no centro de várias políticas internacionais e é um conceito importante por vários stakeholders da indústria, deriva de modelos de fluxo de materiais. No entanto, até agora, a circularidade tem mais de 114 definições (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017). Deste modo, ao se utilizar indicadores ambientais é necessário deixar claro o procedimento e o que está sendo ou não considerado em cada um deles.

Dentro da metodologia EW-MFA, o consumo de materiais (DMC) é também usado na União Europeia para quantificar o potencial de descolamento (PIB/DMC) relativo e absoluto (EUROSTAT, 2010). A hipótese subjacente a este conceito é o crescimento econômico reduzindo ao mesmo tempo o consumo de recursos. O descolamento é medido pela razão entre o produto interno bruto e o consumo de recursos (PIB/DMC). O descolamento relativo é igualmente usado como indicador no roteiro Europeu na utilização eficiente de recursos (EC, 2011). Porém não necessariamente significa uma redução no consumo de recursos naturais, caso o crescimento econômico seja superior ao aumento do consumo de recursos. No caso de descolamento absoluto obrigatoriamente o consumo de recursos precisa reduzir e o PIB aumentar. A Figura 2 exemplifica o conceito de descolamento. Apesar das aparentes melhorias promovidas por políticas públicas, sobretudo nos países desenvolvidos, no sentido de aumentar a reciclagem e redução dos resíduos, nenhum país conseguiu atingir descolamento absoluto (WIEDMANN et al., 2015).

Figura 2 Esquemática do descolamento no uso de recursos e impactos ambientais. O descolamento correlaciona consumo de recursos e crescimento econômico. Imagem adaptada de (UNEP, 2011).

Os indicadores derivados da contabilização de MFA retratam a pressão sobre meio ambiente, mas não fornecem informações sobre impactos ambientais. Ferramentas que quantificam o impacto ambiental geralmente seguem a metodologia de ACV, muito embora os fluxos de massa e energia, derivados de indicadores de MFA, podem ser úteis na etapa de inventário de ACV.

2.4 Avaliação de Ciclo de Vida

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que permite avaliar quantitativamente o potencial impacto ambiental de um produto (VAN DEN HEEDÉ; DE BELIE, 2012). Por definição deve ser capaz de descrever de forma completa a grande variedade de aspectos ambientais ao longo do seu ciclo de vida. Para atingir esta meta a metodologia de ACV deve ser baseada em um inventário que demanda uma coleta grande de dados. Esses dados incluem não apenas as instalações de produção de uma empresa, mas também toda a sua cadeia de suprimentos que pode, inclusive, cruzar vários países. Em uma abordagem do berço ao túmulo (*cradle-to-grave*) pode ainda estimar os impactos futuros nas fases de uso e pós uso com base em uma amostragem estatística (JOHN, 2017). Tal situação é particularmente difícil de conduzir para produtos de longa duração, como na indústria da construção, que pode abranger meio século ou mais durante a fase de uso.

A elevada quantidade de dados a serem coletados para realizar uma ACV completa é caro e até mesmo inviável. O uso de dados secundários tornou-se regra, mesmo para fluxos diretos das instalações dos produtores. As bases de dados de ciclo de vida (LCI) estão disponíveis em vários países internacionais, nacionais ou de uso genérico². Esses bancos de dados são construídos de uma abordagem *bottom-up*, retratando as medições de plantas industriais individuais, aceitas como representativas. Assim os aspetos ambientais associados a um produto usualmente são representados por um ou alguns conjuntos de dados que podem não ser estatisticamente representativos. Sem amostragem apropriada, a incerteza é atribuída com base na “qualidade” dos dados e não com base na dispersão real no mercado (GURSEL et al., 2014).

Os impactos ambientais de uma ACV baseada em dados secundários depende de quão próximos os dados utilizados refletem o sistema produtivo e sua cadeia de suprimentos. Esta abordagem pragmática possibilitou que a ACV moderna fosse realizada com base em dados escassos mas que ignora, por exemplo, o efeito da eficiência por trás da ampla rota de produção de materiais (CHEN et al., 2010; DAMINELI et al., 2010; OLIVEIRA; PACCA; JOHN, 2016).

Dentro da metodologia de ACV, a categoria depleção de recursos abióticos (ADP) é utilizada para estimar os impactos ambientais associadas à extração de recursos naturais em função da sua disponibilidade. A ADP estima a depleção potencial de recursos naturais não renováveis pela razão entre a taxa de extração e as reservas globais disponíveis (VAN OERS; GUINÉE, 2016). Esta abordagem de cálculo apenas considera recursos considerados escassos, principalmente os metálicos. Como as reservas dos minerais não metálicos da construção são consideradas abundantes a nível global o indicador de ADP não é adequado para promover a reciclagem (BUTERA; CHRISTENSEN; ASTRUP, 2015) e a eficiência no uso de recursos na indústria da construção. O impacto ambiental destes minerais é essencialmente local (HABERT et al., 2010) afetando a dinâmica e ecologia dos sistemas naturais tais como inundações devido a erosão dos leitos de rios, redução

² Base de dados genéricas são aquelas que cobrem vários países, ex. Ecoinvent tem dataset Rest-of-World (RoW)

na área de solos, formação organizações criminosas (a.k.a *sand mining máfia*) (BRAVARD; GOICHOT; GAILLOT, 2013; LAMB; MARSCHKE; RIGG, 2019). Adicionalmente o teor de concentração do minério (produto após etapa de beneficiamento) tem vindo a diminuir ao longo das últimas décadas aumentando os impactos ambientais (PRIOR et al., 2012).

Para contornar este problema, foi proposto uma metodologia alternativa focada na criticalidade que avalia a disponibilidade de recursos a nível local (IOANNIDOU et al., 2019). O método segue os mesmos princípios e estrutura usada por Graedel (2012) para os minerais metálicos, porém os indicadores foram adaptados para brita e areia. Apesar de medir com maior rigor a escassez de recursos locais o método foca principalmente na etapa de extração em função da demanda. Porém os problemas ambientais precisam ser resolvidos numa perspectiva de ciclo de vida. Adicionalmente, um dia todos os produtos se tornarão resíduos e, portanto, reduzir o consumo de recursos naturais mesmo em regiões que sejam abundantes é uma estratégia desejável, sobretudo nos países em desenvolvimento, onde a disposição ilegal é comum agravando os problemas ambientais e sociais nas cidades (GAVRILETEA, 2017; PAZ et al., 2018; SILVA; FERNANDES, 2012).

Os resíduos da construção e demolição (RCD) representam cerca de 500kg/cap./ano que, quando não recebem solução adequada, podem causar acidentes com consequências graves para a população – obstrução dos canais de drenagem, assoreamento de rios e córregos, proliferação de vetores de doenças, além dos elevados custos de limpeza (PINTO, 1999). Porém os RCD não são contabilizados de forma adequada pela ACV. A base de dados Ecoinvent, uma das mais utilizadas mundialmente, apesar de possuir processos de resíduos inertes (ex.: resíduo de concreto) não declara a massa que está indo para aterro; porém contabiliza dos minerais metálicos. Em termos de massa os resíduos metálicos representam ~6% dos RCD e são menos problemáticos devido ao interesse econômico em recuperar esses resíduos. No caso dos resíduos inertes, onde tem uma participação de ~83% (WU et al., 2020) dos RCD, como tem baixo valor agregado é mais econômico extrair recursos naturais que reciclar.

O escopo da norma (EN 15804, 2015), que estabelece as regras das declarações ambientais de produto, prevê a contabilização dos resíduos perigosos, não perigosos e radioativos para elaboração da ACV. Porém como o banco de dados não considera os resíduos inertes, os impactos ambientais são inexistentes para este tipo de fluxos, mesmo realizando uma ACV completa cradle-to-grave. Outro problema é a inexistência de uma categoria de impacto para quantificar os impactos deste tipo de resíduos, com exceção de toxicidade, mas está mais relacionado com lixiviação de resíduos perigosos em aterros sanitários.

Por este motivo, ao analisarmos uma a Declaração Ambiental de Produto da Votorantim Cimentos, no módulo A1-A3 (etapa de produto) apenas 200g (gramas) de resíduos são reportadas para produzir uma tonelada de cimento (VOTORANTIM, 2016) ou 4,8kg (quilogramas) para produzir uma tonelada de aço conforme a DAP da ArcelorMittal (2018). Estes resíduos declarados podem ocorrer em processos background que não estão diretamente relacionados com os fluxos diretos da empresa. Por outro lado, na literatura é informado que apenas a extração e beneficiamento de calcário utilizado nos fornos de clínquer para produção de cimento tem uma taxa de geração de rejeitos na ordem de 1:1 (J. MENDO, 2009a; SAHU; DASH, 2011) que não é compatível com o valor declarado na DAP. Adicionalmente, segundo a norma europeia (EN 15804, 2015) no módulo básico para elaboração da DAP a etapa de obra é opcional, porém grandes quantidades de resíduos são gerados nesta etapa (FORMOSO et al., 2002). Apesar que em termos energéticos a fase de obra pode ter baixa participação, considerando todo o ciclo de vida de um produto, mas no que se refere aos resíduos é relevante.

2.5 Avaliação de Ciclo de Vida modular

No sentido de reduzir o elevado grau de complexidade e custo associado ao ACV tradicional o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) desenvolveu a metodologia Avaliação de Ciclo de Vida modular (ACV-m). Apresenta uma estrutura em sincronia com a metodologia de ACV “tradicional”, porém de escopo reduzido e compatível com as normas ISO. A ACV-m foi pensada para ter aplicabilidade para todas as empresas, incluindo pequenas e médias empresas (PME). A sua estrutura assenta na quantificação de 5 aspetos

ambientais: emissão de CO₂, consumo de matérias-primas, geração de resíduos, consumo de água e consumo de energia. Apresenta uma abordagem evolutiva, ou seja, permite que as empresas realizem ACV em módulos que se complementam progressivamente. Apesar de não serem contabilizados os impactos ambientais, a metodologia ACV-m avalia de forma mais contundente a geração de resíduos e consumo de recursos comparativamente com ACV tradicional.

Um estudo piloto da metodologia ACV-m foi aplicado em blocos de concreto, em 33 fábricas brasileiras. Os resultados demonstraram dificuldades no inventário do consumo de água e resíduos gerados ao longo da cadeia produtiva de forma a viabilizar um inventário completo (CBCS, 2014). Na parte dos resíduos faltou uniformizar a melhor forma de quantificar os vários tipos de resíduos tais como perdas, quebras, sobras, co-produtos, e material reutilizado. Verifica-se a necessidade de conceitualizar e padronizar a etapa de inventário de alguns dados que neste trabalho procuramos consolidar, tais como, definir o que é resíduo do que é coproduto; separar materiais primários de secundários; esclarecer alguns procedimentos de medição tais como separar perdas de processos e reciclagem interna; entre outras questões.

Ainda sobre o estudo do bloco verificou-se uma variação de 15% da massa para o mesmo modelo de bloco e a mesma classe de resistência, evidenciando que o mesmo produto gera diferentes impactos ambientais em função dos fornecedores. Este ganho de eficiência é relevante e demonstra o potencial de desmaterialização do setor. As metodologias tradicionais de ACV usualmente não conseguem captar este ganho ambiental devido ao uso de dados secundários. A viabilização de benchmarks setoriais, simplificar o processo de medição para PME, privilegiar a coleta de dados primários dos fluxos diretos das empresas, pode gerar resultados mais representativos do sistema produtivo de uma empresa do que a ACV tradicional.

Porém, para aumentar a eficiência no uso de materiais dentro da indústria da construção é necessário que os vários setores produtivos estejam engajados com políticas ambientais e diretrizes levadas a cabo pela indústria. Para isso o peso de cada setor é uma variável

importante pois caso tenha uma participação baixa de mercado, será difícil induzir mudanças, ou inventariar dados, que sejam do interesse da indústria da construção. Assim, no próximo capítulo será quantificado a participação de cada setor dentro da indústria em termos de massa e energia. Com base na participação de cada setor é importante definir aqueles que são considerados prioritários para coleta de dados, e promover políticas públicas que permitam reduzir a pressão ambiental sobre o uso de recursos e, ao mesmo tempo, manter a capacidade de produzir edifícios e infraestruturas necessárias ao desenvolvimento humano (UNEP, 2020).

3. CONSUMO DE MATERIAIS E INSUMOS ENERGÉTICOS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL BRASILEIRA

O objetivo deste capítulo é quantificar o consumo de insumos minerais e energéticos consumido pela indústria da construção brasileira e identificar os setores com maior contribuição. Esta abordagem leva em consideração os conceitos de “*foreground*” e “*background*” (ILCD, 2012). A capacidade de influência que o setor da construção exerce sobre determinados setores industriais é avaliada pela participação sobre o total produzido que é consumido pela construção. Se a indústria da construção for um cliente importante, esse setor estará mais propenso a introduzir mudanças, inventariar dados, ou até mesmo atender algum tipo de demanda que seja solicitada pelos clientes e associações da indústria. Assim, os setores “*foreground*” são aqueles onde a indústria da construção tem uma participação (ou contribuição) relevante; os setores “*background*” são aqueles onde a construção não desempenha um papel relevante enquanto cliente. A participação de mercado, em termos de massa ou energia, foi estimada com base em dados setoriais brasileiros e relatórios técnicos da indústria para o ano de 2015. Considerou-se que os setores *foreground* são aqueles com participação na indústria da construção de pelo menos 20%.

Neste capítulo, primeiramente, será retratado o panorama geral do consumo de materiais no Brasil, considerando o consumo de minerais não metálicos e metálicos, combustíveis fósseis e biomassa. Esta análise foi conduzida utilizando a base de dados internacional da UNEP. Posteriormente, e focando unicamente nos materiais da construção, será quantificado o consumo total de materiais e a participação de cada setor dentro da indústria da construção. A quantificação setorial de insumos energéticos e materiais irá permitir dividir aqueles que são “*foreground*” e “*background*” e comparar a participação de cada um, pois setores mais importantes em termos de materiais podem não ser os mesmos em termos energéticos.

3.1 Panorama geral de consumo de materiais no Brasil

A Figura 3 representa o consumo de materiais no Brasil entre 1970-2017, para as quatro categorias de materiais. Apesar do aumento do consumo de minerais não metálicos, o padrão brasileiro é atípico, comparado com o resto do mundo (Figura 1– capítulo 2). O consumo de biomassa é muito expressivo, representando 70% do total, enquanto os minerais não metálicos, categoria que mais contribui para o setor da construção, representa apenas 22%. O elevado consumo de biomassa pode ser explicado, pelo menos em parte, pela contribuição da indústria da cana para produção de açúcar e biocombustíveis, produção de alimentos (arroz, soja, milho), e resíduos agrícolas (WEST; SCHANDL, 2013). No entanto a participação de mercado dos não metálicos aumentou de 12 para 22%. Segundo o Roadmap Brasil (SNIC AND ABCP, 2019) a demanda por materiais cimentícios até 2050 é esperado que cresça 45% num cenário de baixa demanda, ou 58% num cenário de alta demanda.

Figura 3: Evolução da extração de recursos naturais no Brasil no período 1970-2017 para as quatro principais categorias de materiais. Adaptado da base de dados CSIRO. Unidade: milhões de toneladas (10⁶t)

Constatou-se que a base de dados apresenta um problema – a partir do ano de 2009 na categoria de minerais não metálicos apresenta um crescimento contínuo e uniforme.

Segundo os dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2019) o consumo de cimento entre 2009-2014 aumentou e, a partir desta data, verifica-se uma redução no consumo cerca de 40% até 2017. Tal cenário apenas seria viável se houvesse uma parcela importante de importação de materiais que compensasse essa quebra. Porém, conforme ilustrado na Figura 4, constata-se que apesar de haver um ganho das importações, ele é muito pequeno e não justifica a diferença na produção de cimento brasileiro. Na realidade, os minerais não metálicos tendem a ser consumidos nas regiões onde são extraídos. Menos de 5% são consumidos fora da região ou país onde são extraídos, como Dubai, Arábia Saudita, ou Singapura (UNEP, 2019b), que são exceções.

Por outro lado, a biomassa e especialmente os minerais metálicos, tem uma contribuição muito relevante nas exportações brasileira. Os minerais metálicos responderam em 2017 por mais de 400 milhões de toneladas exportadas enquanto o consumo doméstico nesta categoria foi inferior a 100 milhões de toneladas. O beneficiamento dos minerais metálicos tem índices de rejeitos elevados o que explica os problemas ambientais e sociais que o Brasil tem passado nos últimos anos com rompimentos de barragens de mineração. Estes rejeitos são os fluxos indiretos do material que, quando é exportado, pode não entrar nos indicadores ambientais dos países que recebem o produto.

Figura 4 Balanço comercial das matérias primas extraídas no Brasil entre 1970-2017 para as quatro categorias de materiais. Valores estimados pela diferença entre importação e exportação. Adaptado da base de dados UNEP. Unidade: milhões de toneladas (10^6t).

Retomando o problema da base de dados da UNEP, para estimar o consumo de materiais não metálicos a partir do ano de 2009 optou-se por recorrer a outro método que utiliza o consumo de cimento como proxy. O cimento é um bom indicador da demanda geral de materiais de construção pois, por um lado, temos dados primários da produção brasileira (SNIC, 2019) e por outro o cimento é o pilar para o consumo de outros materiais, como a cerâmica, areia e brita (ex.: não dá para aplicar peças cerâmicas sem utilizar cimento como ligante). A Figura 5 apresenta a linha de tendência utilizada na estimativa do consumo de minerais não metálicos. Verifica-se que consumo de cimento e materiais utilizados na construção tem aumentado ao longo do tempo devido, pelo menos em parte, para atender a demanda de infraestrutura e habitação brasileira.

Com base na regressão linear encontrada, estimou-se o consumo de minerais não metálicos consumidos na construção. O resultado é apresentado na Figura 6.

Figura 5: Linha de tendência entre 1970-2009 correlacionando o consumo de cimento (dados obtidos no SNIC) e consumo de minerais não metálicos (dados da UNEP) utilizada para estimar o consumo de minerais não metálicos a partir dessa data (2009) até 2017. O cimento entra também no consumo de minerais (eixo vertical).

Figura 6: Consumo de cimento (linha laranja) e minerais não metálicos (área azul) entre 1970-2017 para o Brasil. Unidade: milhões de toneladas (10⁶t). A redução no consumo de cimento e minerais de construção a partir de 2014 foi devido a problemas econômicos e políticos que afetaram o país.

Pela análise da Figura 6 verifica-se que o consumo de cimento representava em 1970 aproximadamente 7% do consumo dos minerais de construção e atualmente representa cerca de 10%. Na prática significa que os materiais cimentícios – concreto, argamassa, pré-fabricados, pré-moldados, entre outros – têm vindo a ganhar cota de mercado em relação aos demais minerais de construção.

O subcapítulo seguinte detalha a metodologia usada na quantificação dos insumos materiais e energéticos consumidos de cada setor na indústria da construção brasileira. Consumo de água não foi incluído. O ano base adotado foi 2015, pois para alguns setores era nesse ano que apresentava dados mais consolidados em relatórios técnicos e informações setoriais.

3.2 Demanda de insumos minerais e energéticos consumidos na indústria da construção civil brasileira

Os minerais não metálicos são a principal categoria de materiais da indústria da construção. Incluem como principais insumos minerais calcário para produção de cimento; areia e brita para produção de materiais cimentícios e juntamente com o asfalto para produção pavimentos; e argila para produção de materiais cerâmicos (KLEEMANN FRITZ et al., 2016). A indústria da construção consome outros materiais, porém em quantidade menores, tais como os combustíveis fósseis como carvão e derivados de petróleo; minerais metálicos como aço, alumínio e cobre; e biomassa usado tanto na construção como combustível.

O método utilizado para estimar o consumo de materiais na indústria da construção foi com base em dados da literatura, dados setoriais e informações fornecidas pelos setores. Alguns setores da categoria dos minerais não metálicos, são propensos a trabalharem no mercado informal e sua produção não é contabilizada nos relatórios estatísticos nem nas matrizes insumo-produto (SCHANDL; WEST, 2010). Para contornar este problema, recorreu-se a uma combinação de dados secundários com alguns dados primários para rastrear o mercado informal ou pequenos estabelecimentos não incluídos nos relatórios formais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

3.2.1 Materiais cimentícios

Os materiais cimentícios englobam produtos compostos como concreto, argamassa, fibrocimento e artefatos (elementos vazados e pré-moldados). Dados primários sobre o consumo de cimento foi obtido no relatório do SNIC (2019), onde foram consumidos 65.315 milhões de toneladas (Mt) em 2015. Segundo o mesmo relatório e informações da indústria aproximadamente 90% do cimento é utilizado para produzir concreto e argamassa. Os demais 10% são consumidos para produzir blocos de concreto, fibrocimento e artefatos.

Para estimar a quantidade de cimento usada na produção de concreto, utilizou-se um método de cálculo com base no consumo de aço (vergalhões e fios para reforço de concreto) e cimento, e seus teores típicos na produção de concreto armado. O consumo de

cimento no concreto dosado em obra foi estimado com base numa faixa provável de teores de cimento, conforme detalhado na Figura 7. Os dados foram coletados em diversas fontes bibliográficas tais como manuais de construção, relatórios técnicos, informações coletadas em obra e vídeos de dosagem encontrados no Youtube. Os dados brutos podem ser consultados no Anexo 2.

Figura 7 Consumo de materiais na dosagem de um metro concreto em obra (kg/m^3): cimento, água, areia e brita. É ilustrado a distribuição da amostragem, bem como a mediana, primeiro quartil, terceiro quartil e valor máximo e mínimo de cada material.

Considerando que os traços são fornecidos em volume as seguintes massas unitárias foram adotadas: $1,25 \text{ kg/dm}^3$ para o cimento; $1,20 \text{ kg/dm}^3$ para a areia, e $1,45 \text{ kg/dm}^3$ para a brita. Segundo a curva de Abrams da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (1995) para corpos de prova cilíndricos a resistência a compressão dos traços concreto varia entre

12-32MPa, com a mediana em 25MPa. Valores compatíveis para concreto dosado em obra onde são observadas resistências mais baixas, usualmente entre 20-25MPa (UNEP, 2017).

De acordo com os relatórios (MME, 2016; WORLDSTEEL, 2016) cerca de 3.448 kt de aço foram consumidos para produzir concreto armado. Estima-se que para produzir um metro cúbico de concreto armado seja necessário entre 80-100kg de aço (ABRÃO; JOHN; ANGULO, 2017) e cerca de 300-400kg de cimento (Figura 7 – consumo cimento). Com base nestas premissas estimou-se que entre 18-29% do cimento é utilizado para produzir concreto armado, como representado na Figura 8.

Figura 8 Market-share do consumo de cimento para produção de concreto armado, baseado em dados de consumo de cimento e aço. Produção de concreto armado estimado em função da taxa de armadura.

A estimativa da fração de cimento consumido para produção de concreto plano (não armado), geralmente com resistência à compressão inferior a 15MPa, se depara com dificuldades na obtenção de dados primários e de sua caracterização. Apesar das elevadas incertezas, sabe-se que o volume de concreto armado no mercado é superior ao do plano. Com base em dados fornecidos pela ABCP estimou-se que a participação de mercado do cimento empregado em elementos não armados seja entre 10-15%. Desta forma, conclui-se que o consumo total de cimento para produção de concretos seja de aproximadamente

35%. Este valor é próximo do obtido no estudo de (MUIGAI; ALEXANDER; MOYO, 2013) para África do Sul onde estima 37% do cimento utilizado na produção de concreto.

Por outro lado, concreto pode ser produzido de forma industrial – concreto usinado e elementos pré-fabricados – onde o processo de dosagem é realizado por especialistas ou dosado no canteiro de obra usando cimento em sacos onde a dosagem é realizada por pessoas não especializadas. Segundo (TANIGUTI, 2015) 19% do cimento é usado para produzir concreto usinado e, deduzindo pelo restante, conclui-se que 16% é destinado para concreto dosado no local/obra.

Para concreto dosado em obra o consumo típico de areia e brita foi obtido através de uma faixa de traços levantados na literatura, conforme Figura 7. Para produção de concreto usinado os traços foram obtidos com base em (TANIGUTI, 2015) e também de acordo com os representantes técnicos da ABCP que foram consultados em algumas reuniões técnicas.

Com base nas formulações obtidas na dosagem de concreto, adotou-se uma densidade típica de 2.400kg/m^3 para concretos dosados em obra e industrializados. Devido ao melhor controle de qualidade e conhecimento técnico sobre dosagem, concreto usinado usualmente consome menos cimento para atingir o mesmo desempenho. Assim foi adotado uma redução de 65kg/m^3 no consumo de cimento para produção industrial, conforme ilustrado na Tabela 1.

O restante da produção para atingir os 90% (SNIC, 2019) estima-se que seja argamassa - responsável por 55% da participação de mercado no consumo de cimento. Semelhante ao concreto a argamassa pode ser dosada no canteiro de obra, ou industrializada. Este último divide-se em argamassa dosada em central (ou estabilizada) ou comercializada em sacos (adicionando água quando for aplicar). De acordo com relatório (BID; CETESB, 2017) estima-se que apenas 2% é industrializado e 53% produzida no canteiro de obra.

O consumo de areia, cimento, cal e filitos para produção de argamassa dosada em obra foram obtidos nos traços levantados na literatura, conforme ilustrado na Figura 9. Para argamassa industrializada o traço típico foi obtido em reuniões com representantes técnicos da Associação Brasileira de Argamassa Industrializada (ABAI) e ABCP. Argamassa

dosada no local foi adotado uma densidade de 2.100kg/m^3 , assumindo 2% de ar incorporado. Argamassas industrializadas foi adotado uma densidade de 1.720kg/m^3 que usualmente contém 20% de ar incorporado. A relação água/materiais secos adotou-se 17% para argamassa dosada em obra e industrializada, que é um valor consistente na literatura Brasileira, usualmente entre 15-20% (CARDOSO; JOHN, 2009).

Figura 9 Consumo de materiais para produzir um metro cúbico de argamassa dosada em obra (kg/m^3): cimento, água, areia e cal.

O consumo total de concreto ou argamassa (em volume) obtém-se pela fração de cimento consumido e o consumo médio por metro cúbico de material, conforme ilustrado na Equação 1.

$$Vp = \frac{Cim_i}{Fcim_i}$$

Equação 1

Onde Vp é o volume de concreto ou argamassa, Cim representa a quantidade total de cimento usado no produto i (em massa), $Fcim$ é a fração de cimento médio consumido por metro cúbico de produto (massa/m³).

A fração de cimento médio consumido por metro cubico de argamassa e concreto dosado em obra ou industrializado foi estimado com base nas dosagens médias obtidas na literatura (Figura 7 e Figura 9) e informações obtidas por responsáveis do setor. Valores adotados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 Consumo de materiais adotado para estimar o consumo total de concreto e argamassa.

Consumo materiais (kg/m ³)	Cimento	Água	Brita	Areia	Cal	Filitos
Concreto – industrializado	285	200	1.150	770	–	–
Concreto – obra	350	200	1.150	700	–	–
Argamassa – industrializada	239	253	–	1.214	14	–
Argamassa – obra	259	310	–	1.442	17	72

Para estimar o consumo total de insumos materiais, é preciso ainda considerar o adicional de agregados que se perdem na recepção e estocagem no canteiro de obra. Apenas se considerou perdas no concreto e argamassa dosados no canteiro obra pois o sistema produtivo industrializado tem processos e instalações próprias de controle de perdas de material.

Um estudo realizado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP, 2003) estimou os resíduos e as perdas em mais de 100 canteiros de obras localizados em diferentes regiões do Brasil, para edifícios residenciais e não residenciais. A Tabela 2 indica os resultados obtidos nesse estudo na recepção e estocagem de agregados, bem como os coeficientes usados neste estudo. As perdas são um parâmetro importante na quantificação da pegada de material, além que afeta a eficiência no uso de recursos. Adicionalmente, na aplicação do concreto ou argamassa, existem ainda as perdas indiretas que corresponde a quantidade de material adicional em relação ao especificado no projeto. No próximo capítulo quatro será detalhada o impacto desta perda na eficiência no uso de material.

Tabela 2 Perda de material na recepção e estocagem de cimento, areia, brita e cal usado na produção de concreto e argamassa. Perda de cimento e cal é indicado para produto ensacado, que a média é perto de zero.

	Material	média %	Mediana %	Min. %	Max. %	Coeficiente usado %	Amostragem
Recepção	Cimento	0,86	0,00	0,00	7,00	0,00	35
	Areia	7,50	8,50	3,00	14,00	8,00	4
	Brita	6,00	-	-	-	6,00	1
	Cal	0,39	0,22	0,00%	1,17	0,00	7
Estocagem	Areia	9,25	8,50	4,00	16,00	8,00	4
	Brita	9,00	-	-	-	8,00	1

Os resíduos na Tabela 2 são importantes para contabilizar o adicional de areia e brita para produzir concreto e argamassa em obra. O consumo total de um produto incluindo a taxa de perda pode ser estimado com base na Equação 2.

$$Mc = \frac{Perda(\%)*Mp}{100} + Mp \quad \text{Equação 2}$$

Onde Mc é o material consumido (kg/m^3) ; a perda (%) pode ser obtida através dos valores indicados na Tabela 2, e Mp é o consumo teórico de material.

O relatório da pesquisa industrial (IBGE, 2015a) não fornece informações contundentes sobre o consumo de agregados pois não inclui no seu inventário o mercado informal nem pequenos estabelecimentos.

Com relação ao fibrocimento, aproximadamente 1,363 Mt de cimento é usado na produção deste produto (SNIC, 2019). O consumo total de fibrocimento foi estimado com base uma composição típica deste produto - 80% cimento, 10% fibras (naturais, sintéticas ou vegetais) e 10% filler (SOUZA; JOHN, 2013).

A estimativa do consumo de areia e brita para produzir artefatos e pré-moldados de cimento foi usado o mesmo traço do concreto usinado (Tabela 1). O consumo destes produtos foi estimado de forma análoga ao concreto, através da Equação 1.

A Tabela 3 sumariza a participação de mercado dos principais produtos à base de cimento de acordo com os métodos descritos anteriormente. A indústria da construção é claramente *foreground* pois é responsável pelo consumo total dos produtos cimentícios.

Tabela 3 *Market share* no uso de cimento e produção de materiais cimentícios para o Brasil e para ano 2015. Unidade de massa 10³t (quilotone – kt).

Tipo de produto	Consumo de cimento (kt)	<i>market-share</i>	Demanda final de produto (kt)
Concreto dosado em obra	10.450	16,0	71.660
Concreto industrializado	12.410	19,0	104.504
Argamassa dosada em obra	34.593	53,0	280.484
Argamassa industrializada	1.330	2,0	9.572
Fibrocimento	1.363	2,1	1.704
Pré-moldados e artefatos	5.169	7,9	43.526
Total	65.315	100	511.450

Com relação aos insumos energéticos, a produção de concreto e argamassa demanda combustíveis fósseis e biomassa maioritariamente na produção de clínquer conforme ilustrado na Tabela 4. Adotou-se 3.550MJ para produzir uma tonelada de clínquer conforme proposto na base de dados do (GNR, 2016). Na cadeia de valor do cimento a produção de clínquer é a atividade de maior intensidade energética (GETTU et al., 2019), representando na Europa, cerca de 95% de toda energia consumida (considerando fronteira cradle-to-gate) (AFKHAMI et al., 2015; JOSA et al., 2004). A produção de areia e brita demanda um consumo de energia de 0,05GJ/t e 0,15GJ/t, respetivamente (TAVARES; LAMBERTS, 2006).

Tabela 4 Demanda de insumos para produzir clínquer (combustíveis fósseis, combustíveis alternativos e biomassa). Quantidade de energia usada obtido no (GNR, 2016). Energia incorporada obtida no: a) (BEN, 2016); b) (KÄÄNTEE et al., 2004); c) (PIPILIKAKI et al., 2005); d) (LAMAS; PALAU; CAMARGO, 2013).

Insumos energéticos	Quantidade (MJ)	%	Energia (MJ kg ⁻¹)	Demanda (kg)
Carvão mineral	16.81	0.47	28.89 ^a	0.58
Óleo combustível	5.57	0.16	40.07 ^a	0.14
Óleo diesel	8.35	0.24	35.50 ^a	0.24
Coque de petróleo	2752.58	77.54	36.43 ^a	75.56
Pneus	216.51	6.10	31.40 ^c	6.90
Resíduos indústria	103.70	2.92	7.10 ^d	14.61
Resíduos fósseis	59.26	1.67	29.00 ^b	2.04
Madeira e outra biomassa	63.46	1.79	12.98 ^a	4.89
Lama de esgoto	0.77	0.02	15.80 ^b	11.94
Resíduos orgânicos e carvão vegetal	323.10	9.10	27.05 ^a	0.05

Relativamente ao transporte, foi adotado o consumo energético de 0,24GJ/t. Este valor foi estabelecido considerando uma distância média de 150km, e consumo energético de 1,6 MJ/t/Km. Estes valores são conservadores, uma vez que os materiais mais consumidos em massa, como areia, cascalho, agregados grossos e cerâmica, têm distâncias mais curtas,

geralmente entre 50-100 km da mineração e processamento até os centros consumidores. No Brasil, o transporte é majoritariamente realizado por caminhão.

3.2.2 Materiais cerâmicos e rochas ornamentais

O setor da cerâmica divide-se em: cerâmica vermelha (tijolos e telhas), cerâmica de revestimento, e cerâmica branca para sanitários. Refratários não foram considerados pois são usados em setores industriais e não na construção civil.

Segundo informações obtidas no anuário estatístico de não metálicos (MME, 2017a) o consumo de cerâmica vermelha foi de 70 bilhões de peças. Dado referente ao ano de 2013, pois dados mais recentes não foram encontrados. Usando a produção de cimento como proxy procedeu-se uma aproximação da produção de cerâmica para ano de 2015. Adotando *market share* de 28% telhas e 71% blocos, e a massa de peça queimada de 2,4kg/telha e 2,0kg/bloco conforme sugerido por (J. MENDO, 2009b), o consumo de cerâmica vermelha é cerca de 136.839kt. Já o consumo de cerâmica de revestimento foi de 846 milhões de metros quadrados (MME, 2018). Adotando massa de peça queimada de 13kg/m² estimou-se o consumo em 10.997kt. O consumo de cerâmica branca (louça sanitária, e excluindo louças de mesa) foi de 330kt.

Segundo Balanço Energético Nacional (BEN, 2016) o setor da cerâmica demandou 4.614kt equivalente de petróleo. Com base na matriz energética estimou-se a demanda de combustíveis fósseis e biomassa na etapa de produção conforme ilustrado Tabela 5. Por ausência de melhores dados, adotou-se os insumos energéticos referente a etapa de transporte igual ao cimento – 0,24GJ/t.

Dividindo o consumo total de energia do setor pela produção de material cerâmica obtém-se o consumo de 1,3Gt/t cerâmica. Segundo Associação Nacional da Indústria da Cerâmica (ANICER) o consumo típico energético brasileiro é de 485.000kcal/t (cerca de 2,03Gj/t), sem incluir transporte. A diferença verificada em relação ao relatório (BEN, 2016) é porque este tende a refletir o mercado formal. Assim, é razoável assumir que o mercado formal representa 64% do setor e informal 36%. Como o mercado informal tende a trabalhar com

insumos energéticos que não permitam auditoria pelo Governo Brasileiro, foi alocado a biomassa como recurso energético até perfazer um consumo de 2,03GJ/t.

O setor da cerâmica é também *foreground* pois a totalidade da produção é absorvida pela construção civil. Para atender a demanda, foram consumidos 148.696kt de materiais cerâmicos, 2.751kt de combustíveis fósseis (manufatura e transporte), 17.682kt de biomassa e 156kt de combustíveis alternativos.

Tabela 5 Demanda de insumos energéticos para produzir cerâmica. Última linha da tabela (madeira) representa a demanda de energia e insumos do setor informal.

Insumos energéticos	10 ³ tep	GJ	Energia incorporada	Unidade	Densidade	Demanda (kt)
Gás natural	1.324	55.433.232	36,84	MJ/cm3	0,74	1.113
Carvão a vapor	62	2.595.816	16,75	MJ/kg	-	155
Lenha	2.312	96.798.816	12,98	MJ/kg	-	7.458
Outros resíduos	59	2.470.212	15,8	MJ/kg	-	156
Óleo diesel	24	1.004.832	35,50	MJ/cm3	0,84	24
Óleo combustível	59	2.470.212	40,07	MJ/kg	-	62
Gás liquefeito de petróleo	173	7.243.164	25,53	MJ/cm3	0,552	157
Outros de petróleo	262	10.969.416	29	MJ/kg	-	378
Eletricidade	339	14.193.252	-	-	-	-
TOTAL	4.614	193.178.952	-	-	-	9.503
t/cerâmica		1,30 GJ/t de cerâmica				
Madeira (setor informal)	-	108.673.787	12,98	MJ/kg	-	8.372

No que toca ao consumo de rochas ornamentais foram produzidos 9.500kt, sendo que o setor da construção foi responsável por 80% do consumo para revestimento de pisos e paredes (internas e externas) (ANPO, 2018a; MME, 2018). O consumo de energia, considerou-se o valor de 1,5GJ/t conforme sugerido por (TAVARES; LAMBERTS, 2006).

3.2.3 Gipsita, cal e filitos

A produção de gipsita foi de 3.300kt (MME, 2018; USGS, 2019). Desse valor, a indústria do cimento consome 1.380kt (GNR, 2016) e o restante será para segmento de calcinação para produção de gesso (1.557kt) e setor agrícola (361kt) estimado com base no relatório

(DNPM, 2016). O relatório do (BID, 2013) informa que foram consumidos 15.000kt de gipsita. Porém optou-se por não considerar este valor pois relatório informa que 5,3kt foram utilizados na indústria do cimento. Valor que não é compatível com dados do (GNR, 2016) que representa 74% da indústria cimenteira Brasileira.

Após calcinação, o gesso é consumido na indústria da construção e na medicina odontológica e ortopédica. Não foram encontrados dados para esses setores. Sabe-se que indústria da construção consome maior parte do gesso em produtos como forros, gesso cartonado etc. Assim adotou-se 80% para indústria da construção (1.050kt) e restantes 20% para medicina (263kt). Valor estimado com base na percepção do autor sobre os setores e pode apresentar alguma imprecisão. Restantes 244kt necessários para fechar o balanço de massa refere-se a perda de CO₂ do processo de calcinação. Quanto aos insumos energéticos foram obtidos pelo Sindugesso, conforme Tabela 6.

Tabela 6 Demanda de insumos energéticos na produção de gesso.

Insumos energéticos	1 t gesso	unidade	densidade	Demanda (kt)	Energia incorporada	unidade	MJ/t
Lenha	204	kg	1	268	12,98	MJ/t	2.648
Óleo combustível	35	kg	1	46	40,07	MJ/t	1.402
Coque de petróleo	45	kg	1	59	36,43	MJ/t	1.639
Gás natural	19	m ³	0,74	18	36,84	MJ/m ³	700
TOTAL (kt)				391			6.390

A produção de cal foi de 8.300kt (USGS, 2019). Desse valor 29% é consumido na indústria da construção para produção de argamassa (MME, 2017a). A produção de cal não é suficiente para atender a demanda total da argamassa produzida no Brasil considerando traços adotados na Tabela 1. Pela diferença da produção de cal alocado para construção e a demanda por esse material na produção de argamassa, estima-se que sejam necessários cerca de 9.558kt de filitos. Apenas argamassa dosada em obra usa filitos, a industrializada não usa esta matéria prima, apenas cal e cimento.

Tem ainda cal que entra na produção de aço. Setor do aço demandou cerca de 1.128kt de cal (IABR, 2018; MME, 2017b). A demanda total de cal pelo setor da construção estima-se em 3.535kt, que corresponde a 43% do setor. Os insumos energéticos foram estimados com

base no relatório (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014), ilustrado na Tabela 7. Em relação aos insumos energéticos para transporte foi adotado o valor de 0,24GJ/t.

Tabela 7 Demanda de insumos energéticos para produzir cal virgem (combustíveis fósseis e biomassa). Estimativas obtidas no relatório (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014). Adotou-se 0,74 kg m⁻³ massa específica para o gás natural obtida no Balanço Energético Nacional (BEN, 2016).

Insumos energéticos	Quantidade (MJ)	%	Energia incorporada (MJ kg ⁻¹)	Demanda (kg)
Coque de petróleo	2718,30	41	36,43	74,62
Gás natural	795,60	12	36,80	16,00
Óleo combustível	132,60	2	40,07	3,30
Biomassa	2850,90	43	12,98	219,64
Moinha	132,60	2	19,43	6,82

3.2.4 Vidro

Produção de vidro divide-se em quatro segmentos – planos, embalagens, especiais e domésticos. O principal setor são os vidros planos, onde o setor da construção tem uma participação entre 60-70%, originando um consumo aproximado de 1.163kt (ABRAVIDRO, 2016; AECWEB, 2016; CNQ, 2015). Segundo relatório de economias de baixo carbono (JUNIOR; PINHO, 2015) a taxa de reciclagem é aproximadamente 10% na produção de vidro plano.

O (BEN, 2016) não disponibiliza a matriz energética deste setor. Porém o principal combustível é o gás natural (ABRAVIDRO, 2016). A demanda de insumos energéticos foram obtidos no relatório (JUNIOR; PINHO, 2015) onde o consumo varia entre 4 a 6Gt/t. A Tabela 8 estima a demanda energética para atender a produção de vidro da construção civil.

Tabela 8 Demanda de gás natural para atender ao mercado do vidro. Considerando energia incorporada de 36,84MJ/cm³ e densidade 0,74. Nota: Produção total é para um ano, enquanto valores da tabela são diários.

Empresa	nº de fornos	90% prod. (t/dia)	% reciclagem	GJ/t	GJ/dia	Demanda (kt)
Vivix - float	1	810	10%	6,41	5206	0,105
Guardian - float	1	540	10%	6,41	3471	0,070
AGC - float	1	540	10%	6,41	3471	0,070
Cebrace - float	1	540	10%	6,41	3471	0,070
Cebrace - float	3	2160	10%	6,41	13884	0,279
Guardian - float	1	747	10%	6,41	4801	0,096
SG glass - impresso	1	162	50%	4,08	657	0,013
UBV - impresso	1	216	40%	4,22	903	0,018
Cebrace - float	1	540	10%	6,41	3471	0,070
TOTAL (ano)					14.357.275	288

Setor da construção demandou cerca de 288kt de combustíveis fósseis (gás natural), 144kt de sucata de vidro para produzir 1.162kt de vidro plano usado na construção. Insumos energéticos para transporte foi adotado o valor de 0,24GJ/t.

3.2.5 Alumínio e aço

A produção interna de alumínio primário foi de 772kt e alumínio secundário (sucata recuperada) foi de 602kt (MME, 2017b). O setor é intensivo no consumo de recursos – para produção de alumínio primário é necessário cerca de 1.476kt de alumina que corresponde uma relação de 1,91 (alumina/alumínio). Por sua vez, para atingir essa produção é necessário 2.096kt de bauxita que corresponde uma relação de 2,72 (bauxita/alumínio).

O setor da construção civil tem uma participação cerca de 15% do consumo total de alumínio no Brasil usado na produção de esquadrias, estruturas, coberturas e revestimentos. Considerando o balanço comercial das importações e exportações estima-se que o consumo de alumínio na indústria da construção seja de 198kt. A demanda de bauxita foi de 302kt e sucata de 87kt. O método de alocação do material reciclado (sucata) foi com base na massa de alumínio consumido pela construção.

A demanda de insumos energéticos utilizados na produção de alumínio foram obtidos no relatório elaborado pela Associação Brasileira de Alumínio (ABAL, 2017). O setor demanda elevada quantidade de energia elétrica e combustíveis fósseis. Para atender a demanda da

construção civil é consumido cerca de 110kt de combustíveis fósseis e 8kt de sucata, conforme ilustrado na Tabela 9.

Tabela 9 Demanda de insumos energéticos para produção do alumínio no Brasil. Os valores apresentados são referentes a totalidade de produção de alumínio primário e secundário. O consumo foi estimado com base no balanço comercial alocando 15% para a indústria da construção.

Insumos energéticos	GJ/t	GJ (total)	Energia incorporada	Unidade	Densidade	Demanda (kg/t)	Total (kt)
1. Mineração de bauxita	0,12	4.446.840	-	-	-	-	-
Energia elétrica	0,083	3.081.660	3,6	MJ/Kwh	-	-	-
Óleo combustível	0,023	867.134	40,07	MJ/cm ³	1	0,58	1,22
GLP	0,012	431.343	25,53	MJ/cm ³	0,552	0,25	0,53
Óleo diesel	0,002	66.703	35,5	MJ/cm ³	0,84	0,04	0,09
2. Refinaria de alumina	7,27	75.717.050	-	-	-	-	-
Óleo combustível	3,89	40.508.622	40,07	MJ/cm ³	1	97,07	143
Carvão mineral	2,69	28.015.309	28,89	MJ/kg	0,0931	8,67	13
Energia elétrica	0,44	4.543.023	3,6	MJ/Kwh	-	-	-
Gás natural	0,25	2.650.097	36,84	MJ/cm ³	0,74	5,11	8
3. Alumínio primário	80,85	62.416.200	-	-	-	-	-
Energia elétrica	53,85	41.569.189	3,6	MJ/Kwh	-	-	-
Óleo combustível	24,01	18.537.611	40,07	MJ/cm ³	1	599,26	463
GLP	2,43	1.872.486	25,53	MJ/cm ³	0,552	52,44	77
Coque de petróleo	0,57	436.913	36,43	MJ/cm ³	1,04	16,16	34
3. Alumínio secundário	4,9	2.920	-	-	-	-	-
Gás natural	3,54	2.132	36,84	MJ/cm ³	0,74	71,13	43
GLP	0,78	467	25,53	MJ/cm ³	0,552	16,78	10
Energia elétrica	0,53	321	3,6	MJ/Kwh	-	-	-
Coque de petróleo							
TOTAL alumínio primário							102
TOTAL alumínio secundário							8

Segundo Instituto de Aço Brasil (IABR) a produção de aço brasileira foi de 33.256kt (primário e secundário). A construção civil tem uma participação no setor de 40% no setor. Tem aplicações na produção de estruturas metálicas, vergalhões, cordoalhas e componentes. O consumo aparente na construção civil estima-se em 9.385kt. Durante o processo de redução e por cada tonelada de aço cerca de 330kg de escória são gerados. Esse material pode ter aproveitamento econômico em outras indústrias, tais como na indústria do cimento onde é utilizado como material cimentício suplementar.

Para produzir uma tonelada de aço, em média, são necessários 546kg de carvão e coque, 1.510kg de minérios e fundente e 335kg de sucata de ferro e aço (IABR, 2018). A produção de uma parte de aço requer cerca de 2.4 partes de matéria prima. Segundo Balanço Energético Nacional (BEN, 2016) o consumo de insumos energéticos para produção de uma tonelada de aço é cerca de 21GJ, conforme Tabela 10. Porém estes valores foram ajustados considerando que uma parte significativa do aço consumido na construção civil provém da rota de forno elétrico consumindo 85% de sucata e 15% ferro gusa, originando um consumo médio de 15GJ/t (já incluído transporte e laminação) (TAVARES; LAMBERTS, 2006).

Tabela 10 Demanda de insumos energéticos para produção do aço no Brasil. Os valores apresentados são referentes a produção.

Insumos energéticos	10 ³ tep	GJ	Energia incorporada	Unidade	Densidade	Demanda (kt)
Gás natural	1.223	51.204.564	36,84	MJ/cm ³	0,74	1.029
Carvão mineral	2.124	88.927.632	28,89	MJ/kg	-	3.078
Óleo diesel	29	1.214.172	35,5	MJ/cm ³	0,84	29
Gás liquefeito de petróleo	25	1.046.700	25,53	MJ/cm ³	0,552	23
Gás de coqueria	1.148	48.064.464	18	MJ/cm ³	0,45	1.202
Coque de carvão mineral	7.441	311.539.788	28,89	MJ/kg	-	10.784
Eletricidade	1.609	67.365.612	5,21	MJ/Kwh	-	-
Carvão vegetal	2.788	116.727.984	28,3	MJ/kg	-	4.125
Alcatrão	135	5.652.180	35,8	MJ/kg	1	158
TOTAL	16.522	691.743.096	36,84	MJ/cm³		20.426
TOTAL (construção)						5.720

3.2.6 Pavimentos asfálticos e sub-base de pavimentos e fundações

Segundo dados da Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (ABEDA) estima-se que o consumo de mistura asfáltica de petróleo é de 2.407kt. Quanto a constituição típica do pavimento usualmente 95% é agregado e 5% é mistura asfáltica de petróleo (DNPM, 2015). Segundo informações do Departamento de Engenharia de Transportes da POLI-USP, estimou-se que dos agregados utilizados na pavimentação 85% é brita e 10% areia. A sub-base de pavimentação tem o dobro da espessura do pavimento asfáltico constituída por brita ou bica-corrida.

Neste setor não existe mercado informal do asfalto, onde a produção e distribuição é realizado pela Petrobras. Ainda na sub-base da pavimentação pode ser utilizado concreto

reciclado, uma técnica também chamada de *down-cycling* (TANIKAWA; HASHIMOTO, 2010). Não foram encontrados dados na literatura do volume usado de concreto reciclado no Brasil.

Com relação a energia não foram encontrados dados primários para quantificar os insumos energéticos do ligante asfáltico. Considerou-se, então, 50GJ/t conforme proposto por (SCHEUER; KEOLEIAN; REPPE, 2003). Parece um valor consistente comparando com Ecoinvent 3.2 onde o consumo de energia de asfalto betuminoso é ~46GJ/t.

Com relação a brita há ainda uma parte que corresponde a *sub-layer* de fundações de edifícios. Segundo o (IBGE, 2015a) a produção de brita foi de 159 milhões de m³. Usando uma densidade típica de 1,45 kg dm⁻³ estima-se um consumo de 231 milhões de toneladas. Até ao momento temos 217 milhões de toneladas (incluí concreto, resíduos, pavimentos, artefatos, pré-fabricados e sub-base de pavimentos). A diferença de massa admite-se que seja para *sub-layer* de fundações, originando um consumo de 14 milhões de toneladas. Os insumos energéticos adotados foram os mesmos de anteriormente (item 3.2.1).

3.2.7 Madeira e celulose

Segundo dados do Anuário Estatístico de Base florestal (FAO, 2017) estima-se que o consumo de madeira roliça industrial, madeira serrada e painéis a base de madeira em 41.762kt (já descontando perdas de serraria). A indústria da construção civil tem uma participação de 84% no setor da madeira serrada, dos quais 61% é proveniente floresta nativa e 39% plantada (SILVA, 2017). Madeira utilizada para combustíveis não foi contabilizada pois são diferentes setores e produtores.

Quanto aos insumos energéticos existe uma faixa de variação grande que depende da eficiência do processo, tipo de madeira, distância de transporte, serraria etc. Para estimativa do consumo energético adotou-se os valores típicos obtidos em (PUNHAGUI, 2014). A autora indica valores médios de 2,5Gt/t de madeira plantada e 9,1Gt/t de madeira nativa.

Quanto ao consumo de celulose para produção de papel utilizado na indústria da construção não foram encontrados dados na literatura. Portanto, foi necessário proceder a uma estimativa considerando o consumo aproximado de papel para produzir embalagens usadas na construção civil. O peso típico de um saco de papel de cimento é de 85 gramas (g) para 25 kg de cimento. Cerca de 70% do cimento brasileiro é comercializado em sacos de papel. Argamassa de mistura seca, gesso e cal foram considerados 100% embalados com papel (estimativa conservadora). Para revestimentos cerâmicos, louças e janelas, foi adotada a gramatura de 330g/m² para embalagem de papelão (DAHLGREN; STRIPPLE, 2016). O consumo de papel consumido no setor da construção foi ~302kt.

No Brasil a produção de papel em 2015 foi de 10.357kt, descontando a variação comercial, o consumo interno foi de 9.165kt (IBÁ, 2017; IRANI, 2018). Significa que a participação da indústria da construção é *background* para este setor contribuindo apenas entre 3 a 4%. Já os insumos energéticos, não foi possível obter dados primários sobre o setor, adotou-se, então, o consumo de 18,5GJ/t (TAVARES; LAMBERTS, 2006).

3.2.8 Cobre, zinco e outros metais

Segundo Anuário Brasileiro de Cobre (ABCOBRE, 2017) foram produzidos 240kt de cobre primário e 120kt de cobre secundário. O setor da construção tem uma participação de 27% no setor do cobre para produção de tubulações, painéis solares e fios elétricos. Considerando o balanço comercial, estima-se que o consumo total de cobre na construção civil seja de 113kt. Em relação aos insumos energéticos, não foram encontrados dados primários e, por este motivo, foi adotado o valor de 65GJ/t (SCHEUER; KEOLEIAN; REPPE, 2003).

A produção de zinco primário foi de 185kt e secundário 46kt (IBRAM, 2012). O setor da construção civil tem uma participação cerca de 11% no setor do zinco o que resulta num consumo de 19kt. Na ausência de dados primários, o consumo energético considerado foi 51 GJ/t (BLEIWAS, 2011).

Outros metais consumidos na construção, embora em pequenas quantidades, são o chumbo, níquel e estanho. O níquel teve uma produção de 89kt e teve uma participação de 0,4kt. O estanho produzido foi 18,9kt e foi consumido 0,65kt; chumbo produzido foi 9,4kt e a construção consumiu apenas 0,036kt. Em termos de insumos energéticos, não foram encontrados dados primários, então considerou-se consumo de energia de 21GJ/t para o chumbo, 146GJ/t para o níquel e 78,6GJ/t para o estanho (RANKIN, 2012).

3.2.9 Termoplásticos, tintas, e dióxido de titânio

A produção brasileira de transformados de plásticos foi de 6.410kt (ABIPLAST, 2016). Descontando a variação comercial de importações/exportações, o setor da construção civil representa 23% do setor com um consumo de 1.594kt. O policloreto de vinila (PVC) é o termoplástico mais consumido na construção civil representando 691kt; enquanto os restantes termoplásticos representam 903kt, incluindo: PP, HDPE, LDPE, LLDPE, PET, PS, EPS, EVA e nylon (PVC INSTITUTE, 2018).

Pela ausência de dados primários sobre o consumo de insumos energéticos, adotou-se, para o PVC 67,9GJ/t e para os demais termoplásticos o valor médio de 78,08GJ/t (ECVM; PLASTICSEUROPE, 2005; PLASTICSEUROPE, 2005).

No que se refere a produção de tintas, segundo Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas (ABRAFIT) foram produzidos 1.318 milhões de litros. O setor da construção tem uma participação de 83% do volume. Adotando uma densidade média de 1,3g/cm³ o consumo de tintas no setor da construção foi de 1.439kt. Quanto ao consumo de insumos energéticos, na ausência de melhores dados, considerou-se 65GJ/t (TAVARES; LAMBERTS, 2006).

Quanto a produção de dióxido de titânio foram consumidos 210kt, e a construção consumiu 109kt, maioritariamente para produção de tintas (J.MENDO, 2010). Quanto aos insumos energéticos não foram contabilizados, pois já foram contabilizados nas tintas, evitando dupla contagem.

3.3 Consumo e participação de mercado de cada setor na indústria da construção

A Figura 10 representa a participação da indústria da construção dentro de cada setor em função da massa, conforme método apresentado anteriormente. Assumimos que os setores *background* são aqueles que a indústria da construção tem uma participação inferior a 20% tais como os setores do zinco, papel, chumbo, estanho, níquel, alumínio e termoplásticos (excluindo o PVC). Para esses setores a indústria da construção não é o principal cliente e serão menos perenes a políticas públicas promovidas pela construção.

Figura 10 Participação em porcentagem da indústria da construção dentro de cada setor dos materiais que consome. Porcentagem em função da massa ou energia.

Por outro lado, a indústria da construção é o principal cliente de 17 setores que, em massa respondem por 99% de todos materiais consumidos na construção. Considerando que as empresas tendem a operar seus processos e atividades de acordo com as necessidades dos principais clientes, os setores onde a construção civil tem participação limitada é mais difícil implementar uma metodologia para medir e reduzir os impactos ambientais. Por exemplo a madeira usada na indústria da construção representa 80% do setor, o papel representa apenas 3%. Assim, a construção civil tem mais capacidade de intervir no setor da madeira, do que na celulose.

A Figura 11 ilustra o consumo de materiais em massa pela indústria da construção. No total, foram consumidos cerca de 812 milhões de toneladas de material, excluindo energéticos e água, originando um consumo per capita de 3,9 toneladas considerando 206 milhões de habitantes (IBGE, 2015b). A fim de evitar dupla contabilização, a esse número não foi incluído 1.380kt de gipsita que entra igualmente na produção de cimento, 1.128kt da cal que entra no setor do aço, e 109kt de dióxido de titânio que entra no setor das tintas. No Anexo 2 é apresentado os dados brutos sobre o consumo total brasileiro e por setor, bem como a participação de mercado de cada um. Apenas estão sendo contabilizado o consumo direto de material. O consumo indireto de material (ou pegada de material) que inclui rejeitos de mineração, estéril, e perdas de manufatura não foram consideradas, por exemplo o minério de ferro na produção de aço, não foi contabilizado.

Figura 11 Participação dos materiais na indústria da construção e a distribuição acumulada (linha azul). Valores em função da massa.

Os setores da areia, brita, cerâmica vermelha e cimento foram responsáveis por 735 milhões de toneladas de material consumidas pela construção que corresponde a mais de 90% dos 23 setores analisados, conforme ilustrado na Figura 11. Por outro lado, os setores do zinco, cobre, chumbo, níquel, estanho, alumínio, cerâmica branca, vidro plano, tintas, plástico, cal, asfalto (apenas ligante), gipsita e rochas ornamentais, respondem por menos de 1 % dentro da indústria da construção. A quantificação do mercado informal dentro de cada setor é importante pois as políticas públicas para promover melhorias ambientais tem dificuldades para penetrar neste mercado, além que tende a funcionar a margem da legislação ambiental aumentando os impactos ambientais e sociais (CHEVALLIER, 2014). Como o mercado informal é mais usual na categoria dos minérios não metálicos, foi estimado a participação de cada um deles na indústria da construção.

Os dados oficiais do (IBGE, 2015a) indicam produção de areia natural cerca de 24 milhões de m³. Considerando uma densidade típica de 1,20kg cm⁻³ obtém-se um consumo de 29 milhões de toneladas. Neste estudo estimamos o consumo de areia em cerca de 302 milhões de toneladas. Dados da ANEPAC estima consumo de areia em 307 milhões de toneladas. A diferença entre os dados obtidos neste estudo e os dados oficiais do (IBGE, 2015a) é cerca de 90%, que corresponde a dimensão do mercado informal ou pequenos estabelecimentos não cobertos pelo IBGE. Por outro lado, os dados da ANEPAC estão muito próximos do obtido neste estudo, a diferença obtida foi de apenas 2%.

Relativamente a brita o (IBGE, 2015a) indica uma produção de ~231 milhões de toneladas. Mesmo valor foi adotado neste estudo. Mercado informal da brita é inexistente pois as empresas necessitam de licenças rígidas para comprar e operar explosivos usados no desmonte do maciço rochoso, além dos processos de beneficiamento são de complexa operação. A ANEPAC estima o consumo de brita em 211 milhões de toneladas, que ficou abaixo dos dados oficiais.

Quanto ao setor do gesso o (IBGE, 2015a) foram produzidos 1.258kt de gipsita. Nossos dados indicam uma produção de 3.300kt. Assim, o mercado informal representa cerca de 60% do setor. Como o mercado informal é significativo o consumo de insumos energético na calcinação é utilizado biomassa que representa cerca de 68% do combustível em massa.

No setor da cerâmica foi utilizado um método diferente para quantificar o mercado informal. Com base no consumo energético típico para produzir uma tonelada de cerâmica, cerca de 2GJ, comparou-se com o quociente entre o consumo de energia estimado pelo (BEN, 2016) e o consumo de cerâmica obtido neste estudo. A diferença obtida foi de 0,83GJ/t representando cerca de 41% que corresponde ao mercado informal.

A produção de cimento e asfalto (apenas ligante) o mercado informal é inexistente. Semelhante aos setores dos minerais metálicos que também tendem a não apresentar mercado informal.

Uma forma de reduzir a informalidade do setor é promover políticas públicas de apoio a produção industrializada de argamassa, concreto e componentes (pré-moldados, blocos etc.) pois é mais fácil controlar a origem dos agregados reduzindo a informalidade. Adicionalmente a industrialização permite, por um lado de reduzir as perdas e consumo de material ao longo do processo produtivo, e por outro incorporar mais facilmente areia artificial produzida com os resíduos de britagem. Também concreto usinado e pré-moldados tem controle resistência evitando o uso de agregados ilegais onde controle granulométrico é menor (REIS; MACK-VERGARA; JOHN, 2019). Processos industriais de produção de materiais cimentícios são mais eficientes do ponto de vista técnico e mais fáceis de controlar do ponto de vista ambiental do que uma produção descentralizada. A areia é o insumo mais consumido na produção de materiais cimentícios. Porém a maior parte é extraída de rios, em processo de baixo custo realizado em equipamentos moveis de difícil controle pelas autoridades ambientais e fiscais. Adicionalmente, na fase de consumo é difícil vincular uma carga ou estoque urbano de areia a sua origem, legal ou ilegal.

A indústria da construção pode manufaturar produtos combinados, por exemplo concreto demanda cimento, areia e brita. A Figura 12 estima a participação de cada produto dentro da indústria da construção, considerando insumos materiais indicados na Figura 11. Concreto e argamassa representam 57% em massa de todos os produtos consumidos na indústria da construção.

Figura 12 Consumo de produtos na indústria da construção. Valores (%) em função da massa.

Para verificar a consistência dos resultados apresentados, comparou-se o consumo de material de uma casa padrão brasileira, do programa “minha casa, minha vida”. A habitação é constituída por uma sala, uma cozinha, um quarto de banho, e três quartos, perfazendo uma área total de 66m². A quantidade de materiais foi obtida em (SILVA et al., 2020). Os resultados são apresentados na Tabela 11 comparando a casa referência que segue uma abordagem *bottom-up* e análise setorial deste estudo que segue uma abordagem *top-down*. Constata-se que a maioria dos setores teve uma variação inferior a 1% que comprova a robustez dos resultados obtidos. Por outro lado, os setores cerâmico e madeireiro tiveram uma variação um pouco maior de 7% e 4%, respetivamente, mas que é aceitável para este tipo de estudos, considerando que a indústria da construção atua em edifícios com outras tipologias e características, e outro tipo de obras como infraestruturas.

Tabela 11 Comparação entre o consumo de materiais no setor da construção (*top-down*) e da casa típica brasileira (*bottom-up*). Asfalto não foi incluído pois é utilizado em outro tipo de obras. Parte da massa de gesso, cal e dióxido de titânio foram descontadas pois já são contabilizados no cimento, aço e tintas, respectivamente, evitando dupla contagem. As unidades são quilograma para casa e quilo tonelada para o setor da construção.

Produto	Análise setorial da construção		Análise da casa referência		Variação em % entre ambos
	Consumo no setor da construção (kt)	% em massa do total	Casa referência (Kg)	% em massa do total	
Cimento	65,315	8.0%	6,548	7.1%	0.9%
Agregados e filitos	542,766	66.6%	59,961	64.8%	1.8%
Cerâmica	148,165	18.2%	23,390	25.3%	7.1%
Tintas	1,439	0.2%	134	0.1%	~0.0%
Cal	2,407	0.3%	911	1.0%	0.7%
Termoplásticos	1,594	0.2%	157	0.2%	~0.0%
Aço	9,385	1.2%	1,124	1.2%	0.1%
Zinco	19	~0.0%	39	0.0%	0.0%
Madeira	33,409	4.1%	112	0.1%	4.0%
Alumínio	198	~0.0%	73	0.1%	0.1%
Cobre e outros metais	114	~0.0%	29	0.0%	~0.0%
Papel, vidro, e outros minerais	9,890	1.2%	–	–	–
Total	814,702		84,484		

Analisando a indústria da construção em termos de insumos energéticos, constata-se que alterando o parâmetro de massa para energia, as prioridades ambientais mudam igualmente, conforme ilustrado na Figura 13. Areia e brita que respondiam por ~60% da massa da indústria da construção, em termos energéticos representam apenas 10%. Os setores mais importantes em termos energéticos são o da cerâmica, cimento, madeira e aço, representando 59%. Estes valores são coerentes com os apresentados por (TAVARES; LAMBERTS, 2006) que realizou uma abordagem *bottom-up* de três habitações unifamiliares onde os setores com maior consumo energético foi o cerâmico, cimento e aço.

Comparando o consumo energético da indústria da construção com o consumo total de energia brasileira (térmica e elétrica) constata-se que a construção representa apenas 12% do total e no setor do transporte apenas 6%, conforme ilustrado na

Tabela 12. Em termos energéticos a construção é considerada *background*, pois não exerce uma participação contundente no consumo de energia brasileiro. Adicionalmente a produção e transmissão de energia elétrica apenas uma rede nacional está disponível e, portanto, a capacidade de influência da indústria é praticamente nula. Na realidade, a

discussão de *foreground* e *background* faz sentido quando existe alternativas no mercado que no caso da rede elétrica não existe, exceto quando as empresas produzem própria energia elétrica. Por outro lado, o consumo de combustíveis dentro de cada um dos setores foi considerado *foreground* porque a eficiência energética é um parâmetro importante e as empresas podem promover estratégias de mitigação de energia. No Anexo 2 é apresentado o consumo energético de cada produto e a participação de mercado da indústria da construção.

Figura 13: Consumo de energia em função das principais categorias de produtos usados na construção civil.

Tabela 12 Participação da indústria da construção no consumo de energia térmica e elétrica brasileira. Consumo total de energia no Brasil e no setor dos transportes obtido no Balanço Energético Nacional.

	Energia elétrica	Energia térmica	Total
Consumo de energia total no Brasil (10 ³ tep)	44.946	215.754	260.700
Apenas no setor industrial (10 ³ tep)	16.902	67.826	84.728
Apenas no setor dos transportes (10 ³ tep)	117	83.768	83.945
Indústria da construção (10 ³ tep)	3.481	27.718	31.200
Participação da indústria da construção no consumo de energia brasileira (%)	8%	13%	12%
Participação da indústria da construção setor do transporte (10 ³ tep)	–	4.744	–
Participação da indústria da construção no consumo de energia para transporte (%)	–	6%	–

Por fim, importa referir que a participação de mercado, consumo de insumos minerais e energéticos tem alguma incerteza associada, sobretudo nos setores com mercado informal como areia, cerâmica e cal. De todo o modo tentou-se contornar estes problemas através de uma pesquisa bibliográfica abrangente e métodos de cálculo que permitissem uma estimativa próxima da realidade. Apesar das incertezas os resultados fornecem informações contundentes sobre os setores mais relevantes da indústria da construção, direcionando políticas públicas e pesquisa para aqueles mais importantes.

3.4 Conclusão do capítulo

Ao diferenciar os setores da construção em função da participação de mercado é possível distinguir aqueles onde a indústria da construção tem maior capacidade de influência. O setor da construção é *foreground* para 80% dos seus clientes representando 99% em massa. Desses setores, pelo elevado consumo de material destaca-se os materiais cimentícios, cerâmicos e pavimentos asfálticos como os principais consumidores de insumos minerais e são setores claramente *foreground* com 100% da cota de mercado. Já o setor de energia a indústria da construção é *background* representando 12% da cota de mercado. Porém dentro de cada setor soluções tecnológicas para aumentar a eficiência energética são importantes pois todas as empresas têm um papel na contribuição da redução dos GEE.

Dentro da categoria de materiais não metálicos, que responde por mais de 90% da indústria da construção, o grau de informalidade é grande, sobretudo no setor da areia e cerâmica. Esta situação pode dificultar a implementação políticas públicas e metodologias para inventariar dados com vista a quantificação dos aspetos ou potenciais impactos ambientais.

Concreto e argamassa, pelo elevado consumo, representam 57% de todos materiais consumidos e são também aqueles que existem maiores incertezas quanto ao fluxo de materiais, principalmente nas etapas de extração e beneficiamento, pois ainda não foi conduzido nenhum estudo integrado para quantificar esses valores numa perspectiva de ciclo de vida. Assim, próximo capítulo irá analisar o fluxo de massas (MFA) para a cadeia

produtiva do concreto e argamassa identificando as etapas e os processos mais relevantes na eficiência do uso de recursos.

4. ANÁLISE DO FLUXO DE MATERIAIS NA PRODUÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

4.1 Contextualização

No Brasil, concreto e argamassa respondem por mais de 50% dos materiais consumidos na construção civil e os impactos ambientais associados são relevantes (MILLER; HORVATH; MONTEIRO, 2018; VOET; OERS; NIKOLIC, 2004). Até ao momento ainda não foi realizado nenhum estudo de MFA para materiais cimentícios no Brasil, embora outros países já o tenham feito, tais como Estados Unidos (KAPUR et al., 2009; LOW, 2005), China (WANG et al., 2016), Irlanda (WOODWARD; DUFFY, 2011), Alemanha (SCHILLER; GRUHLER; ORTLEPP, 2017) e Japão (HASHIMOTO; TANIKAWA; MORIGUCHI, 2007).

Os resíduos de extração e beneficiamento usualmente não são considerados, mas podem gerar impactos ambientais relevante (KRAUSMANN et al., 2017) e problemas antropogênicos locais (YOSHIDA et al., 2017). Nos estudos de MFA citados anteriormente os resíduos de extração e beneficiamento não foram contabilizados, embora tenham sido de forma parcial nos Estados Unidos (KAPUR et al., 2009; LOW, 2005). Adicionalmente, as perdas em obra que podem ocorrer tanto por via direta como entulho, recepção e estocagem de areia e brita, como por perdas indiretas que corresponde ao consumo adicional de materiais em relação ao preconizado no projeto também não foram considerados. As perdas no canteiro de obras de concreto e argamassa podem ser elevadas, como são no Brasil (FORMOSO et al., 2002).

O consumo de água também é relevante na cadeia de valor dos materiais cimentícios de (MACK-VERGARA; JOHN, 2017) e particularmente nas áreas metropolitanas dos países em desenvolvimento (CHEN, 2016), mas geralmente não é incluído em estudos de MFA. A ausência de uma análise integrada que considere a cadeia produtiva e aplicação de concreto e argamassa, contabilizando os cinco parâmetros da ACV-m, limita o entendimento do setor para promover melhorias de eficiência no uso de materiais e redução dos impactos ambientais.

O objetivo deste capítulo é contabilizar e analisar o fluxo de materiais para concreto e argamassa produzido no Brasil no ano 2015. Os seguintes indicadores incluídos foram: i) consumo de matérias primas, ii) resíduos e perdas; iii) consumo de água; iv) consumo de insumos energéticos v) emissões atmosféricas. Foram escolhidos estes indicadores pois fazem parte do escopo de ACV-m e representam as principais preocupações ambientais da sociedade e dos tomadores de decisão do setor da construção (WBCSD, 2016). A estrutura MFA inclui as etapas de extração, produção e construção (*cradle-to-site*), conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 Modelo simplificado do fluxo de massas usado neste estudo que inclui as seguintes etapas: Extração e processamento de recursos naturais, produção de ligantes, produção de cimento, produção de concreto e argamassa, e aplicação no canteiro de obra. Onde (HF) são *hidden flows*, RP são resíduos de processamento, MCS são os materiais cimentícios suplementares. Vários tipos de saída de água foram considerados: Ai é água incorporada, Av é vapor de água, Ad é água descartada e Ae é efluentes de água. Os processos de cor azul referem-se aos processos de uso de água, vermelho combustíveis e CO₂, e laranja perdas e resíduos no canteiro de obra.

A análise do fluxo de materiais inclui recursos minerais tais como calcário, argila, brita e areia; água de diferentes fontes e usos; combustíveis; e materiais cimentícios suplementares que são geralmente resíduos de outras indústrias.

4.2 Metodologia

Com base na Figura 14 os fluxos de materiais foram estimados desde a etapa de extração até ao canteiro de obra utilizando dados encontrados na literatura, banco de dados (ex.: Ecoinvent), visitas técnicas e especialistas da indústria, sendo esses dados complementados com base na experiência do autor sobre o tema. O cálculo do balanço de massas para cada

processo e fluxo de materiais, bem como a representação gráfica dos diagramas de sankey foi utilizado o software STAN (CENCIC; RECHBERGER, 2008).

Água consumida na cura do concreto não foi considerado porque é muito variável – depende do tipo de método utilizado, das condições climáticas e do tipo de elemento. O consumo de materiais nas fases de uso e fim de vida não foram incluídos porque demandam informações sobre a vida útil típica para diferentes tipos de ambiente de uso, o que não está disponível na literatura (ou pelo menos é de difícil estimativa). Os fluxos indiretos nas emissões dióxido de carbono (CO₂) que ocorrem na extração dos combustíveis fósseis não foram contabilizados, nem as emissões devido a produção de energia elétrica. Para simplificação da análise e representação gráfica, as emissões de CO₂ e combustíveis utilizados na extração de matérias-primas e transporte não foram incluídos. Apenas as emissões de CO₂ e poluentes atmosféricos no processo de produção de ligantes (cal e clínquer) foram contabilizadas, além que é a etapa mais intensiva tanto no uso de energia como de emissões de CO₂ (AFKHAMI et al., 2015; HUNTZINGER; EATMON, 2009).

4.2.1 Consumo de recursos minerais e energéticos, e emissões de CO₂

Os traços de concreto e argamassa (industrializado e dosado em obra) foram os mesmos indicados no capítulo 3, Tabela 1. Para a produção de clínquer, os coeficientes foram obtidos através de cálculos estequiométricos de um clínquer típico com 64,6% de óxido de cálcio (CaO), conforme sugerido por (BATTAGIN, 2011; IPCC, 2000). Os SCM usados na substituição do clínquer foram obtidos na base de dados (GNR, 2016).

O uso de aditivos é uma prática comum na produção tanto de argamassa industrializada como concreto usinado (CHEUNG; ROBERTS; LIU, 2017), mas não na produção de concreto e argamassa dosada em obra. Como esses produtos são usados em pequenas quantidades – menos de 0,2% da massa – e têm um processo de produção complexo, sua massa não foi contabilizada nos fluxos de massas; porém seu efeito sobre os produtos cimentícios foi considerado. O uso de dispersantes, amplamente utilizado na produção de concreto usinado, permite uma redução de 10% no consumo de água e 18% o consumo de cimento (CHEUNG; ROBERTS; LIU, 2017). Também os incorporador de ar que permitem a introdução

de pequenas bolhas de ar nas argamassa foram considerados para produção industrial reduzindo a densidade da argamassa usualmente em cerca de 20% (CHEUNG; ROBERTS; LIU, 2017).

A densidade de 2.400 kg m^{-3} foi adotada para concreto usinado e dosado em obra; enquanto para argamassa dosada em obra a densidade de 2.100 kg m^{-3} foi adotado e para argamassa industrializada 1.720 kg m^{-3} . Os dados relativos às emissões de CO_2 foram obtidos em (GNR, 2016). Cerca de 857 kg de CO_2 são emitidos por tonelada de clínquer (emissões brutas). As emissões de SO_2 , NO_x e PM foram obtidas a partir dos relatórios das principais indústrias brasileiras de cimento: (INTERCEMENT, 2015; LAFARGEHOLCIM, 2016; VOTORANTIM, 2015). Os valores médios desses relatórios foram adotados. Por cada tonelada de clínquer são emitidos cerca de: 0,44 kg de SO_2 ; 1,66 kg de NO_x ; 0,07 kg de MP.

Por cada tonelada de cal virgem são emitidas cerca de: 1.381 kg de CO_2 (emissões brutas) (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014), 50 kg de pó dos gases de combustão (*kiln lime dust*), 5kg de SO_2 , 6kg de CO e 6kg de NO_x (EIPPCB; IPTS, 2013; JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014). O consumo de combustíveis para produção de cimento foram utilizados os mesmos valores da Tabela 4, e para produção de cal os valores da Tabela 7 (capítulo 3).

Para quantificar a pegada de material em cada etapa a Equação 3 foi aplicada, onde M_f é a pegada de material, R_p é o consumo primário de recursos, R_s é o consumo de recursos secundários, R_w é o consumo de água, e R_c é o consumo de combustíveis. Unidades de medida em massa.

$$M_f = \sum_i R_p + \sum_i R_s + \sum_i R_w + \sum_i R_c \quad \text{Equação 3}$$

4.2.2 Geração de estéril, rejeitos, resíduos e consumo de água

Duas abordagens foram utilizadas para estimar os *hidden flow* e os rejeitos de beneficiamento do material: coeficientes encontrados na literatura brasileira e internacional; e dados coletados em visitas técnicas realizadas pelo autor e demais integrantes do grupo de pesquisa em três pedreiras de granito, que produzem agregados graúdos e areia artificial; e três pedreiras de extração de areia natural. Não existem dados

primários publicados sobre este tipo de fluxos e, portanto, a incerteza é grande. Os resultados da pesquisa bibliográfica e das visitas técnicas são apresentados no Anexo 3, Tabela 19 e Tabela 20. Para modelar o MFA os coeficientes da Tabela 13 foram utilizados.

Tabela 13 Coeficientes adotados de estéril e rejeitos de mineração. Unidade: t/t de produto.

	Tipo de material	Coeficiente adotado
Estéril	Brita	0,10
	Gipsita	1,00
	Calcário	1,00
	Argila	0,20
	Areia de rio	0,08
	Areia de cava	0,10
Rejeitos	Brita	0,30
	Areia	0,25

A perda na construção pode ser definida como o consumo adicional de material que é consumido a mais do especificado no projeto (FORMOSO et al., 2002). O relatório da FINEP aponta alguns valores negativos, que ocorrem se os elementos construtivos tiverem menos material do que o especificado no projeto, estes não foram incluídos pois se encontram fora de conformidade. Os valores da mediana foram usados para estimar os valores de perda de materiais para concreto e argamassa no canteiro de obra, conforme Tabela 14.

Tabela 14 Perdas na aplicação de concreto e argamassa. Apenas valores positivos foram considerados. Referência: (FINEP, 2003).

Concreto/argamassa	Média (%)	Mediana (%)	Min. (%)	Máx. (%)	Coeficiente usado (%)	Amostragem
Concreto usinado	9,4	9,0	2,0	23,0	9	35
Argamassa dosada obra (total)	92	63	7	288	-	38
Chapisco	45	52	12	72	-	3
Reboco	78	70	12	164	-	7
Revestimento interno	104	102	8	234	-	11
Contrapiso	79	42	8	288	-	7
Alvenaria	110	100	7	247	-	10
Argamassa industrializada (total)	70	36	5	209	-	11
Chapisco	22	-	14	29	-	2
Reboco	13	-	-	-	-	1
Revestimento interno	99	91	5	209	-	4
Contrapiso	42	-	36	47	-	2
Alvenaria	116	-	26	205	-	2
Total argamassa (total)	87	59	5	288	59	49

A perda de argamassa foi adotada o valor de 59%. Não encontramos motivos para separar as perdas de argamassa dosada em obra ou industrializada, pois o desperdício de argamassa

deve-se principalmente à sobre espessura para corrigir problemas geométricos. Portanto, foi utilizada a mesma taxa de perda para ambos os casos. Porém, para a produção de concreto e argamassa dosados em obra, foram adotados resíduos de brita e areia na ordem de 6% e 8%, respectivamente, devido a procedimentos incorretos na entrega e armazenamento (FINEP, 2003). Estes coeficientes são mencionados no capítulo 3 – Tabela 2. Para o concreto usinado 9% de perda foi considerado, além que é um valor consolidado na literatura (FORMOSO et al., 2002; SOUZA, 2005; SOUZA et al., 2004). Cerca de 2% dessa perda, retorna para a central de concreto (VIEIRA; FIGUEIREDO, 2013). Portanto, 7% de perda foi adotado para concreto dosado em obra, considerando que desvios na geometria das peças estruturais ocorrem para ambos os casos – concreto usinado e dosado em obra.

O consumo total de água inclui vapor de água, água incorporada nos produtos, efluentes e descarga. Para o balanço hídrico, a água incorporada na argila é diferente da água incorporada nos agregados. Enquanto que a primeira é água libertada na forma de vapor devido à calcinação, a segunda é a água que é misturada com os agregados, mas pode ser separada a temperatura ambiente. Os dados de consumo de água foram obtidos em (MACK-VERGARA; JOHN, 2017) que apresenta uma revisão do inventário de água ao longo do ciclo de vida da produção do concreto.

4.2.3 Quantificação da eficiência e potencial de desmaterialização

Eficiência no uso de materiais significa utilizar menos recursos para produzir o mesmo produto (ALLWOOD et al., 2013). Segundo (HUYSMAN et al., 2015) o conceito eficiência de recursos pode ser definida em dois níveis. Nível um a eficiência é a razão entre produto útil e os fluxos inventariados e nível dois é a razão entre o efeito pretendido/esperado (benefício) e o impacto ambiental. Portanto, a eficiência de recursos, em termos ambientais, pode ser atingida reduzindo a quantidade de recursos usados num determinado sistema produtivo ou reduzindo o impacto ambiental associado à produção.

Neste trabalho a eficiência foi estimada pela razão entre massa de produto e o consumo total de recursos, conforme Equação 4. Em teoria a eficiência pode variar entre 0 e 1 (ou 0 e 100%), onde valores maiores correspondem a ganho de eficiência. Na prática os extremos

são improváveis pois pelas leis da termodinâmica sempre iremos ter alguma perda, e as empresas sempre produzem produtos.

$$EF = \frac{\sum Rec_{uteis}}{\sum Rec_{totais}} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

Onde: EF é eficiência no uso de recursos (%); Rec_{uteis} é a quantidade de recursos úteis (Kg); Rec_{totais} é a quantidade total de recursos consumidos ou o total de recursos inventariados dentro de um sistema produto. Os recursos úteis e totais incluem recursos primários renováveis e não renováveis, secundários e água. Ar não está incluso na equação.

Adotou-se a quantidade de recursos úteis a quantidade de material necessário num metro cúbico de concreto e argamassa; e os recursos totais o somatório dos fluxos de materiais ao longo da cadeia produtiva necessários para produzir esses produtos – consumo de matéria prima, geração de *hidden flows* e rejeitos, perdas em obra e consumo de água. Os processos de queima de combustíveis não foram contabilizados no cálculo da eficiência, pois o CO₂ não foi considerado como matéria-prima. Apenas as perdas de vapor de água e de CO₂ devido a decomposição do carbonato de cálcio para produção de clínquer (CaCO₃ + calor = CaO + CO₂) foi considerado, pois representa uma perda de material.

Desmaterialização consiste na redução de material para fornecer o mesmo nível de funcionalidade ao usuário. Neste trabalho, o potencial de desmaterialização é usado para comparar o consumo total de material (TMC) usado para produzir concreto e argamassa dosada em obra e industrialização. É expresso como a redução do consumo de materiais comparando com cenário de referência, conforme representado na Equação 5 (WERNICK, 1994).

$$DEM = \left(1 - \frac{\sum Rec_{tot,c1}}{\sum Rec_{tot,b}} \right) \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

Onde: DEM é o potencial de desmaterialização (%); Rec_{tot,c1} é o consumo de recursos totais para o cenário em análise (Kg); Rec_{tot,b} é o consumo de recursos totais para o cenário base ou referência (Kg).

Neste trabalho considerou-se o cenário base os produtos misturados em obra e o cenário em análise os produtos industrializados. O resultado permite quantificar a redução do consumo de material entre os dois processos produtivos.

4.2.4 Quantificação da incerteza

A incerteza foi calculada para cada insumo utilizado para produzir concreto e argamassa considerando a variabilidade na geração de resíduos incluindo estéril, rejeito na etapa de mineração, perdas em obra e fluxos de água. Coeficientes máximos e mínimos foram utilizados para os indicadores de água, estéril e rejeitos. Por outro lado, considerando que temos uma amostragem representativa para as perdas em obra, as incertezas foram estimadas para um intervalo de 95% de confiança para o valor da mediana. Para tal foi utilizado o software de cálculo Minitab 18, conforme ilustrado na Figura 31 e Figura 32 do Anexo 3.

Para apresentação de resultados, este estudo foca no valor da mediana, pois como estamos considerando uma abordagem a nível nacional, é um parâmetro estatístico razoável a ser utilizado. Os dados individuais podem variar entre máximo e mínimo para um determinado fabricante ou construtor, mas numa abordagem nacional os valores tendem a convergir para a média/mediana.

4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Extração e beneficiamento de matérias primas

A Figura 15 ilustra o fluxo de materiais na etapa de mineração e britagem das matérias primas para produzir cimento e agregados, bem como o processo de lavagem para produção de areia. Grande quantidade de matérias-primas e água são consumidos, bem como a geração de estéril e rejeitos durante o processo. A quantidade de matérias-primas usadas para produzir concreto e argamassa é cerca de 5 vezes maior que a argila e calcário para produzir cimento e cal hidratada.

Figura 15 Fluxo de materiais na etapa de extração de matérias primas. Brasil. Unidade de massa: 10^3t

De acordo com as visitas técnicas, a geração de estéril para produção de agregados situa-se entre 80 e 300 $kg\ t^{-1}$. O valor de 100 $kg\ t^{-1}$ foi adotado e é sugerido por (GOODQUARRY, 2005; J. MENDO, 2009a); apenas uma pedra estimou em $\sim 300\ kg\ t^{-1}$. No caso de calcário usado na produção de clínquer foi adotado o valor da mediana de 1.000 $kg\ t^{-1}$. Este valor é elevado porque em algumas regiões, parte do calcário contém veios de dolomita e não pode ser usado na produção de cimento devido ao alto teor de magnésio.

Os finos de pedra gerados durante a produção de brita foram estimados entre 100-310 kg/t . Este material pode ser comercializado como material secundário ou processados através de VSI para produzir areia artificial. Pelo fato de ainda ser uma exceção no Brasil, onde apenas algumas pedreiras em São Paulo produzem areia artificial, foi adotado um valor de rejeito na produção de brita de 300 kg/t .

Estima-se que 80% da areia é dragada de leito de rios e cavas inundadas; 15% extraído de cavas por desmonte hidráulico; e 5% é areia produzida artificialmente a partir de moagem de finos (J.MENDO, 2009a; LUZ; ALMEIDA, 2009). O resíduo de estéril adotado foi de 80 kg

t⁻¹ para areia de rios e lagos e de 100 kg t⁻¹ para areia de cava. Após a extração da areia, é comum remover a fração silto-argilosa e finos indesejáveis. Este processo de lavagem é realizado por hidro ciclones, entre outros equipamentos (GOODQUARRY, 2005). Dados obtidos nas visitas técnicas sugerem que esse processo gera entre 150 e 300 kg t⁻¹ de rejeitos. O valor mediano de 250 kg t⁻¹ foi adotado.

A extração de matéria-prima requer uma quantidade variável de água para o controle de poeira (MACK-VERGARA; JOHN, 2017). Essa água geralmente evapora, mas parte dela pode permanecer como umidade nos agregados. A água é pulverizada por caminhões-pipa ou dispositivos estacionários nas estradas ou em áreas onde a poeira é produzida, e no britador é pulverizado diretamente sobre os materiais. Por esse motivo, foi considerado uma faixa de 1 a 3% de água de controle de poeira incorporada aos fluxos de saída. O consumo de água do processo de desmonte hidráulico adotou-se 20% da massa em relação a extração da areia natural. No entanto, exceto na argamassa industrializada, a areia não é completamente seca e, portanto, permanece como umidade. O teor de umidade típico da areia natural é de 4 a 6% (PETRUCCI, 2005).

Para suprir a demanda brasileira de concreto e argamassa em 2015, foram produzidos cerca de 283 Mt de areia e 99 Mt de brita e outros minerais gerando todo o processo cerca de 131 Mt de estéril e rejeito e 101 Mt de água foram consumidos. Para atender a demanda de cimento e cal foram extraídos cerca de 54 Mt de calcário, 15 Mt de argila e 1 Mt de gipsita. Durante este processo, foram gerados cerca de 59 Mt de estéril e 8Mt de água foram consumidos.

4.3.2 Produção de ligantes e cimento

O clínquer é um material intermediário na produção do cimento obtido a alta temperatura (~1.450°C) majoritariamente a partir de calcário e argila. O clínquer brasileiro é produzido através do processo de fornos rotativos a seco (GNR, 2016). Além disso as argamassas de cimento Portland, também usa cal hidratada como ligante. A Figura 16 representa o fluxo de materiais de produção de clínquer, cimento e cal hidratada.

Figura 16 Fluxo de materiais para produção de clínquer e cal hidratada. Brasil. Unidade de massa: 10³t

Por cada tonelada de calcário apenas 560 kg permanecem no clínquer como CaO e os restantes 440 kg são libertados como CO₂. Nesta etapa, 7% da água quimicamente ligada na argila é libertada em forma de vapor de água. Por esta razão, o fluxo de saída da água é superior ao da entrada, como observado na etapa de produção de clínquer. Há também o uso de água para resfriamento de clínquer, que geralmente vem de uma fonte superficial ou subterrânea e, em alguns casos, da rede pública de abastecimento (IBRAM; ANA, 2013). Os coeficientes adotados para esta atividade variam entre 0,14 e 1,41 l/kg, resultando num valor médio de 19 Mt no uso de água.

Cerca de 61 Mt de cru (calcário + argila) foram consumidos para produzir 40 Mt de clínquer, originando uma relação de cru para clínquer de 1,5. Como a reação química dentro dos fornos de clínquer e cal é complexa, por questão de simplificação, estimamos os componentes do ar para fechar o balanço de massa do sistema, tanto para o clínquer como para a cal virgem.

Por cada tonelada de clínquer aproximadamente 507 kg de CO₂ são emitidos devido à descarbonatação do calcário e os restantes 350 kg de CO₂ são resultantes do processo de combustão. Para a cal virgem são emitidos cerca de 773 kg t⁻¹ de CO₂ devido à calcinação, considerando um fator de emissão médio brasileiro entre o calcário calcítico e dolomítico, e a combustão dos combustíveis é responsável por emitir 608 kg t⁻¹.

O cimento Portland é um ligante hidráulico obtido por moagem de clínquer com pequena porção de sulfato de cálcio (3 a 5%) e, na maioria das vezes, são adicionados SCM, como escória de alto forno, cinza volante e filler de calcário. O uso de SCM no cimento varia, mas, de acordo com a base de dados (GNR, 2016), o índice médio de clínquer/cimento do Brasil em 2015 foi de 68,9%.

De acordo com a participação de mercado do uso de cimento, cerca de 22 Mt de cimento foram usados para produzir concreto, 36 Mt para produzir argamassa e os 6 Mt restantes para outros usos. Parte da gipsita pode ser substituída por fosfogesso (subproduto da indústria de fertilizantes). No Brasil, metade da produção é feita a partir de gipsita natural e a outra metade de fosfogesso (J.MENDO, 2009b). Em relação às pozolanas utilizadas na produção de cimento, elas podem ser naturais, como terras de diatomáceas, resíduos como a sílica da casca de arroz e algumas escórias ácidas de alto forno, ou argilas calcinadas.

Na produção de cimento, o uso da água varia entre 0,02-0,08 l/kg para o controle de poeira na fábrica de cimento, o que gera um valor de consumo de água de cerca de 1,6 Mt. A água também é usada para a produção de SCM. No caso de escória de alto-forno é usada para granulação, o que envolve um resfriamento muito rápido. O uso da água depende do processo, mas os valores dos coeficientes variam entre 0,78 e 1,20 l/kg, resultando aproximadamente em 7,1 Mt de água. Para argila calcinada, a água é liberada devido à calcinação, semelhante ao processo de produção de clínquer. Não encontramos dados sobre a quantidade de argila calcinada usada na produção de cimento no Brasil; portanto, a água usada nesta atividade não foi contabilizada. Admite-se que o consumo de água para os demais SCM seja nulo pois não precisam tratado a base de água para serem usados no cimento ou nos produtos à base de cimento.

4.3.3 Produção de concreto e argamassa

A Figura 17 ilustra o fluxo de materiais de produção de concreto e argamassa. A Figura 18 contabiliza o fluxo total de material na cadeia produtiva. Para concreto e argamassa dosado em obra há geração de resíduos de areia e brita, porém, no cenário industrializado não foram considerados pois as centrais dosadoras usualmente têm processos e instalações próprias de controle de perdas. Durante a aplicação de concreto e argamassa no estado fresco, há perda de material, tanto no cenário industrializado como no dosado em obra. Na fase de construção o valor de 182 Mt de argamassa e 162 Mt de concreto, conforme ilustrado na Figura 17, representam o estoque útil acumulado. O estoque total de material deverá ainda incluir parte das perdas de concreto e argamassa incorporada – perdas indiretas. Esta separação foi feita para permitir estimar a eficiência da cadeia produtiva.

A quantidade de água de mistura depende da formulação adotada, conforme definido anteriormente na Tabela 1 – 310l para argamassa dosada em obra, 253l para argamassa industrializada, 200l para concreto dosado em obra e 180l para concreto usinado. Devido a necessidade de potabilidade deste tipo de água usualmente é obtida da rede pública e uma pequena porcentagem vem integrada nos agregados e filitos como umidade. No caso do concreto usinado tem ainda água da lavagem dos caminhões e pátio gerando cerca de 23 l/t. Concreto e argamassa também usam água para cura que se faz necessário para uma adequada hidratação do cimento. Por ser particularmente difícil de prever o consumo de água na cura do material, não foi contabilizado o consumo de água para esta atividade.

Figura 17 Fluxo de materiais na produção de concreto e argamassa. Unidade de massa: 10^3t

Figura 18 Contabilização total do fluxo de massas de concreto e argamassa. Brasil, 2015. Unidade de massa: 10³t

4.3.4 Consumo total de materiais e taxa metabólica

Os resultados obtidos indicam uma produção aproximada de 176 Mt de concreto e 290 Mt de argamassa em 2015. Para produzir estes produtos, o consumo de material primário (excluindo água, resíduos mineração e hidden flows) é cerca 174 Mt para concreto e 282 Mt para argamassa, totalizando 456 Mt. Deste resultado, cerca de 128 Mt correspondem a perdas diretas no canteiro de obra. Considerando a população brasileira em 206 milhões de pessoas (IBGE, 2015b) obtêm-se uma taxa metabólica de 2,2 t/cap./ano.

O TMC incluindo água, estéril e rejeitos é de aproximadamente 306 Mt para o concreto e 534 Mt para argamassa, totalizando 840 Mt. Este valor é equivalente a uma taxa metabólica total de 4,1 t/capita. O consumo de água representa 183 Mt, estéril 93 Mt, rejeitos 98Mt, e materiais secundários 10 Mt (incluindo escória, fosfogesso e cinzas volantes usadas na produção de cimento). Portanto, por cada tonelada de material fornecido ao canteiro de obras para produzir concreto e argamassa, há um consumo adicional de água, rejeitos, e estéril em torno de 1,8 t. Embora existam incertezas para quantificar tanto a geração de rejeitos e estéril, bem como os fluxos de água, eles apresentam uma parcela em massa significativa e devem ser contabilizados para quantificar apropriadamente a pressão ambiental.

4.3.5 Eficiência no uso de materiais e potencial de desmaterialização

A Figura 19 e Figura 20 ilustram a eficiência no uso de recursos e o potencial de desmaterialização, respectivamente, para produzir 1m³ de concreto e argamassa, dosado em obra ou industrializado. É apresentado a parcela de cada recurso na redução da eficiência quer seja por consumo de água, rejeitos, estéril ou perdas em obra. Na Figura 19, o centro de cada imagem, representa a massa de materiais necessários para produzir 1m³ de produto útil (cor verde), bem como a fração adicional de consumo de recursos (cor vermelha). Esses valores refletem a eficiência do sistema. De forma geral a eficiência é baixa, evidenciando um significativo potencial de melhoria. As incertezas na quantificação da eficiência no uso de recursos são apresentadas de forma detalhada na Tabela 21, Anexo 3. O baixo valor de CO₂ representado a cor roxa é devido ao fato de apenas estar sendo

contabilizado a descarbonatação do calcário e apenas 44% do cimento contém carbonato de cálcio.

Figura 19 Consumo de materiais e estimativa da eficiência (%) para produzir um metro cúbico de concreto (linha superior) e argamassa (inferior), produzido no local (esquerda) ou industrialmente (direita). A produção de argamassa industrial, devido à menor densidade, consome até 20% menos material em volume. As perdas em obra incluem todos os materiais (incluindo água) utilizados nas atividades de mistura de concreto e argamassa e perdas de aplicação nos canteiros de obras. O CO₂ e o vapor de água liberados na calcinação são contabilizados separadamente e representam apenas as perdas de calcário e argila, respectivamente. Emissões de CO₂ e outros poluentes atmosféricos da combustão de combustíveis não estão incluídos. A cor verde no círculo interno representa os materiais úteis em um metro cúbico de produto; a cor vermelha é o consumo adicional de materiais que inclui as perdas em obra (cor laranja), estéril/*hidden flows* (cor cinza), rejeitos de mineração (cor marrom), consumo de água (cor azul) e emissões de CO₂ (cor roxa). Unidade de massa: quilograma (kg).

No caso da argamassa dosado em obra a eficiência foi estimada em 34% (com um intervalo de incerteza de 20-45%), para argamassa industrial foi 37% (incerteza de 24-45%), concreto dosado em obra foi 51% (incerteza 36-61%), e concreto usinado foi 55% (incerteza 41-64%). A principal razão para o concreto ter uma eficiência superior a argamassa é devido a taxa de perda no canteiro de obra: 21-25% no caso da argamassa versus 6-10% para o concreto. Portanto, a redução de perda, um problema no canteiro de obras, tem potencial para aumentar a eficiência e reduzir a pressão ambiental. Ao mesmo tempo, implica uma redução de outros fluxos de materiais que acontecem numa etapa mais a montante do processo, tais como resíduos de pedreira, emissões de CO₂ na produção de clínquer e consumo de água. No entanto, exige melhorias nas obras, que incluem uma grande quantidade de pequenas empresas e famílias construindo suas casas com limitado conhecimento técnico sobre o assunto, inviabilizando ganhos de eficiência.

Em todos os cenários, a quantidade de água consumida diretamente na formulação do produto representa apenas 23 a 27% do uso total de água. A argamassa é significativamente mais intensiva em água do que o concreto, devido à produção de areia que demanda elevados volumes de água durante o processo de lavagem. O controle do uso da água deve considerar a produção de matéria-prima, principalmente a operação de lavagem de agregados. A fração de rejeitos e estéril representa cerca de metade das perdas na produção de concreto e argamassa. A redução desses fluxos pode ser alcançada principalmente desenvolvendo novos produtos a partir de resíduos de pedreiras, tais como areia artificial, e melhorando a tecnologia de extração e processamento nos processos de mineração e britagem.

A industrialização do concreto pouco afeta a eficiência no uso de recursos, representando cerca de 3 e 4% para argamassa e concreto, respectivamente. No entanto, o potencial de industrialização é importante. Primeiro, ajuda a reduzir as emissões de CO₂ de produtos à base de cimento. O concreto preparado industrialmente consome até 18% menos cimento e, portanto, emite 38 kg/m³ menos CO₂ (22 kg de calcinação e 15 kg de combustão) do que dosado no canteiro de obra. A maior eficiência da produção industrial, resultante de

diferenças na dosagem, manifesta-se apesar dos 2% de resíduos adicional de cimento que retornam no caminhão betoneira. A argamassa industrial consome até 8% menos ligantes (cimento e cal), permitindo uma redução nas emissões de CO₂ em 24 kg/m³ (14 kg de calcinação e 10 kg de combustão).

Por outro lado, a industrialização também permite a desmaterialização (Figura 20) da argamassa, estimada em 24%, economizando 1,4 t/m³ de materiais. Isso ocorre principalmente porque a argamassa industrial utiliza incorporadores de ar, reduzindo a densidade do material de 2.100 kg/m³ da argamassa misturada no local para 1.720 kg/m³ da argamassa industrial. Isso permite uma redução na massa do edifício e dos estoques. A industrialização da produção de argamassa também permite reduzir o uso de água em 22%. Além disso, como nenhuma areia é fornecida a granel no local da construção, menos areia é desperdiçada. Portanto, promover o uso de argamassa industrial faz sentido do ponto de vista ambiental. Como a participação no mercado brasileiro de argamassa industrial é muito baixa, apenas 4%, possui um potencial significativo para mitigar a pressão ambiental.

O potencial de desmaterialização do concreto industrial é menor que a argamassa: cerca de 8%, o que corresponde a 360 kg/m³. Considerando que o concreto usinado e dosado em obra tem a mesma densidade (2.400 kg/m³), não há redução da massa de construção. Nesse caso, o principal benefício da industrialização é a mitigação de CO₂ e as perdas de recepção e estoque de material. A participação do mercado brasileiro de concreto usinado é cerca de 60% e dosada no local é de 40%.

A reciclagem no final da vida útil de materiais cimentícios ainda é uma exceção no Brasil, com apenas algumas usinas de reciclagem e, por este motivo, foi negligenciada neste estudo. Considerando uma vida útil média de 50 anos e uma produção de cimento de 10 Mt em 1970 (SNIC, 2013), a quantidade total de resíduos em fim de vida representa, atualmente, ~15% do consumo total.

Figura 20 Consumo de material para produzir um metro cúbico de concreto (em cima) e argamassa (em baixo). As barras verdes se referem aos materiais utilizados no produto final; barras vermelhas representam o consumo de materiais adicionais; barras amarelas representam o potencial de desmaterialização resultante da industrialização do processo. Unidade de massa: os valores sobrepostos nas barras são porcentagens e a escala está em kg.

4.3.6 Políticas Públicas

A demanda brasileira (e de todos os países em desenvolvimento) por materiais cimentícios deve aumentar entre 2014 e 2050 (MONTEIRO; MILLER; HORVATH, 2017). Políticas públicas que promovam o uso mais eficiente de recursos e, ao mesmo tempo, que permitam reduzir a pegada de material são relevantes. Este ponto de vista está alinhado com o relatório da União Europeia “*roadmap for a resource efficient Europe*” e o relatório “*product environmental footprint*” (EUROPEAN COMMISSION, 2011, 2012).

Usualmente nos países em desenvolvimento como Brasil, Índia, e quase toda África, a maioria do consumo de cimento é por saco (MILLER et al., 2018) onde a eficiência de dosagem é baixa. A fração de cimento em saco reduz na medida em que aumenta o PIB do país: desde 85-90% em países como Índia e Nigéria até menos de 10% em países como Canadá e Alemanha (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). Políticas públicas devem promover a transição de cimento em saco para granel, permitindo reduzir consumo de cimento e consequente emissões de CO₂, bem como a redução de resíduos em obra e consumo de recursos. No caso da argamassa pode ainda reduzir a massa do edifício. Governo Chinês promoveu uma medida semelhante ao proibir cimento ensacado nas áreas metropolitanas (NDRC, 2007).

Reciclagem de agregados no final da vida útil é importante para reduzir a pressão sobre materiais primários e promover a economia circular. No Brasil a reciclagem de produtos de construção ainda é insignificante. Uma simples pesquisa na base de dados do Scopus por palavras chave *“recycled coarse aggregates to concrete”* e *“recycled sand to mortar”* indicou 1.984 e 248 estudos, respetivamente. Os resultados obtidos neste estudo mostram que usamos mais areia do que brita, e 80% da areia é para produção de argamassa e apenas 20% para concreto.

A formulação e a produção de materiais cimentícios é intensiva em água tanto para lavagem dos equipamentos, abatimento de poeira, cura e na formulação dos produtos. Porém não foram detectadas políticas públicas para aumentar a eficiência da água no setor que poderia reduzir o stress na rede pública e nos ecossistemas. Algumas empresas desenvolveram ou estão desenvolvendo as suas próprias ações de redução, principalmente focadas no reuso de água.

Por questão de facilidade, as normas e procedimentos estabelecem o uso de água potável na dosagem de concreto e argamassa. No entanto a literatura mostra que é possível produzir com água não potável, inclusive de tratamento de esgoto na própria planta da fabrica evitando as perdas de distribuição e custo de tratamento (KLUS et al., 2017; SHAIKH; INAMDAR, 2016). As centrais de concreto também podem economizar água recolhendo e

reciclando a água de lavagem dos caminhões (DE PAULA; DE OLIVEIRA ILHA; ANDRADE, 2014). Outra possibilidade para reduzir a pressão sobre a rede pública é a coleta da água da chuva realizado através do telhado e pisos pavimentados de centrais e fabricas, permitindo que com simples tratamentos seja usada na produção.

Este estudo também revelou a quantidade de estéril e rejeitos gerados na extração e processamento de materiais, responde por aproximadamente metade das perdas no concreto e argamassa. Melhorar a tecnologia de mineração, reduzindo as perdas na extração quer seja através do desenvolvimento de novos produtos ou aumentando a eficiência reduzindo as perdas. Por outro lado, as informações disponíveis sobre perdas nas etapas de extração e processamento das matérias primas, sobretudo nos minerais não metálicos são escassas, além de ser necessário harmonizar metodologicamente a melhor forma de quantificar estes fluxos (FISHER-KOWALSKI et al., 2011; KRAUSMANN et al., 2017).

A produção industrializada de argamassa, concreto e componentes (pré-moldados, blocos etc.) torna mais fácil controlar a origem da areia reduzindo a informalidade do setor. A extração legal é realizada por empresas formais com tecnologias mais sofisticadas de extração, além de cumprirem com as restrições ambientais e legais originando menor impacto comparando com extração ilegal (MACEDO; FREIRE; AKIMOTO, 2003).

4.4 Conclusão do capítulo

Foi realizada uma análise integrada do fluxo de material da cadeia produtiva de concreto e argamassa brasileira para o ano 2015. O consumo total de material, a taxa metabólica e a eficiência do uso de recursos foram estimadas, para dois cenários: dosado em obra e industrializado.

Para produzir concreto e argamassa, a demanda de recursos naturais foi de 456 Mt, que inclui, respetivamente, cerca de 16 e 112 Mt de perdas em obra, a maioria das quais pode ser evitada utilizando sistemas de produção mais eficientes. A taxa metabólica foi de 2,2 t/capita. O estéril e rejeito representam 93 e 98 Mt, respectivamente, e o consumo de água representa 183 Mt. A quantidade de materiais secundários utilizados é ainda muito pouco,

representando cerca de 10 Mt concentrada na produção de cimento. O consumo total de material foi de 840 Mt, indicando uma taxa metabólica de 4,1 t / capita.

Eficiência no uso de material, indicador de desempenho que mede a proporção de materiais úteis (produto) e o consumo total de material (ou fluxos totais), é baixa: 51-55% para concreto e 34-37% para argamassa. A principal fonte de ineficiência no caso do concreto são os rejeitos e estéril na etapa de mineração, enquanto para argamassa as perdas em obra foi o processo que mais impactou na redução da eficiência.

Promover a industrialização do uso de cimento é uma estratégia desejável, pois permite desmaterializar a construção, reduzindo o consumo de material em 24% para argamassa e 8% em concreto, representando 1,4 e 0,3 t/m³, respectivamente. Também possibilita a redução das emissões de CO₂ ao diminuir a demanda de cimento, em aproximadamente 38 e 24 kg de concreto e argamassa, respectivamente.

5. INDICADORES PARA MEDIR USO DE RECURSOS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

5.1 Contextualização

Comparativamente com outros setores como alumínio, aço, entre outros, os materiais cimentícios usualmente tem baixo impacto ambiental por unidade de material produzido (WIESEN; WIRGES, 2017). O problema é a escala de produção, onde um pequeno impacto ambiental específico resulta em um valor significativo quando multiplicado na grandeza de milhões de toneladas (SCRIVENER, 2014). Reduzir o impacto específico, por exemplo, através da desmaterialização, adequar o tipo de cimento ao uso, reduzir as perdas e os resíduos, em termos práticos pode representar reduções globais significativas.

Recentemente foi proposto aumentar a vida útil do edifício (MILLER, 2020) para reduzir a demanda de recursos naturais. O método parte do pressuposto que aumentar a vida útil reduz a demanda de recursos por novas construções futuras. Contudo há algumas incertezas em relação às necessidades das pessoas numa faixa temporal superior a 50 anos – as especificações do projeto de hoje podem não atender aos requisitos de amanhã. A frequência de eventos climáticos extremos, como aquecimento global, inundações, furacões, tempestades e incêndios, deverá aumentar nas próximas décadas devido ao agravamento das mudanças climáticas (IPCC, 2019). O resultado desses eventos na resiliência de edifícios futuros é incerto, devido a variabilidades climáticas, vulnerabilidade das estruturas, interdependências como fornecimento de serviços, energia, e suprimentos (DAWSON et al., 2018). No entanto, considerando que é possível prolongar a vida útil do edifício, as melhorias na eficiência de recursos apenas serão sentidas em 50 anos que coincide, aproximadamente, quando a população do planeta começa a diminuir (VOLLSET et al., 2020). Soluções alternativas e mais imediatas para reduzir os impactos relacionados ao uso de recursos são desejáveis.

Neste sentido, para promover a eficiência no uso de materiais na indústria da construção é necessário quantificar e integrar o desempenho ambiental nas atividades de decisão do dia-

a-dia das empresas, o que não é viável sem o uso de indicadores que sejam aplicados de forma sistêmica e mensurável (HÁK; JANOUŠKOVÁ; MOLDAN, 2016). Além disso, esses indicadores devem ser adotados por toda a cadeia de valor da construção, uma vez que medidas sistêmicas – integrando projetistas, construtores, fabricantes de materiais e usuários – podem proporcionar melhor desempenho no uso de recursos. Os métodos existentes para avaliar estes aspectos ou impactos ambientais como a ACV não são adequados para utilização em larga escala, onde atualmente a participação de mercado é muito baixa. Apesar de ser uma metodologia robusta, a ACV exige uma coleta grande de dados para a etapa de inventário e, conseqüentemente, as atividades deste processo são demoradas e caras e, muitas vezes, inacessível para pequenas e médias empresas. Adicionalmente como os resíduos inertes e o consumo de recursos minerais usados na construção não são captados de forma contundente pela ACV, estratégias para aumentar a eficiência não se traduzem em ganhos ambientais.

A Figura 21 apresenta o fluxo de materiais na cadeia de valor dos materiais cimentícios a nível global. Constata-se que os recursos naturais extraídos pelo setor são elevados (~42Gt); de tudo o que é extraído apenas metade acaba como recursos úteis (resíduos, *hidden flows* e perdas ao longo de toda a cadeia); um dia todos os produtos serão resíduos (adicional de 29Gt de estoques em 2018).

Reduzir o fluxos de materiais é uma abordagem importante para promover a sustentabilidade e descolamento no uso de recursos (HINTERBERGER; LUKS; SCHMIDT-BLEEK, 1997; UNEP, 2011). Pela análise da Figura 21 estratégias que visem a desmaterialização dos produtos através da redução da massa permite reduzir os fluxos representados em cor verde; a redução dos resíduos através de processos mais eficientes ou desenvolvimento de novos produtos permite reduzir os fluxos representados a vermelho; ou aumentar a taxa de reciclagem através do uso de resíduos ou de materiais renováveis permite aumentar a circularidade (fluxos azuis) e, conseqüentemente, reduzir a demanda por recursos primários não renováveis.

Figura 21 Fluxo de materiais global na produção de materiais cimentícios – concreto, argamassa e outros produtos à base de cimento. Os materiais incluídos no fluxo são minerais não metálicos – calcário, argila, gipsita, filitos, agregados; minerais metálicos – ferro (ou aço depende da etapa). Não estão incluídos combustíveis, ar, aditivos, formas de madeira, e fluxos de água. Calcinação devido a descarbonatação do calcário (cor azul) não é contabilizado como resíduo. Ano base 2018. O fim de vida útil foi estimado em 50 anos e, por este motivo, os fluxos de saída dos estoques são superiores aos fluxos de entrada. *Hidden flows* representado a cor cinza não foi incluído como resíduo porque atualmente não fazem parte da metodologia MFA como Eurostat ou OECD.

Este capítulo propõe um método para quantificar o potencial de descolamento e promover a sustentabilidade no uso de recursos através de três indicadores – intensidade de material e eficiência, taxa de geração de resíduos e circularidade. Os indicadores devem ser fáceis de medir, de simples entendimento e de baixo custo para facilitar o seu uso na indústria. Podem ser aplicados em diferentes produtos, em diferentes etapas do processo produtivo (extração, produção, aplicação), e em diferentes escalas (local, regional, nacional). Estes indicadores também permitem monitorar o progresso em relação aos ODS número 12 (materiais e resíduos). Como os indicadores são fáceis de aplicar e atualizar, eles permitem aos gestores se envolverem em iniciativas de benchmarking, definindo metas ambientais, e medir o progresso para atingir essas metas. A comparabilidade é um parâmetro importante pois permite classificar projetos, construções e setores industriais de acordo com as melhores práticas (KARKKAINEN, 2000). Porém, a maioria das metodologias desenvolvidas para benchmark focam-se sobretudo no desempenho energético e emissões de carbono (GAO; MALKAWI, 2014; PARK et al., 2016) ao nível do edifício; a perspectiva de ciclo de vida incluindo os fluxos indiretos da cadeia de valor, bem como consumo de recursos minerais

e geração de resíduos é, usualmente, relegado para segundo plano, mesmo sendo importantes para atingir as metas dos ODS (OMER; NOGUCHI, 2020).

É importante referir que não se pretende criar uma metodologia universal, mas sim que seja um complemento as metodologias e indicadores que já existem. Por exemplo o uso de aço pode reduzir a pegada de recursos naturais comparativamente ao concreto, mas se usar outro indicador, por exemplo energia ou CO₂, provavelmente o resultado será diferente. Assume-se que a indústria terá de trabalhar com múltiplos indicadores para obter uma visão integrada do potencial de mitigação de cada produto.

5.2 Indicadores para medir uso de recursos na indústria da construção

O objetivo deste capítulo é apresentar um conjunto de indicadores quantificáveis numa métrica comum para todos os materiais e intervenientes do mercado da construção. Para tal é necessário entender o sistema de produção, identificar os parâmetros mais importantes e, sempre que possível, simplificar o procedimento. Os indicadores propostos são baseados na massa, e não são aplicados coeficientes de caracterização usualmente utilizados na ACV para estimar impactos ambientais.

Intensidade de material mede a quantidade de material necessário para produzir um determinado produto considerando toda a sua cadeia de produção – desde extração do recurso até ao consumidor final (RESOURCE PANEL, 2020), com exceção dos *hidden flows* que usualmente não são incluídos (WIEDMANN et al., 2015). O indicador apresenta melhores resultados através da redução da geração de resíduos na cadeia de valor, incluindo perdas no canteiro de obras e da redução da massa do produto (desmaterialização). Por exemplo a fração de resíduos de pedreiras pode ser processada parcialmente e vendida como areia artificial, possibilitando reduzir a intensidade de material por unidade funcional ao transformar parte de um desperdício de mineração em um produto. Promover a reciclagem também pode melhorar este indicador. Por exemplo a substituição de clínquer por filler calcário reduz o consumo de ligante, reduzindo o CO₂ químico além que pode ser produzido com calcário que não atende aos requisitos estritos

de composição química do clínquer reduzindo os resíduos. A desmaterialização – redução de material usado para fornecer o mesmo serviço ou produto (OECD, 2007), também melhora a performance deste indicador. Por exemplo, verificou-se que a massa de blocos de concreto brasileiros para a mesma classe de resistência e dimensões varia 15% (OLIVEIRA; PACCA; JOHN, 2016); ou o novo edifício do CICS-USP apenas variando o sistema estrutural da laje é possível uma redução no consumo de concreto de 43m³ passando de uma laje pré-fabricada para laje em “T”.

Apesar de diferentes definições existentes na literatura sobre resíduos, considerou-se neste trabalho qualquer material gerado que não seja o objetivo econômico processo produtivo da empresa (WEIDEMA, 2003). Porém, o problema do resíduo não é apenas o resultado do uso ineficiente dos recursos naturais ou o fim de vida do produto, mas o descarte por si só representa um problema urbano dispendioso financeiramente, traduzindo-se em impactos econômicos e sociais. Os resíduos de construção são uma fração significativa dos resíduos urbanos e representam um problema para muitas autoridades locais. São necessárias políticas públicas e medidas práticas a nível da indústria. Portanto, incluir um indicador de geração de resíduos para a indústria da construção parece relevante. Adicionalmente tanto os resíduos como a intensidade de materiais constituem dois dos cinco indicadores mínimos da metodologia de ACV-m.

A utilização de materiais renováveis ou secundários (reuso ou reciclagem) e em fim de vida útil também são uma opção para reduzir a demanda por recursos naturais. Isso pode ser medido pelo indicador de circularidade. No entanto, como a fase de uso da indústria da construção é muito longa os materiais permanecerão em estoque por décadas antes que seja possível proceder a sua reciclagem no final da vida útil. Considerando que mais minerais serão necessários no futuro, a disponibilidade de resíduos em fim de vida útil poderá não ser suficiente para atender a demanda (BLEISCHWITZ, 2020).

Os três indicadores mencionados devem ser multiescala, ou seja, podem ser utilizados ao nível dos edifícios, dos fornecedores, de uma cidade, ou globalmente. Num modelo ideal, aplicando os três indicadores, teremos uma baixa massa da construção, uma elevada

circularidade, e poucos resíduos. Seguidamente será detalhado o escopo de inventário dos fluxos de materiais e o método de cálculo para cada indicador. Posteriormente os indicadores são testados para a indústria cimenteira; porém sua aplicabilidade deverá funcionar corretamente nos demais setores da construção.

5.2.1 Escopo para inventário do fluxo de materiais

É proposto o seguinte escopo para o inventário de recursos de materiais.

- Fluxos diretos e indiretos de materiais estão incluídos;
- Materiais primários e secundários estão incluídos;
- *Hidden flows* e CO₂ devido a queima de combustíveis fósseis não estão incluídos. Adicionalmente, CO₂ já é contabilizado em outro indicador da ACV-m;
- Perda de material pela decomposição de calcário nos fornos está incluída (redução da massa), porém o CO₂ é contabilizado em outro indicador;
- Insumos energéticos e aditivos não incluídos;
- Fluxos de água não incluídos pois já são contabilizados em outro indicador dentro da metodologia ACV-m;
- Formas e embalagem (sacos de cimento e argamassa) não estão incluídas.

5.2.2 Intensidade e eficiência de material

A eficiência de recursos permite fazer mais com menos incluindo aumentar a produtividade e minimizar a intensidade de material (RESOURCE PANEL, 2020). Para promover a desmaterialização é essencial avaliar o consumo de material de cada produto e comparar o desempenho com os diversos produtores. A intensidade de material, definida pela Equação 6, é um indicador primário de uso de recursos e mede a quantidade total de insumos minerais necessários para produzir uma unidade funcional. Pode ser decomposto em material primário e secundário. Este indicador já é utilizado na indústria cimenteira para

estimar a intensidade de ligante (ou de cimento) de concreto usinado, onde o consumo de cimento por unidade funcional varia entre 5-15 kg.m⁻³. MPa⁻¹ (DAMINELLI et al., 2010).

Por outro lado, a eficiência no uso do cimento, que representa o inverso da intensidade de material, definido pela Equação 7, varia entre 0,06-0,2 MPa.Kg⁻¹.m⁻³. Esta abordagem é igual ao capítulo anterior (capítulo 4) utilizada para quantificar a eficiência média para 1m³ de concreto e argamassa – Figura 19. Dependendo do caso, a eficiência de materiais pode ser mais interessante para expressar o benchmark que intensidade de materiais.

$$IM = \frac{\sum_i M_p + \sum_i M_s}{UF} \quad \text{Equação 6}$$

$$EM = \frac{1}{IM} \quad \text{Equação 7}$$

Onde: IM é intensidade de materiais (massa ou volume/UF); Mp é a quantidade de materiais primários no produto i (massa ou volume); Ms é a quantidade de materiais secundários no produto i (massa ou volume); EM é a eficiência de materiais; UF é a unidade funcional.

Por ser um indicador multiescala a unidade funcional pode variar em diferentes etapas da cadeia de valor ou mesmo entre diferentes produtos. O conceito está embasado na literatura internacional sobre MFA deixando a unidade funcional aberta (m², m³, kg etc.) para melhor representar cada situação e aplicação. Na ótica do material (ou fabricante) equivale ao consumo de material no processo produtivo. Para produção de concreto e argamassa o indicador de intensidade de material pode ser kg/m³, para um bloco de concreto kg/bloco, para o aço é kg/kg. Na ótica do construtor, a intensidade de materiais tem como meta principal reduzir a massa do edifício e, portanto, o indicador pode ser expresso em kg/m². O mesmo indicador pode ser utilizado a nível do projeto para quantificar a intensidade de material (m³/m²).

Apesar dos resultados serem expressos em diferentes unidades o objetivo é o mesmo - reduzir o fluxo de massa do produto e do edifício. Somando a intensidade do material na etapa de construção e a etapa de produção é possível usar uma unidade universal como kg/m², obtendo-se um valor agregado (ou demanda acumulada de material) que representa toda a cadeia produtiva. Algo semelhante ao conceito de consumo acumulado de energia

(*Cumulative Energy Demand* – CED). Por outro lado, ao separar em dois tipos de benchmark (direto e indireto) permite identificar se as soluções construtivas que desmaterializam não apenas a construção, mas toda a cadeia produtiva. Ou seja, posso utilizar sistemas construtivos com menor massa na construção (por exemplo alumínio ou aço), mas que sejam mais intensos no consumo de recursos na fase de produção. Neste caso poderíamos desmaterializar a construção, sem desmaterializar a economia. O uso de materiais secundários e renováveis pode reduzir a demanda de recursos naturais e neste estudo são contabilizados no indicador de circularidade, conforme explicado item seguinte.

5.2.3 Circularidade

Circularidade é definido neste trabalho como a fração de materiais secundários ou renováveis que entram na massa do produto (Equação 8). Para evitar inflar a circularidade com processamento de resíduos com baixo rendimento, optou-se por considerar apenas uso direto dos materiais. Ou seja, a eficiência no processo de reciclagem não é contabilizada.

$$CI = \frac{\sum Rec_{sec} + \sum Rec_{pri,ren}}{\sum Rec_{pri,ren} + \sum Rec_{pri,nren} + \sum Rec_{sec}} \times 100 \quad \text{Equação 8}$$

Onde: CI representa a circularidade (%); $Rec_{pri,ren}$ é o consumo de recursos primários renováveis (massa); $Rec_{pri,nren}$ é o consumo de recursos primários não renováveis (massa); Rec_{sec} é o consumo de recursos secundários (massa). Os valores podem variar de 0 a 1 (ou 0 a 100%). Valores mais elevados representam maior taxa de circularidade.

A circularidade evidencia a quantidade de resíduos ou recursos renováveis incorporados nos produtos, por exemplo, agregados reciclados, cinzas volantes, escórias etc. incorporados no cimento ou concreto. Apenas resíduos de pós consumo ou de outras cadeias industriais ou setores podem ser contabilizados, ou seja, reciclagem interna não é contabilizada. Essa regra evita incentivos que promovam a ineficiência do processo de produção. De acordo com a norma europeia (VDI 4800, 2016), os recursos renováveis devem ser provenientes de fonte sustentável. No entanto, esta questão está mais

relacionada à biomassa, onde a taxa de extração deve ser compatível com a taxa de crescimento da planta.

Por outro lado, a reciclagem sem critérios pode reduzir a performance do material (ZINK; GEYER; STARTZ, 2018). Por exemplo uso de agregados reciclado na produção de concreto, pela alta porosidade e heterogeneidade, pode implicar num aumento da quantidade de cimento para produzir o mesmo desempenho (DE JUAN; GUTIÉRREZ, 2009; SAGOE-CRENTSIL; BROWN; TAYLOR, 2001). Porém, como estamos a trabalhar com três indicadores para medir uso de recursos, a perda de desempenho seria capturada pela eficiência de recursos ou, no caso de elevar a pegada de CO₂ ou energia, a metodologia ACV-m já possui indicadores próprios para captar estes aspetos ambientais.

5.2.4 Taxa de geração de resíduos

De acordo com a terminologia adotada, este indicador é medido pela razão entre resíduo gerado e a massa do produto, conforme Equação 8. Taxas mais baixas representam menor geração de resíduos, e valor 0 representa nenhuma geração de resíduo.

$$GR = \frac{\sum_i Res_i}{UF} \quad \text{Equação 9}$$

Onde GR é a taxa de geração de resíduos (massa/UF) tanto para fluxos diretos como indiretos; Res é a quantidade de resíduo gerado no produto i (massa); UF é a unidade funcional.

Os RCD podem ser divididos em três tipos, que seguem o ciclo de vida dos materiais: i) resíduos de mineração que incluem *hidden flows* e rejeitos; ii) resíduos de pós-uso que inclui manutenção e demolição; iii) resíduos industriais que inclui produção de materiais para uso na construção e resíduos das atividades construtivas.

A terminologia adotada é diferente da norma europeia (EN 15804, 2015), que considera se o material tem demanda econômica e de mercado deixa de ser resíduo. No entanto, isso pode mudar com o local e tempo, dificultando a aplicação do indicador. Por exemplo, em algumas regiões do Brasil, a escória de alto forno costumava ser um escasso material secundário para utilização no cimento. Ao mesmo tempo, em outras regiões, a indústria estava acumulando pilhas de escória de alto forno sem uso. Um fabricante não se dispõe a

ampliar sua fábrica para atender um crescimento da demanda por um resíduo. Por esse motivo, os coprodutos como escória, cinzas volantes são considerados resíduos. No entanto, seus ganhos ambientais já são contabilizados na circularidade (ver item 5.2.3).

Por serem difíceis de medir e para facilitar o uso da metodologia, optou-se por não incluir o estéril de mineração (*hidden flows*) que, no caso de concreto e argamassa representam cerca de 25% das perdas (ver item 4.3.5). Adicionalmente pela metodologia de MFA os *hidden flows* podem ser desconsiderados pois não entram na contabilização dos fluxos de materiais (EUROSTAT, 2018). De todo o modo, como ACV-m é evolutiva, estes fluxos podem vir a ser incluídos numa etapa posterior, ou mesmo utilizando dados secundários. Outros setores como a madeira o estéril dos processos extrativos atinge valores mais elevados, na ordem de 2t/t de madeira, além do CO₂ gerado decomposição destes fluxos é relevante (NUMAZAWA et al., 2017). Na etapa de aplicação (construção) este indicador apenas mede a geração de resíduo, não contabilizando as perdas que já são contabilizadas no indicador de intensidade de material.

5.3 Aplicação prática dos indicadores

5.3.1 Intensidade de material no consumo de concreto

A Figura 22 representa um benchmark relativo à intensidade de materiais na aplicação de concreto estrutural de vários edifícios não residenciais. A dispersão varia num fator de 4 (0,2 e 0,8 m³/m²) no consumo de concreto estrutural, sem incluir fundações do edifício. Apenas os fluxos diretos estão sendo contabilizados ao nível da construção, não sabemos a intensidade dos fornecedores. A redução do indicador promove a desmaterialização da construção, considerando que por metro quadrado o consumo de concreto é menor e, consequentemente permite reduzir os estoques. Como o concreto está sendo medido em metros cúbicos, neste caso, não é sensível a variação de densidade.

Figura 22 Benchmark na intensidade do uso do concreto para edifícios não residenciais. Apenas os fluxos diretos estão incluídos. Para o mesmo serviço, diferentes consumos. Pontos amarelos foram adaptados de (BCA, 2012). Os pontos vermelhos são duas soluções estruturais do novo edifício CICS - viga + laje ou laje “T”. Em ambos os casos não foi contabilizado o concreto usado nas fundações.

A principal vantagem ao separar o setor de construção e a produção de materiais é a possibilidade de escolha com base em critérios ambientais - as empresas de construção podem escolher entre diferentes fabricantes para o mesmo produto; o consumidor final (ou o cliente) pode escolher entre diferentes apartamentos, habitações, escritórios. Até o momento, não há metodologia disponível para quantificar de forma sistemática esses ganhos ambientais. A metodologia da ACV usualmente é utilizada para comparar diferentes materiais de construção (concreto versus madeira, telha cerâmica versus telha de concreto etc. (MAIA DE SOUZA et al., 2016; SOUZA et al., 2015)). A dispersão dentro da indústria considerando a mesma rota tecnológica é, frequentemente, ignorada.

Reduções adicionais na intensidade de materiais são possíveis recorrendo a tecnologias emergentes e conceitos de projeto, tais como, desmaterialização utilizando materiais de gradação funcional (DIAS; SAVASTANO JR.; JOHN, 2010; STROMBERG et al., 2011), ou topologia e otimização de forma (LOWKE et al., 2018), aumento da reatividade do cimento que permite reduzir o consumo de ligante (REIS et al., 2020), utilização de concreto de alta resistência possibilitando uma maior carga por unidade de área reduzindo o consumo para

atingir o mesmo desempenho (HABERT et al., 2012). Utilizando o indicador de intensidade ou eficiência de material e adequando a unidade funcional para cada produto é expectável identificar os ganhos ambientais de cada uma dessas tecnologias.

A Figura 23 estima a intensidade de materiais na produção de concreto. Foi elaborado com base nos dados da tese do Bruno Damineli (2013) e foram incluídas referências adicionais numa pesquisa realizada pelo autor no Scopus Elsevier. A intensidade de materiais foi estimada com base na dosagem do concreto, considerando o uso direto e indireto de material em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Apesar da variabilidade a intensidade tende a aumentar com a resistência devido ao aumento do ligante (maioritariamente clínquer), mas que por outro lado permite reduzir a demanda de agregados e cimento na estrutura, por exemplo utilizando UHPC. A variabilidade apenas reflete a variação nos traços (fluxos diretos), uma vez que os fluxos indiretos foram utilizados com coeficientes médios do MFA do capítulo 4 e não representam a variabilidade entre produtores das matérias primas.

Figura 23 Intensidade de material e resistência a compressão do concreto. Fluxos diretos e indiretos incluídos. Os fluxos indiretos, que inclui os rejeitos, foram estimados com base nos coeficientes do MFA do cimento (capítulo 4).

O desempenho do concreto pode ser avaliado com base em dois indicadores conhecidos na literatura - intensidade de ligante (B_i) e carbono (C_i) – que avalia a eficiência e o impacto

ambiental dos cimentos e correlaciona-os com a resistência a compressão. Utilizando o mesmo conceito na intensidade de material do concreto ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$) e correlacionando com intensidade de carbono (ilustrado na Figura 24), constata-se uma ligeira tendência de concretos com maior intensidade de material levarem a maiores emissões de CO_2 . Contudo, a dispersão é muito significativa indicando que estratégias utilizadas para reduzir a pegada de carbono na produção de cimento, tais como cimentos com SCM, podem originar concretos com maior pegada de material. Este resultado corrobora a necessidade de a indústria trabalhar com múltiplos indicadores para se obter uma percepção contundente dos vários aspectos ambientais.

Figura 24 Comparação entre a intensidade de materiais e intensidade de carbono no desempenho do concreto. O CO_2 do concreto foi estimado considerando os seguintes fatores (kg/t): 866 para clínquer, 38 para escória, 82 para cinza volante, 5 para sílica e filler, 1,5 para a brita, 11,8 para areia, 2,3 para agregados reciclados. Estes fatores representam a realidade brasileira e foram obtidos em (MILLER et al., 2018) para os SCM e clínquer, e (ROSSI, 2013; ROSSI; SALES, 2014; SOUZA, 2012) para os agregados. As emissões dos aditivos e energia elétrica (moagem e mistura do concreto) não foram incluídos. A intensidade de material foi obtida apenas dividindo os valores da Figura 23 pela resistência a compressão do concreto.

Por outro lado comparando a intensidade de material ($\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{MPa})$) para fornecer 1MPa de resistência a compressão, conforme ilustrado no benchmark da Figura 25, verifica-se que concretos com maior resistência apresentam menor intensidade de material. Foram

incluindo consumo de matérias diretos na produção de concreto e os indiretos desde as etapas de extração de material. Mesmo aumentando o teor de cimento para produzir concretos de maior resistência onde o teor de clínquer é maior (conforme Figura 23), o balanço final no desempenho estrutural é interessante do ponto de vista ambiental reduzindo a demanda de agregados e cimento na estrutura. É interessante observar que a dispersão é relativamente baixa, apresentando um coeficiente de determinação (R^2) de 0,98.

Figura 25 Influência da resistência a compressão do concreto na intensidade de recursos. Concretos de mais alta resistência reduzem a intensidade de recursos. As linhas roxas representam concretos com o mesmo consumo de recursos em kg/m^3 .

5.3.2 Circularidade no concreto

O conceito de circularidade tem sido valorizado em diversas políticas públicas, acadêmicas e até líderes da indústria. O conceito de economia circular promove o uso de produtos orientados a serviços, em vez do modelo linear orientado à produção-uso-descarte (take-make-dispose), que leva à escassez de recursos, acumulação de resíduos e problemas

ambientais associados (BOCKEN et al., 2017). Considerando que os resíduos de construção e demolição constituem uma grande fração de todos os resíduos gerados (GÁLVEZ-MARTOS et al., 2018), a circularidade desempenha um papel importante para por um lado reduzir a pressão sobre os recursos primários substituindo-os por materiais secundários ou renováveis, e por outro reduzir os impactos ambientais relacionados ao descarte de resíduos.

A nível mundial o índice de circularidade é de apenas 6% (HAAS et al., 2015). O baixo índice é sobretudo devido ao elevado estoque dos materiais de construção que leva décadas até que os materiais estejam disponíveis para reciclagem. O índice de reciclagem é igualmente baixo, com uma média global 30%, além que os insumos energéticos como queima dos combustíveis nunca ficam disponíveis para reciclagem.

Analisando o conceito de circularidade e aplicando a Equação 8 ao prévio benchmark de concreto, o resultado é ilustrado na Figura 26. É possível observar que o valor mediano da circularidade é baixo - entre 5 a 10%, com um valor máximo de 55%. Em teoria, poderia ser maior. Mais importante é o impacto que a circularidade exerce no desempenho do concreto – circularidade média diminui à medida que a resistência à compressão aumenta. Circularidade com valores mais elevados ficam abaixo de 50MPa, onde está localizada a maior parte da produção de concreto. Os resultados evidenciam que o aumento da circularidade ajuda a economizar recursos naturais, mas, como contrapartida, aumenta a intensidade do material pois resistências mais baixas mais recursos são consumidos por metro quadrado (PACHECO et al., 2016) e, conseqüentemente, aumenta os resíduos de construção a longo prazo.

A circularidade traz outros problemas. No caso de agregados reciclados, processos sofisticados para remover a pasta de cimento são eficazes para aumentar a resistência, mas em contrapartida tem baixa taxa de reciclagem gerando em média 40 a 60% de finos que não tem mercado e a maioria deles aumenta drasticamente as emissões de CO₂ em comparação com os agregados naturais (ANGULO et al., 2010; QUATTRONE; ANGULO; JOHN, 2014).

Figura 26 Benchmark da influência da circularidade na performance do concreto.

Alguns setores como alumínio ou o aço, o uso de materiais reciclados pode ser utilizado no mesmo produto sem ou com pouca perda no desempenho. O aço utilizado na construção civil provém maioritariamente de forno de arco elétrico utilizando ~85% de sucata (OLIVEIRA; PUNHAGUI; JOHN, 2016). Por outro lado, o uso de resíduos de construção e demolição aparenta reduzir o desempenho do concreto. Deste modo, é necessário encontrar aplicações onde o uso destes resíduos não afete negativamente o desempenho, mesmo que seja em outros setores (*open-loop*).

Uma possibilidade é usar esses materiais em *downcycling*. Existem várias aplicações tais como sub-base de fundações de edifícios que consomem cerca de 5 a 10% de material em comparação com o peso da estrutura (MIATTO et al., 2017), utilizar como base/sub-base de pavimentação que tem uma participação de 10-15% do consumo de agregados (ver item 3.2.6), ou em sistemas de drenagem, regularização de solos, gabiões, entre outros. Existe

mercado para utilizar estes resíduos evitando seu uso direto no concreto ou argamassa. Apesar de algumas críticas ao *downcycling* argumentando que se está reduzindo a qualidade do produto, o importante é reduzir os fluxos de materiais independentemente no setor onde ocorram. Se o material não for usado em aplicações de *downcycling*, muito provavelmente agregados naturais serão consumidos para atender essa demanda. Adicionalmente, o uso de agregados em *downcycling* é mais fácil e mais barato de produzir (até 50% menos) porque não utiliza britador para fragmentação do material, apenas realiza o peneiramento mas que é suficiente para remover os contaminantes e separar os RCD em dois produtos de acordo com a granulometria - brita graduada e rachão (GOLDEMBERG; AGOPYAN; JOHN, 2012; HAMASSAKI; OLIVEIRA; ÂNGULO, 2014). Adicionalmente, promover a circularidade evita outros problemas relacionados ao disposição ilegal de resíduos, prática comum nos países em desenvolvimento com graves problemas sociais e ambientais (BRASILEIRO; MATOS, 2015). Em condições excepcionais, tais como regiões onde existe escassez de areia natural, produzir areia usando resíduos pode ser uma solução viável (ULSEN et al., 2013).

5.3.3 Resíduos na aplicação de argamassa

Este indicador tem como objetivo promover e identificar melhores práticas construtivas e promover processos com menor geração de resíduos, ou seja, do quanto foi usado acabou em resíduo. Ao contrário da intensidade de materiais que inclui a redução da massa. Posso reduzir os resíduos a zero, e não desmaterializar a construção.

Este indicador foi aplicado num estudo conduzido em São Paulo para quantificar os resíduos durante a produção e aplicação de argamassa industrializada em alvenaria de blocos de concreto. Aplicando a Equação 9 e considerando a UF metro cubico de argamassa (m^3), a taxa de geração de resíduos é de $0,01 \text{ t}/m^3$ na central de produção de argamassa e $0,4 \text{ t}/m^3$ na etapa de aplicação (obra) representando 13% de resíduo, conforme ilustrado na Figura 27. Este valor foi calculado usando uma balança com precisão de 0.01kg. A intensidade de material na etapa de aplicação foi $2,6 \text{ t}/m^3$. Embora a perda incorporada não represente um recurso útil, também faz parte da massa do edifício e, por esse motivo, é alocado ao

indicador de intensidade de material e não como resíduo. O fluxo de água foi incluído na Figura 27 apenas para representar a formulação do concreto, mas não entra no indicador de resíduo nem de intensidade de material. Adicionalmente, os fluxos de água como de lavagem de equipamentos é calculado diretamente no indicador de água.

Figura 27 Produção e aplicação de argamassa industrializada. Dados coletados por Carolina Sonvezzo e Daniel Reis (USP). Cor azul representa os fluxos de água, cor vermelha os resíduos diretos na produção e aplicação da argamassa, cor amarela os resíduos incorporados, cor verde representa o “produto útil”.

5.4 Conclusão do capítulo

Neste capítulo exploramos os benefícios de utilizar indicadores simples para auxiliar projetistas, construtores e produtores a medir o desempenho no uso de materiais e promover medidas de melhoria embasadas em dados primários. Foram propostos três indicadores – intensidade de material e eficiência, circularidade e taxa de geração de resíduos. Considerando que a indústria atua em diversos setores (cerâmica, cimentos, aço), em diferentes tipos de edifícios e infraestruturas (habitação, escritórios, comércio, pontes, estradas), a unidade funcional foi deixada aberta para melhor se adequar a cada produto. Porém a aplicabilidade dos conceitos e as equações são compatíveis com a terminologia internacional de MFA que, pela simplicidade e por serem de fácil entendimento, podem ser aplicados em países em desenvolvimento que devem assumir a maior parte do market-share do consumo de recursos nos próximos anos.

Os indicadores devem ser aplicados em simultâneo com outros já existentes tais como consumo de energia e CO₂ para se obter uma visão integrada dos vários aspetos ambientais.

As próximas etapas deverão incluir o uso destes indicadores em diversas empresas permitindo gerar *benchmarks* setoriais de desempenho ambiental de materiais e de soluções de projeto, permitindo orientar a indústria da construção de acordo com as melhores práticas auxiliando na promoção da sustentabilidade no uso de recursos minerais.

6. CONCLUSÕES GERAIS

A indústria da construção consome mais de metade de todos os recursos extraídos globalmente gerando impactos ambientais, sociais e econômicos relevantes. Deste modo, a indústria da construção desempenha um papel importante para reduzir os impactos ambientais e promover os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Para tal é importante que os vários setores que fornecem insumos para a indústria da construção estejam disponíveis para incluir políticas públicas e inventariar dados produtivos. Constatou-se que a indústria da construção é *foreground* para 17 setores representando 99% em massa de tudo que é consumido. Em termos práticos significa que políticas públicas direcionadas para a indústria da construção podem ser aplicadas por esses setores.

Apenas concreto e argamassa representam mais de 50% de tudo que é consumido na construção. Porém, a eficiência no uso de recursos é 51-55% para concreto e 34-37% para argamassa numa abordagem cradle-to-site no Brasil. A industrialização tem potencial para reduzir o consumo de recursos entre 8-24% em comparação com a dosada em obra. Adicionalmente a produção industrializada torna mais fácil controlar a origem da areia reduzindo a informalidade do setor. No Brasil onde cerca de 70% do cimento é vendido em sacos, promover a industrialização é uma política pública importante, permitindo uma redução do consumo de recursos neste setor.

Para promover o descolamento no uso de recursos são necessários indicadores de fácil entendimento pela indústria, e que possibilitem a medição de forma prática e barata dos fluxos diretos das empresas, incluindo as pequenas e médias empresas. Foram propostos três indicadores – intensidade de material e eficiência, circularidade e taxa de geração de resíduos.

Estes indicadores foram testados nos materiais cimentícios. O consumo unitário de concreto tem grande variabilidade indicando o potencial de otimização de projeto para reduzir a pegada de material. A circularidade média é baixa e reduz à medida que aumenta a resistência a compressão. Baixas resistências aumenta a circularidade permitindo economizar recursos naturais, mas, como contrapartida, aumenta a intensidade do material

uma vez que mais recursos são consumidos por metro quadrado. Os resíduos de construção são altos, em especial nas argamassas. A medição destes fluxos e a criação de benchmark permite monitorizar o setor identificando as melhores práticas para aumentar a eficiência e promover a desmaterialização.

7. ARTIGOS PUBLICADOS

Publicações em periódicos

1. REIS, Daniel da Costa; MACK-VERGARA, Yazmin L.; JOHN, Vanderley M. Material flow analysis and material use efficiency of Brazil's mortar and concrete supply chain. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, p. 1396-1409, 2019.
2. SILVA, Fernanda Belizario; REIS, Daniel da Costa; MACK-VERGARA, Yazmin L.; et al. Simplified Life Cycle Assessment for Construction Products: focus on foreground environmental aspects. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, p. 980-997, 2020.
3. REIS, Daniel da Costa; ABRAO, P. C. R.; Tongbo Sui; JOHN, Vanderley M. Influence of cement strength class on environmental impact of concrete. **Journal of Resources, Conservation and Recycling**, v. 163, 2020.
4. REIS, Daniel da Costa; QUATTRONE, Marco; SOUZA, Jonathan; PUNHAGUI katia R.G.; PACCA, Sérgio; JOHN, Vanderley M. Potential CO₂ reduction and uptake due to industrialization and efficient cement use in Brazil. **Journal of Industrial Ecology**, 2020.
5. Vanderley M John; Fernanda Belizario Silva; Lidiane Santana Oliveira; Daniel Costa Reis; et al. Proposta prática para avaliar o desempenho ambiental no ciclo de vida da construção. **IBRACON Revista Concreto e Construções**, 2020.

Publicações em conferências

1. REIS, Daniel da Costa; JOHN, Vanderley M. Measuring resource use efficiency and intensity on the cement value chain. **Gordon Research Conference**, Ventura, United States of America, 2020.
2. JOHN, V. M.; PUNHAGUI, K. R. G.; QUATTRONE, M.; REIS, D.C. Potencial de mitigação de CO₂ de materiais cimentícios na fase de uso. In: **XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC)**, 2018, Foz do Iguaçu. ENTAC, 2018. p. 3609-3615
3. ABRAO, P. C. R.; REIS, D. C.; JOHN, V. M. Influência das fontes de dados no consumo e matriz energética da indústria cimenteira. In: **Encontro Nacional, Latino-Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis**, 2017, São Leopoldo. Anais do Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 2017. v. 1. p. 117-127.
4. REIS, D. C.; VERGARA, Y. L. M.; JOHN, V. M. Quantificação dos Potenciais Impactos Ambientais da Argamassa na Etapa de Produção e Aplicação em Obra. In: **Simpósio**

Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (SBTA), 2017, São Paulo. Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2017. p. 1-11.

5. ABRAO, P. C. R.; REIS, D. C.; JOHN, V. M. Influência das fontes de dados nas emissões de CO₂ e no indicador de mudanças climáticas da indústria cimenteira brasileira. In: **Sustainable Built Environment 2016 Brazil & Portugal**, 2016, Vitória. SBE Series 2016, 2016. v. 2. p. 877-886.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL. **Alumínio brasileiro: soluções para uma vida sustentável**. São Paulo. Brazil: Associação Brasileira do Alumínio | Brazilian association of aluminium, 2017. Disponível em: <<http://abal.org.br>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

ABCOBRE. **Anuário Brasileiro do Cobre | Brazilian Copper Yearbook 2017**. [s.l.] Associação Brasileira de Cobre, 2017. Disponível em: <<http://www.abcobre.org.br/>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

ABCP. **Método de dosagem de concreto da ABCP**. [s.l.] Associação Brasileira de Cimento Portland, 1995.

ABEDA. **Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos**. Disponível em: <<http://www.abeda.org.br/>>. Acesso em: 29 set. 2018.

ABIPLAST. **Indústria brasileira de transformação e reciclagem de material plástico | Brazilian plastic processed and recycling industry**. [s.l.] Associação Brasileira da Indústria do Plástico, 2016. Disponível em: <<http://www.abiplast.org.br>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

ABQUIM. **Associação Brasileira da Indústria Química | Brazilian Chemical Industry Association**. Disponível em: <<https://www.abiquim.org.br/>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

ABRAFATI. **Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas | Brazilian Coatings Manufacturers Association**. Disponível em: <<https://www.abrafati.com.br/en/market-indicators/>>. Acesso em: 29 set. 2018.

ABRÃO, P.; JOHN, V.; ANGULO, S. Evaluation of the influence of binder content in CO₂ and energy footprint of reinforced concrete. **59º congresso brasileiro**, p. 14, 2017.

ABRAVIDRO. **O mercado vidreiro em números**. [s.l.] Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos/vidro float, 2016.

ACR. **Anuário Estatístico de Base Florestal para o Estado de Santa Catarina**. [s.l.] Associação Catarinense de Empresas Florestais, 2016. Disponível em: <<http://www.acr.org.br>>. Acesso em: 1 out. 2018.

ADRIANSE, A. et al. **Resource Flows: The material basis of industrial economies** World Resources Institute (USA); Wuppertal Institute (Germany); Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (Netherlands); National Institute for Environmental Studies (Japan), , 1997. Disponível em: <http://pdf.wri.org/resourceflows_bw.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2016

AECWEB. **Cresce a demanda e a produção de vidros**. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/n/cresce-a-demanda-e-a-producao-de-vidros_2733>. Acesso em: 5 jun. 2018.

AFKHAMI, B. et al. Energy consumption assessment in a cement production plant. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 10, p. 84–89, jun. 2015.

ALLWOOD, J. M. **Going on a metal diet: using less liquid metal to deliver the same services in order to save energy and carbon**. Cambridge: WellMet2050, 2011.

ALLWOOD, J. M. et al. Material efficiency: providing material services with less material production. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**, v. 371, n. 1986, 13 mar. 2013.

ANGULO, S. C. et al. On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete. **Materials and Structures**, v. 43, n. 4, p. 519–528, 1 maio 2010.

ANPO. **Maior demanda de rochas ornamentais está na construção civil**. Disponível em: <<http://anpo.com.br/main.asp?link=noticia&id=36>>.

ANPO. **Associação Noroeste de Pedras Ornamentais**. Disponível em: <<http://anpo.com.br/>>. Acesso em: 29 set. 2018b.

ARCELORMITTAL. **Declaração Ambiental de produto. Barras de aço reforçado**. Belo Horizonte, Brasil: Institut Bauen und Umwelt and ArcelorMittal Brasil, 2018.

BARBOZA, M.; BASTOS, P. Traços de concreto para obras de pequeno porte. **Concreto e Construção**, v. XXXVI, n. IBRACON, p. 32–36, 2008.

BARTELMUS, P. Dematerialization and capital maintenance: two sides of the sustainability coin. **Ecological Economics**, v. 46, n. 1, p. 61–81, ago. 2003.

BATTAGIN, A. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. [s.l.] Instituto Brasileiro do Concreto, 2011.

BCA. **Building and Construction Authority. Sustainable Construction: A Guide on Concrete Usage Index**. Singapore: Building and Construction Authority, 2012.

BEN. **Balanço Energético Nacional. Ano base 2015 | Brazilian Energy Balance. Base year 2015**. [s.l.] Ministério de Minas e Energia., 2016. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>.

BENDIXEN, M. et al. Time is running out for sand. **Nature**, v. 571, n. 7763, p. 29–31, jul. 2019.

BID. **Potencial de financiamento de eficiência energética nos setores de cerâmica e gesso no Nordeste**. [s.l.] Banco Interamericano de Desenvolvimento e Banco do Nordeste, 2013. Disponível em: <<https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/3671/Potencial%20de%20financiamento%20de%20efici%C3%Aancia%20energ%C3%A9tica.pdf?sequence=1>>.

BID; CETESB. **Estudo de Baixo Carbono para a indústria de cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030**. São Paulo, Brazil: Banco Interamericano de Desenvolvimento | Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2017.

BLEISCHWITZ, R. International economics of resource productivity – Relevance, measurement, empirical trends, innovation, resource policies. **International Economics and Economic Policy**, v. 7, n. 2–3, p. 227–244, 1 ago. 2010.

BLEISCHWITZ, R. Mineral resources in the age of climate adaptation and resilience. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 2, p. 291–299, abr. 2020.

BLEIWAS, D. **Estimates of Electricity Requirements for the Recovery of Mineral commodities, with Examples Applied to Sub-Saharan Africa**. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2011. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/of/2011/1253/report/OF11-1253.pdf>>.

BOCKEN, N. M. P. et al. Taking the Circularity to the Next Level: A Special Issue on the Circular Economy: Taking Circularity to the Next Level. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 476–482, jun. 2017.

BRANCO, A. **Concreto dosagem em peso ou volume. 12 traços em sequência**, 1967.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 178–189, jun. 2015.

BRAVARD, J.-P.; GOICHOT, M.; GAILLOT, S. Geography of Sand and Gravel Mining in the Lower Mekong River: First Survey and Impact Assessment. **EchoGéo**, n. 26, 19 dez. 2013.

BRINGEZU, S. et al. International comparison of resource use and its relation to economic growth: The development of total material requirement, direct material inputs and hidden flows and the structure of TMR. **Ecological Economics**, v. 51, n. 1–2, p. 97–124, 1 nov. 2004.

BRUNNER, P.; RECHBERGER, H. **Practical Handbook of Material Flow Analysis**. [s.l.] Lewis Publishers, 2003.

BUTERA, S.; CHRISTENSEN, T. H.; ASTRUP, T. F. Life cycle assessment of construction and demolition waste management. **Waste Management**, v. 44, p. 196–205, out. 2015.

CAMPOS, É.; JOHN, V. **Emissão de CO2 da madeira serrada da Amazônia: o caso da exploração convencional**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de construção civil, , 2012.

CARDOSO, F.; JOHN, V. **Formulation method for rendering mortars based on particle size distribution and rheological behavior** Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de construção civil, , 2009.

CBCS. **Avaliação de Ciclo de Vida Modular de Blocos e Pisos de Concreto Relatório Final**. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/_5dotSystem/userFiles/ACV-m/CBCS_ACV-blocos-concreto.pdf>.

CEFIC. **Facts and Figures 2017 of the European chemical industry**. [s.l.] European Chemical Industry Council, 2018. Disponível em: <<http://fr.zone-secure.net/13451/451623/#page=1>>. Acesso em: 7 nov. 2018.

CENCIC, O.; RECHBERGER, H. Material Flow Analysis with Software STAN. **Journal of Environmental Engineering and Management**, 2008.

CHEN, C. et al. Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 5, p. 478–485, mar. 2010.

CHEN, D. **Sustainable Water Management**. 1st Edition ed. [s.l.] Taylor & Francis Group, 2016.

CHEUNG, J.; ROBERTS, L.; LIU, J. Admixtures and sustainability. **Cement and Concrete Research**, 5 maio 2017.

CHEVALLIER, R. **Illegal Sand Mining in South Africa**. Johannesburg: South African Institute of International Affairs, 2014.

CLEVELAND, C. J.; RUTH, M. Indicators of Dematerialization and the Materials Intensity of Use. **Journal of Industrial Ecology**, v. 2, n. 3, p. 15–50, 1998.

CNQ. **Panorama Setor de Vidro**. [s.l.] Confederação Nacional do Ramo Químico, 2015. Disponível em: <<http://cnq.org.br>>. Acesso em: 8 jul. 2018.

CONSTRUIRBARATO. **Medidas Para Fazer Massa de Cimento - Traços Para Argamassa**. Disponível em: <<http://www.construirbarato.com.br/dicas/tracos-massa-de-cimento/>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

CONSTRUTOR VIRTUAL. **Calcule seu Traço de Concreto em Latas de 18 litros! Construtor Virtual**, 19 maio 2016. Disponível em: <<http://construtorvirtual.com.br/calcule-seu-traco-de-concreto-em-latas-de-18-litros/>>. Acesso em: 14 out. 2017

D'AGOSTINO, L. Z. et al. **The use of quarry fines for mortar: A proposal of methodological studies**. . In: PROCEEDINGS OF THE 14TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, MPES 2005 AND THE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER APPLICATIONS IN THE MINERALS INDUSTRIES, CAMI 2005. 2005

DAHLGREN, L.; STRIPPLE, H. **A comparative LCA study of various concepts for shopping bags and cement sacks**. Stockholm, Sweden: IVL Swedish Environmental Research Institute, 2016. Disponível em: <<https://www.billerudkorsnas.com/globalassets/billerudkorsnas/sustainability/lca-and-epd/lca-for-packaging-concepts--billerudkorsnas-report-u5732-ivl-2016.pdf>>. Acesso em: 5 nov. 2018.

DAMINELI, B. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas – Concepts for formulation of low-binder concretes**. Dr. Eng. Thesis—[s.l.] São Paulo University. Polytechnic school., 2013.

DAMINELI, B. L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555–562, set. 2010.

DAWSON, R. J. et al. A systems framework for national assessment of climate risks to infrastructure. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 376, n. 2121, p. 20170298, 13 jun. 2018.

DE JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 872–877, fev. 2009.

DE PAULA, H. M.; DE OLIVEIRA ILHA, M. S.; ANDRADE, L. S. Concrete plant wastewater treatment process by coagulation combining aluminum sulfate and Moringa oleifera powder. **Journal of Cleaner Production**, v. 76, p. 125–130, 1 ago. 2014.

DENG, W.; PRASAD, D. K.; OSMOND, P. W. Application of “Streamlined” Material Input per Service Unit Concept to Small Residential Districts in China. **Journal of Industrial Ecology**, v. 15, n. 6, p. 967–979, dez. 2011.

DIAS, C. M. R.; SAVASTANO JR., H.; JOHN, V. M. Exploring the potential of functionally graded materials concept for the development of fiber cement. **Construction and Building Materials, Inorganic-bonded Fiber Composites**. v. 24, n. 2, p. 140–146, 1 fev. 2010.

DITTRICH, M. et al. **Green economies around the world? Implications of resource use for development and the environment**. Vienna, Austria: Sustainable Europe Research Institute, 2012. Disponível em: <https://www.boell.de/sites/default/files/201207_green_economies_around_the_world.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2018.

DNPM. **Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral**. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015>>. Acesso em: 8 dez. 2016.

DNPM. **Sumário Mineral**. Brasília, Brazil: Nacional Department of Mineral Production, 2016. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

DOUGLAS, I.; LAWSON, N. The Human Dimensions of Geomorphological Work in Britain. **Journal of Industrial Ecology**, v. 4, n. 2, p. 9–33, 1 abr. 2000.

DREW, L. J.; LANGER, W. H.; SACHS, J. S. Environmentalism and Natural Aggregate Mining. **Natural Resources Research**, v. 11, n. 1, p. 19–28, 1 mar. 2002.

EC. **Roteiro para uma Europa Eficiente na utilização de recursos**. Bruxelas: [s.n.]. . Acesso em: 22 jun. 2018.

ECOINVENT 3.2. **WWW Document**. Disponível em: <<http://www.ecoinvent.org/database/older-versions/ecoinvent-32/ecoinvent-32.html>>. Acesso em: 11 dez. 2017.

ECVM; PLASTICSEUROPE. **Eco-profiles of the European Plastics Industry. Polyvinyl chloride (PVC) - Emulsion polymerization**. Brussels: European Council of Vinyl Manufacturers and Plastics Europe (Association of Plastics Manufactures), 2005. Disponível em: <http://www.inference.org.uk/sustainable/LCA/elcd/external_docs/epvc_31116f09-fabd-11da-974d-0800200c9a66.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2018.

EIPPCB; IPTS. **Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide**. European Union, , 2013.

EISENMENGER, N. et al. Consumption-based material flow indicators — Comparing six ways of calculating the Austrian raw material consumption providing six results. **Ecological Economics**, v. 128, p. 177–186, 1 ago. 2016.

EN 15643-2. **Sustainability of construction works. Assessment of buildings. Part 2: Framework for the assessment of environmental performance.** European Committee for Standardization, , 2014. . Acesso em: 7 ago. 2019

EN 15804. **Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products.** European Committee for Standardization, , 2015.

ENGENHEIRO NO CANTEIRO. **Traço de argamassa: 3 pontos de sua atenção para escolha na sua obra.** Disponível em: <<http://engenheironocanteiro.com.br/traco-de-argamassa/>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

EPE. **Statistical Yearbook of electricity .2016 baseline year.** Rio de Janeiro. Brasil: Empresa de Pesquisa Energética, 2017.

EUROPEAN COMMISSION. **Roadmap to a Resource Efficient Europe.** Brussels: [s.n.]. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/resource_efficiency/about/roadmap/index_en.htm>. Acesso em: 25 mar. 2019.

EUROPEAN COMMISSION. **Product Environmental Footprint (PEF) Guide** Joint Research Centre (JRC). Ispra, Italy: [s.n.].

EUROSTAT. **Economy-wide material flow accounts and derived indicators. A methodological guide.** Luxembourg: European Communities, 2001.

EUROSTAT. **Environmental statistics and accounts in Europe.** Luxembourg: European Union, 2010.

EUROSTAT. **Economy-wide material flow accounts handbook.** Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018.

FAO. **Yearbook of Forest Products 2015.** Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017.

FAZFÁCIL. **Traço de Argamassas: Tabela de Misturas e Aplicação.** Disponível em: <<http://www.fazfacil.com.br/reforma-construcao/argamassas-tabelas-aplicacao/>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

FERREIRA, G. C.; DAITX, E. C. A mineração de areia industrial na Região Sul do Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 56, n. 1, p. 59–65, mar. 2003.

FINEP. **Alternativas para a Redução de Desperdício de Materiais nos Canteiros de Obras.** [s.l.] Financiadora de Estudos e Projetos do Ministério da Ciência e Tecnologia, 2003. Disponível em: <<http://perdas.pcc.usp.br/>>. Acesso em: 2 dez. 2017.

FISHER-KOWALSKI, M. et al. Methodology and Indicators of Economy-wide Material Flow Accounting. **Journal of Industrial Ecology**, p. 855–876, 2011.

FORMOSO, C. et al. Material Waste in Building Industry: Main Causes and Prevention. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 128, n. 4, p. 316–325, 1 ago. 2002.

GÁLVEZ-MARTOS, J.-L. et al. Construction and demolition waste best management practice in Europe. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 166–178, 1 set. 2018.

GAO, X.; MALKAWI, A. A new methodology for building energy performance benchmarking: An approach based on intelligent clustering algorithm. **Energy and Buildings**, v. 84, p. 607–616, dez. 2014.

GAVRILETEA, M. Environmental Impacts of Sand Exploitation. Analysis of Sand Market. **Sustainability**, v. 9, n. 7, p. 1118, 26 jun. 2017.

GAZLEY, I.; FRANCIS, P. **UK material flow review**. Office for national statistics. Disponível em: <https://unstats.un.org/unsd/envaccounting/ceea/archive/MFA/UK_material_flows_review_final_report.PDF>.

GETTU, R. et al. Influence of supplementary cementitious materials on the sustainability parameters of cements and concretes in the Indian context. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 52, n. 1, 2019.

GILJUM, S.; BRUCKNER, M.; MARTINEZ, A. Material Footprint Assessment in a Global Input-Output Framework: Material Footprint Assessment in a Global Input-Output Framework. **Journal of Industrial Ecology**, v. 19, n. 5, p. 792–804, out. 2015.

GNR. **The Cement Sustainability Initiative (CSI) - Global Cement Database on CO₂ and Energy Information**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.wbcsdcement.org/index.php/key-issues/climate-protection/gnr-database>>. Acesso em: 8 dez. 2016.

GOLDEMBERG, J.; AGOPYAN, V.; JOHN, V. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. [s.l.] Blucher, 2012.

GOODQUARRY. **Quarry fines & waste**. Disponível em: <<https://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=1449>>. Acesso em: 1 mar. 2017.

GRAEDEL, T. E. et al. What Do We Know About Metal Recycling Rates? **Journal of Industrial Ecology**, v. 15, n. 3, p. 355–366, 2011.

GRAEDEL, T. E. et al. Methodology of Metal Criticality Determination. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 2, p. 1063–1070, 17 jan. 2012.

GRIGGS, D. et al. Sustainable development goals for people and planet. **Nature**, v. 495, n. 7441, p. 305–307, mar. 2013.

GUIMARÃES, J.; GOMES, R.; SEABRA, M. **Guia das argamassas nas construções**. [s.l.] Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 2014. v. 8a edição

HAAS, W. et al. How Circular is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. **Journal of Industrial Ecology**, v. 19, n. 5, p. 765–777, 2015.

HABERT, G. et al. Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 6, p. 364–376, 1 abr. 2010.

HABERT, G. et al. Reducing environmental impact by increasing the strength of concrete: quantification of the improvement to concrete bridges. **Journal of Cleaner Production**, v. 35, p. 250–262, 1 nov. 2012.

HÁK, T.; JANOUŠKOVÁ, S.; MOLDAN, B. Sustainable Development Goals: A need for relevant indicators. **Ecological Indicators**, v. 60, p. 565–573, jan. 2016.

HAMASSAKI, L. T.; OLIVEIRA, S. R.; ÂNGULO, S. C. Soluções inovadoras: reciclagem de RCD. p. 50–51, 2014.

HASHIMOTO, S.; TANIKAWA, H.; MORIGUCHI, Y. Where will large amounts of materials accumulated within the economy go? – A material flow analysis of construction minerals for Japan. **Waste Management**, v. 27, n. 12, p. 1725–1738, 2007.

HERTWICH, E. G. et al. Material efficiency strategies to reducing greenhouse gas emissions associated with buildings, vehicles, and electronics—a review. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 4, p. 043004, abr. 2019.

HERTWICH, E. G.; PEASE, W. S.; KOSHLAND, C. P. Evaluating the environmental impact of products and production processes: a comparison of six methods. **Science of The Total Environment**, v. 196, n. 1, p. 13–29, mar. 1997.

HINTERBERGER, F.; LUKS, F.; SCHMIDT-BLEEK, F. Material flows vs. ‘natural capital’. **Ecological Economics**, v. 23, n. 1, p. 1–14, out. 1997.

HOQUE, M. R. et al. Energy Intensity of the Catalan Construction Sector: An Application of Material and Exergy Flow Analysis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 16, n. 5, p. 699–709, out. 2012.

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**, v. 17, n. 7, p. 668–675, maio 2009.

HUYSMAN, S. et al. Toward a systematized framework for resource efficiency indicators. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 95, p. 68–76, 1 fev. 2015.

IABR. **Instituto Aço Brasil | Brazil Steel Institute**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

IBÁ. **Relatório 2017. Indústria brasileira de árvores | Report 2017. Brazilian tree industry**. São Paulo, Brazil: Indústria Brasileira de Árvores, 2017. Disponível em: <https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2018.

IBGE. **Pesquisa industrial.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/1719/pia_2015_v34_n2_produto.pdf>.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas populacionais para os municípios e para as Unidades da Federação brasileiros.** Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2015/estimativa_dou.shtm>. Acesso em: 16 mar. 2018b.

IBRAM. **Informações e análises da economia mineral brasileira.** [s.l.] Instituto Brasileiro de mineração, 2012. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

IBRAM; ANA. **Water resource management and the mining industry** Brazilian Mining Association and National Water Agency, , 2013. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/>>. Acesso em: 30 mar. 2018

ILCD. **The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. Towards more sustainable production and consumption for a resource efficient Europe.** Luxembourg: uropean Comission - Joint Research Centre, 2012.

ILZSG. **International Lead and Zinc Study Group.** Disponível em: <<http://www.ilzsg.org>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

INTERCEMENT. **Annual report. Building sustainable partnerships.** [s.l.] Intercement, 2015. Disponível em: <http://www.intercement.com/files/relevantes/file_en/InfoRel_2016-04-12_06-15-29_file_en.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2017.

IOANNIDOU, D. et al. Is gravel becoming scarce? Evaluating the local criticality of construction aggregates. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 126, n. Supplement C, p. 25–33, 1 nov. 2017.

IOANNIDOU, D. et al. The future in and of criticality assessments. **Journal of Industrial Ecology**, v. 0, n. 0, p. 1–16, 2019.

IPCC. **Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories.** [s.l: s.n.].

IPCC. **Global Warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.** [s.l.] The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/sr15/>>. Acesso em: 28 abr. 2020.

IRANI. **Corrugated Cardboard Products.** Disponível em: <<http://www.irani.com.br/en/irani/bussines-area/packing/>>. Acesso em: 9 nov. 2018.

J. MENDO. **Relatório técnico 84 - Fluxo de massas de materiais no Brasil.** [s.l.] Ministério de Minas e Energia, 2009a.

J. MENDO. **Relatório tecnico - perfil das argilas para cerâmica vermelha.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.jmendo.com.br/tipo/a-mineracao-brasileira/>>.

J.MENDO. **Relatório técnico 31 - Agregados para construção civil.** [s.l.] Ministério de Minas e Energia, 2009a.

J.MENDO. **Relatório técnico 34 - Perfil da gipsita.** [s.l.] Ministério de Minas e Energia, 2009b.

J.MENDO. **Relatório Técnico 36. Perfil do Titânio.** [s.l.] Ministério de Minas e Energia, 2010.

JOHN, V. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** [s.l.] Geraldo C. Isaia, 2017.

JOHN, V.; PUNHAGUI, K.; CINCOTTO, M. **Produção de cal.** [s.l.] Nucleo de estudos de economias de baixo carbono, 2014.

JOSA, A. et al. Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 8, p. 1313–1320, ago. 2004.

JUNIOR, R.; PINHO, M. **Economia de baixo carbono. Impactos de novos marcos regulatórios e tecnologias sobre a economia brasileira.** [s.l.] EBC/BNDES/FUNDACE, 2015. Disponível em: <http://www.sef.usp.br/wp-content/uploads/sites/33/2015/07/Economia_de_Baixo_Carbono.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2018.

KÄÄNTEE, U. et al. Cement manufacturing using alternative fuels and the advantages of process modelling. **Fuel Processing Technology**, v. 85, n. 4, p. 293–301, 15 mar. 2004.

KAPUR, A. et al. The contemporary cement cycle of the United States. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 11, n. 2, p. 155–165, 1 maio 2009.

KARKKAINEN, B. C. **Information as Environmental Regulation: Tri and Performance Benchmarking, Precursor to a New Paradigm?** Rochester, NY: Social Science Research Network, 18 out. 2000. Disponível em: <<https://papers.ssrn.com/abstract=224157>>. Acesso em: 12 maio. 2020.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 221–232, 1 dez. 2017.

KLEEMANN FRITZ et al. GIS-based Analysis of Vienna's Material Stock in Buildings. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 2, p. 368–380, 5 jul. 2016.

KLUS, L. et al. The Utilization of Waste Water from a Concrete Plant in the Production of Cement Composites. **Buildings**, v. 7, n. 4, p. 120, dez. 2017.

KRAUSMANN, F. et al. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. **Ecological Economics**, v. 68, n. 10, p. 2696–2705, 15 ago. 2009.

KRAUSMANN, F. et al. **Economy-wide Material Flow Accounting Introduction and Guide.** Vienna: Institute of Social Ecology, 2015.

KRAUSMANN, F. et al. Material Flow Accounting: Measuring Global Material Use for Sustainable Development. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 42, n. 1, p. 647–675, 2017.

KRAUSMANN, F. et al. From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015. **Global Environmental Change**, v. 52, p. 131–140, 1 set. 2018.

KUMAR, D.; HODSON, R. **Use of quarry fines for engineering and environmental applications**. [s.l.] Center for transportation research. Bureau of Engineering Research. University of Texas at Austin, 1992. Disponível em: <https://library.ctr.utexas.edu/digitized/iacreports/1992_specsrch_natlstoneassoc.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2018.

LAFARGEHOLCIM. **Sustainability report. So the world builds better**. [s.l.] LafargeHolcim, 2016. Disponível em: <http://www.lafargeholcim.com/sites/lafargeholcim.com/files/atoms/files/05032017_sustainability-report_2016.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2017.

LAMAS, W. DE Q.; PALAU, J. C. F.; CAMARGO, J. R. DE. Waste materials co-processing in cement industry: Ecological efficiency of waste reuse. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 200–207, mar. 2013.

LAMB, V.; MARSCHKE, M.; RIGG, J. Trading Sand, Undermining Lives: Omitted Livelihoods in the Global Trade in Sand. **Annals of the American Association of Geographers**, v. 109, n. 5, p. 1511–1528, 3 set. 2019.

LEONTIEF, W. Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach. **The Review of Economics and Statistics**, v. 52, p. 262–271, 1970.

LETTENMEIER, M.; LIEDTKE, C.; ROHN, H. Eight Tons of Material Footprint—Suggestion for a Resource Cap for Household Consumption in Finland. **Resources**, v. 3, n. 3, p. 488–515, 9 jul. 2014.

LOW, M.-S. **Material flow analysis of concrete in the United States**. Thesis—[s.l.] Massachusetts Institute of Technology, 2005.

LOWKE, D. et al. Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. **Cement and Concrete Research**, SI : Digital concrete 2018. v. 112, p. 50–65, 1 out. 2018.

LUTTER, S.; GILJUM, S.; BRUCKNER, M. A review and comparative assessment of existing approaches to calculate material footprints. **Ecological Economics**, v. 127, p. 1–10, 1 jul. 2016.

LUZ, A. B. DA; ALMEIDA, S. L. M. **Manual de Agregados para Construção Civil**. [s.l.] Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), 2009.

MACEDO, A. B.; FREIRE, D.; AKIMOTO, H. Environmental management in the Brazilian non-metallic small-scale mining sector. **Journal of Cleaner Production**, Environmental management. v. 11, n. 2, p. 197–206, 1 mar. 2003.

MACK-VERGARA, Y. L.; JOHN, V. M. Life cycle water inventory in concrete production—A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 227–250, jul. 2017.

MAIA DE SOUZA, D. et al. Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 70–82, 20 nov. 2016.

MÃOS A OBRA. **O Guia do Profissional da Construção - Série Mãos À Obra**. Disponível em: <http://www.lafarge.com.br/M_OBRA_sem_logo.pdf>.

MAYER, A. et al. Measuring Progress towards a Circular Economy: A Monitoring Framework for Economy-wide Material Loop Closing in the EU28. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 1, p. 62–76, 2019.

MEADOWS, D. **Indicators and Information Systems for Sustainable Development. A report to the Balaton Group**. USA: Sustainability Institute, 1998.

MEADOWS, D. H. et al. (EDS.). **The Limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind**. New York: Universe Books, 1972.

MIATTO, A. et al. Global Patterns and Trends for Non-Metallic Minerals used for Construction. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 4, p. 924–937, 4 ago. 2017.

MILLER, S. A. et al. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 115–124, 1 dez. 2018.

MILLER, S. A. The role of cement service-life on the efficient use of resources. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 2, p. 024004, jan. 2020.

MILLER, S. A.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. **Nature Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 69–76, jan. 2018.

MITCHELL, C.; MITCHELL, P.; PASCOE, R. **Quarry fines minimisation: can we really have 10mm aggregate with no fines**. Proceedings of the 14th Extractive Industry Geology Conference. **Anais...2008** Disponível em: <<https://static1.squarespace.com/static/54199a46e4b05afa19b4e68c/t/565746c0e4b0f33a7ac974a4/1448560320478/pp37-44.+Mitchell+CJ+et+al.+Quarry+fines+minimisation..pdf>>. Acesso em: 6 abr. 2017

MME. **Brazilian metallurgy statistical yearbook**. [s.l.] Ministério de Minas e Energia Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos>>.

MME. **Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos**. [s.l.] Ministério de Minas e Energia Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2017a. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/ANU%C3%81RIO+N%C3%83O-METALICOS+2017_27.07.2017.pdf/8a777f0f-3f3c-4f03-85de-8fa783f2813c>. Acesso em: 30 nov. 2017.

MME. **Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico | Brazilian metallurgy statistical yearbook**. [s.l.] Ministério de Minas e Energia Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2017b. . Acesso em: 5 jun. 2018.

MME. **Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos | Brazilian non-metallic processing statistical yearbook**. [s.l.] Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2018.

MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. **Towards sustainable concrete**. Special Features. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nmat4930>>. Acesso em: 29 mar. 2018.

MONTES CLAROS. **Traço de concreto: como calcular as misturas**. Disponível em: <<https://cimentomontesclaros.com.br/traco-de-concreto/>>. Acesso em: 31 maio. 2018.

MORIGUCHI, Y. Material flow indicators to measure progress toward a sound material-cycle society. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 9, n. 2, p. 112–120, 1 set. 2007.

MUIGAI, R.; ALEXANDER, M. G.; MOYO, P. Cradle-to-gate environmental impacts of the concrete industry in South Africa. **Journal of the South African Institution of Civil Engineering**, v. 55, n. 2, p. 02–07, jan. 2013.

NDRC. **National Climate Change Program**. [s.l.] National Development and Reform Commission, 2007. Disponível em: <<http://www.china.org.cn/english/environment/213624.htm>>. Acesso em: 5 abr. 2019.

NIZA, S.; FERRÃO, P. A transitional economy's metabolism: The case of Portugal. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 46, n. 3, p. 265–280, mar. 2006.

NUMAZAWA, C. T. D. et al. Logging residues and CO₂ of Brazilian Amazon timber: Two case studies of forest harvesting. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 280–285, jul. 2017.

OECD. **The OECD Glossary of Statistical Terms**. Disponível em: <<https://stats.oecd.org/glossary/>>. Acesso em: 19 maio. 2020.

OECD. **The OECD guide. Measuring material flows and resource productivity**. [s.l.] OECD, 2008. . Acesso em: 8 dez. 2016.

OECD. **Material Resources, Productivity and the Environment**. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2015.

OLIVEIRA, L. S.; PACCA, S. A.; JOHN, V. M. Variability in the life cycle of concrete block CO₂ emissions and cumulative energy demand in the Brazilian Market. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 588–594, 1 jul. 2016.

OLIVEIRA, L. S.; PUNHAGUI, K.; JOHN, V. **Estimativa das emissões de CO₂ do aço a arco elétrico**. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Banco Interamericano de Desenvolvimento, 2016.

OLIVETTI, E. A.; CULLEN, J. M. Toward a sustainable materials system. **Science**, v. 360, n. 6396, p. 1396–1398, 29 jun. 2018.

OMER, M. A. B.; NOGUCHI, T. A conceptual framework for understanding the contribution of building materials in the achievement of Sustainable Development Goals (SDGs). **Sustainable Cities and Society**, v. 52, p. 101869, jan. 2020.

PACHECO, J. et al. The paradox of high performance concrete used for reducing environmental impact and sustainability increase. n. Second International Conference on Concrete Sustainability, p. 12, 2016.

PANTAROTO, H. L. **Uma análise da utilização do chumbo na produção de baterias e suas implicações ambientais**. São Paulo, Brazil: [s.n.].

PARK, H. S. et al. Development of a new energy benchmark for improving the operational rating system of office buildings using various data-mining techniques. **Applied Energy**, v. 173, p. 225–237, jul. 2016.

PAZ, D. et al. Riscos de impactos ambientais proveniente da deposição irregular de Resíduos da Construção Civil em bacias hidrográficas da Região Metropolitana do Recife. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 3, p. 325–336, 14 out. 2018.

PCR. **Product Category Rules. UN CPC 375 concrete**WBCSD Cement Sustainability Initiative, , 2013.

PETRUCCI, E. **Concreto de Cimento Portland**. 14th ed. ed. [s.l.] Vladimir Antonio Paulon, 2005.

PINI. **Revista Equipe de Obra | Chapisco, emboço e reboco - Aprenda a preparar as argamassas, aplicá-las e dar o acabamento adequado para obter paredes com superfícies lisas e planas | Construção e Reforma**. Disponível em: <<http://equipededeobra17.pini.com.br/construcao-reforma/55/artigo275577-1.aspx>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

PINTO, T. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. São Paulo, Brasil: Universidade de São Paulo, 1999.

PIPILIKAKI, P. et al. Use of tire derived fuel in clinker burning. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 7–8, p. 843–847, ago. 2005.

PLASTICSEUROPE. **Eco-profiles of the European Plastics Industry. Low-density polyethylene (LDPE)**. Brussels: Plastics Europe (Association of Plastics Manufacturers), 2005. Disponível em: <http://www.inference.org.uk/sustainable/LCA/elcd/external_docs/ldpe_311147f4-fabd-11da-974d-0800200c9a66.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2018.

PRIOR, T. et al. Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. **Global Environmental Change**, v. 22, n. 3, p. 577–587, ago. 2012.

PUNHAGUI, K. Potencial de reducción de las emisiones de CO2 y de la energía incorporada en la construcción de viviendas en Brasil mediante el incremento del uso de la madera. **TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)**, 23 set. 2014.

PVC INSTITUTE. **Instituto Brasileiro do PVC | Brazilian PVC institute**. Disponível em: <<http://pvc.org.br/>>. Acesso em: 9 out. 2018.

QUATTRONE, M.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Energy and CO₂ from high performance recycled aggregate production. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 90, p. 21–33, 1 set. 2014.

RANKIN, J. **Energy Use in Metal Production**. Australia: CSIRO, Process Science and Engineering, 2012.

REIS, D. C. et al. Influence of cement strength class on environmental impact of concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 163, p. 105075, dez. 2020.

REIS, D. DA C.; MACK-VERGARA, Y.; JOHN, V. M. Material flow analysis and material use efficiency of Brazil's mortar and concrete supply chain. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 6, p. 1396–1409, 2019.

RESOURCE PANEL. **Glossary**. Disponível em: <<https://www.resourcepanel.org/glossary>>.

RICCI, B.; PEREIRA, A.; AKASAKI, J. Estudo de Dosagens Visando Obter Concretos para Obras de Pequeno Porte. **Fórum Ambiental**, v. 13, p. 182–194, 2017.

ROSSI, E. **Avaliação do ciclo de vida da brita para a construção civil: estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana)—São Carlos, Brasil: Universidade Federal de São Carlos, 2013.

ROSSI, E.; SALES, A. Carbon footprint of coarse aggregate in Brazilian construction. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 333–339, 15 dez. 2014.

SAGOE-CRENTSIL, K. K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 5, p. 707–712, maio 2001.

SAHU, H.; DASH, S. Land Degradation due to Mining in India and its Mitigation Measures. **2nd International Conference on Environmental Science and Technology**, p. 132–136, 2011.

SALGADO, J. **Técnicas e práticas construtivas para edificação**. [s.l.] Érica, 2009.

SCHANDL, H. et al. Global Material Flows and Resource Productivity: Forty Years of Evidence. **Journal of Industrial Ecology**, p. 827–838, 2017.

SCHANDL, H.; WEST, J. Resource use and resource efficiency in the Asia–Pacific region. **Global Environmental Change**, 20th Anniversary Special Issue. v. 20, n. 4, p. 636–647, 1 out. 2010.

SCHEUER, C.; KEOLEIAN, G. A.; REPPE, P. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 10, p. 1049–1064, 1 nov. 2003.

SCHILLER, G.; GRUHLER, K.; ORTLEPP, R. Continuous Material Flow Analysis Approach for Bulk Nonmetallic Mineral Building Materials Applied to the German Building Sector. **Journal of Industrial Ecology**, p. 673–688, 2017.

- SCRIVENER, K. Options for the future of cement. **The indian concrete journal**, p. 11–21, 2014.
- SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, 28 jun. 2018.
- SHAIKH, A.; INAMDAR, V. Study of Utilization of Waste Water in Concrete. **Journal of Mechanical and Civil Engineering**, v. 13, p. 105–108, 2016.
- SILVA, V. A. DA; FERNANDES, A. L. T. Cenário do gerenciamento dos resíduos da construção e demolição (RCD) em Uberaba-MG. **Sociedade & Natureza**, v. 24, n. 2, p. 333–344, ago. 2012.
- SILVA, F. B. et al. Primary data priorities for the life cycle inventory of construction products: focus on foreground processes. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 6, p. 980–997, jun. 2020.
- SILVA, G. **Manual de traços de concreto**. 3º ed. [s.l.] Nobel, 1975.
- SILVA, R. Plantando casas: cadeia produtiva para implantação de habitação de interesse social em madeira de Pinus spp no Paraná - Brasil. n. 4o simpósio de madeira e construção, p. 39, 2017.
- SNIC. **Sindicato Nacional do Cimento 2013**. Rio de Janeiro. Brasil: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2013. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf>.
- SNIC. **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento | Brazilian Cement Industry Union**. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/>>. Acesso em: 8 dez. 2019.
- SNIC AND ABCP. **Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento and Associação brasileira de cimento portland, 2019. Disponível em: <<https://www.abcp.org.br/cms/tag/roadmap/>>. Acesso em: 23 ago. 2018.
- SOLÍS-GUZMÁN, J.; MARRERO, M.; RAMÍREZ-DE-ARELLANO, A. Methodology for determining the ecological footprint of the construction of residential buildings in Andalusia (Spain). **Ecological Indicators**, v. 25, p. 239–249, fev. 2013.
- SOUZA, A. **Análise do ciclo de vida da areia extraída em leito de rio em uma mineradora de pequeno porte, em São José do Rio Preto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana)—São Carlos, Brasil: Universidade Federal de São Carlos, 2012.
- SOUZA, D. M. DE et al. Comparative Life Cycle Assessment of ceramic versus concrete roof tiles in the Brazilian context. **Journal of Cleaner Production**, v. 89, p. 165–173, 15 fev. 2015.
- SOUZA, U. E. L. DE et al. Diagnosis and actions to reduce waste generation in building sites: a progressive approach. **Ambiente Construído**, v. 4, n. 4, p. 33–46, 2004.
- SOUZA, U. E. L. DE. **Como Reduzir Perdas nos Canteiros. Manual de gestão do consumo de materiais na construção civil**. [s.l.] Pini Ltda., 2005.

SOUZA, R.; JOHN, V. **Estudo da retração em fibrocimento reforçado com fibra polimérica** Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de construção civil, , 2013.

STROMBERG, L. L. et al. Application of layout and topology optimization using pattern gradation for the conceptual design of buildings. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 43, n. 2, p. 165–180, 1 fev. 2011.

SUAOBRA. **Confira qual traço usar na argamassa para assentamento de blocos**. Disponível em: <<http://suaobra.com.br/dicas/levantamento-obra/confira-qual-traco-usar-na-argamassa-para-assentamento-de-blocos>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

TANIGUTI, E. **Panorama do mercado de concreto**. [s.l.] Associação Brasileira de Cimento Portland e8 inteligência, 2015. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/files_mf/PanoramaMercadoConcretov2_Eliana-Taniguti.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2017.

TANIKAWA, H.; HASHIMOTO, S. Urban stock over time: spatial material stock analysis using 4d-GIS. **Building Research & Information**, p. 483–502, 2010.

TAVARES, S. F.; LAMBERTS, R. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Florianópolis. Brazil: Santa Catarina University, 2006.

TORRES, A. et al. A looming tragedy of the sand commons. **Science**, v. 357, n. 6355, p. 970–971, 8 set. 2017.

ULSEN, C. et al. Production of recycled sand from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, Special Section on Recycling Wastes for Use as Construction Materials. v. 40, p. 1168–1173, 1 mar. 2013.

UNEP. **Decoupling Natural Resource use and Environmental Impacts from Economic Growth ... Sustainable Development Knowledge Platform**. Disponível em: <<https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=400&nr=151&menu=1515>> . Acesso em: 22 ago. 2017.

UNEP. **Global Material Flows and Resource Productivity: Assessment Report for the UNEP International Resource Panel**. Geneva, Switzerland: United Nations Environment Programme, 2016. Disponível em: <<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/21557>>. Acesso em: 21 jan. 2020.

UNEP. **Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement based materials industry**. Paris: United Nations Environment Program, 2017.

UNEP. **Global resources outlook. Natural resources for the future we want**. [s.l.] United Nations Environment Programme. International Resource Panel, 2019a.

UNEP. **Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources**. Geneva, Switzerland: United Nations Environment Programme, 2019b. Disponível em: <<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/28163>>. Acesso em: 21 jan. 2020.

UNEP. **Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future**. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2020.

UNITED NATIONS. **The Sustainable Development Goals report 2019**. New York: United Nations, 2019.

USGS. **Mineral commodity summaries**. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: U.S. Geological survey, 2019.

VACCHIANO, I. **Manual prático do mestre de obras**. Disponível em: <<https://inaciovacchiano.files.wordpress.com/2014/08/manual-prc3a1tico-do-mestre-de-obras-2015-4a-edic3a7c3a3o-v-6-inacio-vacchiano1.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2017.

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**, v. 34, n. 4, p. 431–442, 2012.

VAN OERS, L.; GUINÉE, J. The Abiotic Depletion Potential: Background, Updates, and Future. **Resources**, v. 5, n. 1, p. 16, mar. 2016.

VDI 4800. Resource efficiency. Methodological principles and strategies. Part 1. . 2016.

VENKATARAMA REDDY, B. V.; JAGADISH, K. S. Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 2, p. 129–137, 1 fev. 2003.

VIEIRA, L.; FIGUEIREDO, A. Resíduos da concreteira: o aproveitamento do problema. **Concreto & Construções - IBRACON**, v. XLI, p. 41–45, 1 set. 2013.

VOET, E. VAN DER; OERS, L. VAN; NIKOLIC, I. Dematerialization: Not Just a Matter of Weight. **Journal of Industrial Ecology**, v. 8, n. 4, p. 121–137, 1 out. 2004.

VOLLSET, S. E. et al. Fertility, mortality, migration, and population scenarios for 195 countries and territories from 2017 to 2100: a forecasting analysis for the Global Burden of Disease Study. **The Lancet**, jul. 2020.

VOTORANTIM. **Integrated report**. [s.l.] Votorantim cimentos, 2015. Disponível em: <<http://static.globalreporting.org/report-pdfs/2016/8ab410f13f1c041310166cebee6ed718.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2017.

VOTORANTIM. **EPD – Environmental Product Declaration. CP II E 40, CP III-40 RS and CP V-ARI by Votorantim Cimentos**. São Paulo, Brazil: Votorantim cimentos, 2016. . Acesso em: 18 set. 2017.

VOTORANTIM. **Conheça os cimentos para cada tipo de obra**. Disponível em: <<http://www.votorantimcimentos.com.br/produtos/cimentos-votoran/>>. Acesso em: 14 out. 2017.

WANG, W. et al. A Material Flow Analysis (MFA)-based potential analysis of ecoefficiency indicators of China’s cement and cement-based materials industry. **Journal of Cleaner Production journal**, p. 787–796, 2016.

WATERS, C. N. et al. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. **Science**, v. 351, n. 6269, p. aad2622, 8 jan. 2016.

WBCSD. **The Business Case for the Use of Life Cycle Metrics in Construction & Real Estate**. Geneva: World Business Council for Sustainable Development, 2016. Disponível em: <<https://www.wbcsd.org/contentwbc/download/1930/24581>>.

WEIDEMA, B. **Market information in life cycle assessment**. Denmark: Danish Environmental Protection Agency, 2003.

WERNICK, I. K. Dematerialization and secondary materials recovery in the U.S. **JOM**, v. 46, n. 4, p. 39–42, 1994.

WEST, J.; SCHANDL, H. Material use and material efficiency in Latin America and the Caribbean. **Ecological Economics**, v. 94, p. 19–27, 1 out. 2013.

WIEDMANN, T. O. et al. The material footprint of nations. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 20, p. 6271–6276, 19 maio 2015.

WIESEN, K.; WIRGES, M. From cumulated energy demand to cumulated raw material demand: the material footprint as a sum parameter in life cycle assessment. **Energy, Sustainability and Society**, v. 7, n. 1, p. 13, dez. 2017.

WOODWARD, R.; DUFFY, N. Cement and concrete flow analysis in a rapidly expanding economy: Ireland as a case study. **Resources, Conservation and Recycling**, p. 448–455, 2011.

WORLDSTEEL. **Steel Statistical Yearbook**. Brussels: World Steel Association, 2016. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/>>. Acesso em: 14 dez. 2017.

WORRELL, E.; ALLWOOD, J.; GUTOWSKI, T. The Role of Material Efficiency in Environmental Stewardship. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 41, n. 1, p. 575–598, 2016.

WRI. **Material flows in the United States. A physical Accounting of the U.S. Industrial Economy**. [s.l.] World Resources Institute, 2008.

WU, H. et al. Cross-regional mobility of construction and demolition waste in Australia: An exploratory study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 156, p. 104710, maio 2020.

WUPPERTAL INSTITUTE. **Material Intensity of Materials, Fuels, Transport Services, Food**. Disponível em: <https://engineering.dartmouth.edu/~d30345d/courses/engs171/MaterialIntensity_WuppertalInstitute_2011.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2017.

YOSHIDA, K. et al. Material stock's overburden: Automatic spatial detection and estimation of domestic extraction and hidden material flows. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 123, p. 165–175, 1 ago. 2017.

YOUTUBE 1. **Receita concreto Fck 25 Mpa - traço de concreto**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=HE4nFEdZhRc>>.

YOUTUBE 2. **Receita concreto Fck 40 Mpa - traço de concreto.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=ZyZJvCKdXtE>>.

YOUTUBE 3. **Traço de concreto 25Mpa. Aprenda fazer o traço de concreto para vigas e pilares. JR-Construção.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=eh2w-62-hTY>>.

YOUTUBE 4. **Como fazer concreto fácil e rápido na betoneira.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=lggA-DHKnK0>>.

YOUTUBE 5. **Como fazer concreto (ou argamassa) utilizando betoneiras - Casa do construtor.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Vf0dthE2zAw>>.

YOUTUBE 6. **todos os traços Para Concreto.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=56NmT1upM3o>>.

YOUTUBE 7. **Aprenda calcular concreto de uma laje de forma fácil.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=XHdBEPisqkc>>.

YOUTUBE 8. **Traço receita de argamassa.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=-I7OyR8VeNY>>.

YOUTUBE 9. **Mãos à Obra - programa 7 - Preparo e aplicação das argamassas. Mãos a obra.** Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=r8GTT5Tf_EU&t=1001s>.

ZHANG, C.; CHEN, W.-Q.; RUTH, M. Measuring material efficiency: A review of the historical evolution of indicators, methodologies and findings. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 132, p. 79–92, 1 maio 2018.

ZINK, T.; GEYER, R.; STARTZ, R. Toward Estimating Displaced Primary Production from Recycling: A Case Study of U.S. Aluminum. **Journal of Industrial Ecology**, v. 22, n. 2, p. 314–326, 2018.

ANEXOS

Anexo 1 – Terminologia (comentada)

Existem várias definições para os diferentes conceitos de uso de recursos que dependem da abrangência (produção, consumo, fim de vida), tipo de produto, partes interessadas, entre outros. Tal situação limita o entendimento e aplicabilidade destes conceitos na indústria da construção. Com vista a uniformização seguidamente serão apresentados os conceitos usados neste trabalho que, na opinião do autor são aquelas que melhor se adequam ao contexto da construção.

1.1 Termos e definições

1.1.1 Hidden flow e uso de recursos

O conceito de *hidden flow* (ou estéril de mineração) refere-se à quantidade de material que deve ser removida para possibilitar o acesso ao minério desejado (EUROSTAT, 2018). O *hidden flow* não se torna insumo no processo produtivo ou de consumo, por exemplo: vegetação, solo, ou rochas que são estocados sem aproveitamento econômico. A metodologia de cálculo de MFA não considera este tipo de fluxo; apenas considera o uso de recursos independentemente se é resíduo ou de produto.

O uso de recursos corresponde aos materiais que contêm o mineral desejado, que é submetido a primeira etapa de processamento, também conhecido como *run-of-mine* (ROM) (EUROSTAT, 2018). É medido a partir do início do beneficiamento do mineral, e não inclui o *hidden flow*.

1.1.2 Rejeito de mineração

Corresponde a quantidade de resíduos que resulta das etapas de beneficiamento do mineral, tais como a geração de finos na produção de agregados ou rejeitos resultantes da lavagem da areia (GOODQUARRY, 2005; MITCHELL; MITCHELL; PASCOE, 2008).

1.1.3 Resíduo e perda

O resíduo pode ocorrer em diversas etapas do ciclo de vida de um produto – produção, aplicação, e fim de vida. Neste trabalho considerou-se resíduo qualquer material gerado que não seja o objetivo econômico processo produtivo (WEIDEMA, 2003). A norma Europeia (EN 15804, 2015) e a regra de categoria de produto do concreto (PCR, 2013) consideram que o estatuto de resíduo pode terminar e ser contabilizado como material secundário (ver item 1.1.4) quando o produto cumprir simultaneamente as seguintes condições: i) pode ser utilizado para fins específicos; ii) existe demanda de mercado; iii) cumpre com os requisitos técnicos e legais para o fim a que se destina; iv) não produz impactos negativos ao meio ambiente e saúde humana. O problema desta abordagem é que fica difícil quantificar quando existe ou não mercado. Por exemplo, no Brasil tem regiões onde toda a escória é consumida pela indústria cimenteira, e tem outras regiões onde sobra e não tem uso. Para facilitar o entendimento e aplicação, considera-se os materiais secundários tais como cinzas volantes, escória etc. como resíduos.

No caso da perda, este conceito contabiliza o consumo adicional de material que é incorporado nos edifícios e estruturas (FORMOSO et al., 2002). É medido comparando o consumo de recursos na construção (retirando os resíduos) em relação ao projeto.

1.1.4 Material primário (renovável e não renovável) e secundário

Material (ou substância) primária é qualquer material extraído diretamente da natureza e transformados em produtos. Por exemplo minério de ferro utilizado na fabricação de aço. Os recursos primários podem ainda ser divididos em renovável ou não renovável. O recurso não renovável é aquele que existe em quantidades finitas e não pode ser repostado numa escala de tempo humana. De forma análoga, o renovável refere-se ao recurso que é gerado e naturalmente acumulado numa escala de tempo humana (EN 15643-2, 2014). A mesma norma Europeia refere em nota que recursos renováveis podem ser esgotados, mas poderá durar infinitamente com uma gestão apropriada. Recursos renováveis apenas podem ser considerados como tal se a taxa de extração for compatível com a taxa de reposição do material, ou seja, deve ser garantido manejo ou gestão apropriada que garanta a

disponibilidade do recurso indefinidamente. Esta abordagem é compatível com outra norma Europeia (VDI 4800, 2016).

Material secundário é qualquer material recuperado de utilizações prévias ou de resíduos que substitui materiais primários (EN 15643-2, 2014). Adicionalmente para o setor da construção o resíduo gerado por uma empresa não deve ser contabilizado como material secundário caso ele seja usado na mesma cadeia produtiva, evitando promover a ineficiência. Por exemplo na produção de blocos de concreto ou cerâmico as perdas de processo não devem ser contabilizadas como material secundário. Esta abordagem é importante especialmente quando se pretende quantificar a circularidade ou taxas de reciclagem onde a empresa seria beneficiada por “aproveitar” os próprios resíduos na cadeia produtiva.

1.1.5 Reciclagem e reuso

A reciclagem é qualquer operação de recuperação³ através do qual os resíduos são reprocessados em produtos, materiais ou substâncias, quer para cumprir as finalidades originais, quer para outras (EN 15643-2, 2014). No entanto, se o material for utilizado em outras aplicações que não a original e que implique uma redução da qualidade inicial o termo *downcycling* é usualmente ser utilizado (WORRELL; ALLWOOD; GUTOWSKI, 2016). Caso seja utilizado em aplicações que não o produto inicial é usual o termo *open loop* (ex.: utilização da escória na produção de cimento).

O reuso (ou reaproveitamento) é qualquer operação em que produtos ou componentes que não são resíduos são novamente utilizados para o mesmo fim para o qual foram concebidos, ou para outras finalidades, sem serem reprocessados (EN 15643-2, 2014).

1.1.6 Fluxo de material direto e indireto

Os fluxos diretos correspondem a atual massa do material ou do produto e não contabiliza os materiais incorporados, ou seja, o consumo de recursos ao longo da cadeia produtiva

³ Operação de tratamento de resíduos que serve a finalidade de substituição de outros recursos para utilização.

não é considerado (FISHER-KOWALSKI et al., 2011). Os fluxos indiretos contabilizam todos os materiais necessários ao longo da cadeia produtiva na manufatura de produto. Podem incluir tanto os *hidden flows* como o *run-of-mine* (FISHER-KOWALSKI et al., 2011).

Nos casos de EW-MFA os fluxos indiretos estão associados as importações, por exemplo importação de aço (fluxo direto) gera rejeitos de mineração no país de origem (fluxos indiretos) (OECD, 2008). Na escala do produto não é tão simples a aplicação destes conceitos. No entanto, considerando a base conceitual, dependendo da etapa de produção pode ser direto ou indireto. Por exemplo, uso de calcário na produção de cimento é um insumo direto, porém na produção de concreto já pode ser considerado indireto pois a perda de massa do calcário no forno não é contabilizada no produto.

A Figura 28 esquematiza os conceitos abordados considerando uma perspectiva de ciclo de vida.

Figura 28 Esquema dos fluxos de materiais para os conceitos abordados neste capítulo numa abordagem cradle-to-grave ou cradle-to-cradle - desde a etapa de extração até ao fim de vida do produto. Adaptado de (GRAEDEL et al., 2011).

1.2 Indicadores de uso de recursos

1.2.1 Análise de fluxo de materiais (MFA)

É uma ferramenta metodológica que permite quantificar os fluxos de materiais, energia e água dentro de um determinado sistema ou processo (LUTTER; GILJUM; BRUCKNER, 2016). A Figura 29 ilustra um exemplo do uso da ferramenta MFA para quantificar as perdas de carbono na extração de madeira nativa da Amazônia (CAMPOS; JOHN, 2012). A Figura foi obtida diretamente no trabalho dos autores, apenas com intuito de exemplificar o conceito.

Figura 29 Exemplo de MFA para estimar as emissões de carbono na extração de madeira nativa na Amazônia. Imagem obtida em (CAMPOS; JOHN, 2012).

1.2.2 Pegada e consumo total de material

A pegada de material mede a quantidade de material necessário para produzir um determinado produto ao longo da sua cadeia de produção – desde extração do recurso até ao consumidor final (LUTTER; GILJUM; BRUCKNER, 2016). O *hidden flow* usualmente não é incluído (WIEDMANN et al., 2015). É baseado no consumo físico aparente e não leva em consideração onde material é consumido, ou seja, as importações e exportações não são contabilizadas (WIEDMANN et al., 2015). Muito embora os minerais usados na construção tendem a ser consumidos próximos do local de extração e usualmente não entram nos balanços comerciais entre países (UNEP, 2019b).

O consumo total de materiais é semelhante a pegada de materiais porém inclui o *hidden flow* associados aos materiais primários extraídos (BRINGEZU et al., 2004).

1.2.3 Eficiência de recursos e materiais

Em termos técnicos, eficiência de recursos significa aumentar a saída útil de fluxos (produtos) com menor fluxos de entrada (recursos) (UNEP, 2019a). Usualmente é medido em termos econômicos (produtividade) PIB/consumo de recursos. Porém, neste trabalho outra definição foi adotada: quociente entre a massa de produto e o consumo total de recursos (HUYSMAN et al., 2015).

A diferença materiais e de recursos, é que este último é mais amplo e incluir recursos materiais, energéticos, água, entre outros; enquanto materiais inclui apenas as típicas categorias de minérios metálicos, minerais não metálicos, biomassa e fósseis (ZHANG; CHEN; RUTH, 2018).

1.2.4 Desmaterialização

O conceito tem como finalidade utilizar menos materiais para fornecer o mesmo nível de funcionalidade ao usuário (CLEVELAND; RUTH, 1998). Por exemplo o uso de agregado leve permite reduzir a massa do concreto para o mesmo volume. Este indicador deve ser quantificado em massa. É expresso como a redução do consumo de materiais comparando com cenário de referência (WERNICK, 1994).

1.2.5 Circularidade

A circularidade mede a fração de materiais secundários, que não resultem do próprio processo produtivo incorporados no produto, ou renováveis (MORIGUCHI, 2007).

Somente materiais secundários de pós-uso e de diferentes cadeias produtivas podem ser contabilizados. A Figura 30, obtida diretamente no artigo de (MAYER et al., 2019), exemplifica o conceito de circularidade nos recursos minerais utilizando na União Europeia para o ano de 2014 utilizando o conceito de MFA. A circularidade dos produtos representa 11% nos minerais não metálicos (usualmente consumidos pelo setor da construção), biomassa e metais representam 90 e 67%, respetivamente.

Figura 30 Fluxo de materiais da UE para minerais não metálicos, minerais metálicos, biomassa e combustíveis fósseis. Unidade de massa: Gigatons (Gt). Imagem obtida em (MAYER et al., 2019).

Anexo 2 – Informações adicionais sobre o traço de concreto e argamassa e participação de mercado de vários setores na construção

Tabela 15 Traços de produção de concreto dosado em obra. Todos os traços, com exceção dos dois primeiros, foram obtidos em manuais de construção, relatórios técnicos e receitas do YouTube. Maioria dos traços são informados em volume, as seguintes densidades foram adoptadas: 1,25kg dm⁻³ para cimento, 1,20kg dm⁻³ para areia, e 1,45kg dm⁻³ para brita. De acordo com curva de Abrams da ABCP a resistência a compressão para esses traços se situa entre 12-35Mpa com mediana de 25Mpa.

Água	Cimento	Brita	Areia	Referência
196	372	1165	643	Informação de campo
195	323	989	819	Informação de campo
182	337	1144	728	(MÃOS A OBRA, 2011)
179	398	1142	687	(MÃOS A OBRA, 2011)
200	370	1159	640	(MÃOS A OBRA, 2011)
189	416	1083	703	(VACCHIANO, 2017)
192	320	1052	814	(SILVA, 1975)
217	362	890	874	(SILVA, 1975)
209	341	1122	678	(YOUTUBE 1, 2016, p. 1)
219	358	1122	635	(YOUTUBE 2, 2016, p. 2)
207	384	1103	664	(YOUTUBE 3, 2016, p. 3)
195	320	928	921	(YOUTUBE 4, 2017, p. 4)
173	401	1006	832	(YOUTUBE 5, 2016, p. 5)
196	340	1183	653	(YOUTUBE 6, 2017, p. 6)
196	389	1118	617	(YOUTUBE 7, 2016, p. 7)
182	337	1144	728	(CONSTRUTOR VIRTUAL, 2016)
200	370	1159	640	(CONSTRUTOR VIRTUAL, 2016)
179	398	1142	687	(CONSTRUTOR VIRTUAL, 2016)
159	295	1076	891	(SALGADO, 2009)
179	398	1142	687	(VOTORANTIM, 2017)
156	348	1180	751	(VOTORANTIM, 2017)
179	398	1142	687	(VOTORANTIM, 2017)
190	292	904	906	(BARBOZA; BASTOS, 2008)
188	329	905	871	(BARBOZA; BASTOS, 2008)
217	362	890	874	(BRANCO, 1967)
171	305	984	999	(RICCI; PEREIRA; AKASAKI,
191	374	966	906	(RICCI; PEREIRA; AKASAKI,
182	337	1144	728	(MONTES CLAROS, 2017)
200	370	1159	640	(MONTES CLAROS, 2017)
218	483	957	696	(MONTES CLAROS, 2017)

Tabela 16 Traços de produção de argamassa dosada em obra. Todos os traços, com exceção dos dois primeiros, foram obtidos em manuais de construção, relatórios técnicos e receitas do YouTube. Densidades adotadas iguais às do concreto, cal com 0,70 dm⁻³.

Água	Cimento	Cal	Areia	Referência
267	267	150	1538	Informação de campo
246	224	63	1717	(PUNHAGUI, 2014)
254	283	79	1628	(PUNHAGUI, 2014)
340	179	200	1372	(PUNHAGUI, 2014)
288	481	67	1385	(PUNHAGUI, 2014)
296	247	207	1421	(PUNHAGUI, 2014)
260	519	0	1495	(PUNHAGUI, 2014)
251	418	0	1604	(PUNHAGUI, 2014)
351	176	197	1348	(PUNHAGUI, 2014)
307	171	191	1473	(PUNHAGUI, 2014)
296	296	166	1421	(PUNHAGUI, 2014)
274	343	288	1316	(PUNHAGUI, 2014)
260	519	0	1495	(PUNHAGUI, 2014)
274	343	288	1316	(PUNHAGUI, 2014)
260	519	0	1495	(YOUTUBE 8, 2015, p. 8)
340	179	200	1372	(YOUTUBE 8, 2015, p. 8)
260	519	0	1495	(YOUTUBE 9, 2012, p. 9)
375	188	210	1261	(YOUTUBE 9, 2012, p. 9)
240	300	0	1730	(YOUTUBE 9, 2012, p. 9)
260	519	0	1495	(YOUTUBE 9, 2012, p. 9)
340	179	200	1372	(YOUTUBE 9, 2012, p. 9)
307	171	191	1473	(YOUTUBE 9, 2012, p. 9)
254	283	79	1628	(ENGENHEIRO NO CANTEIRO, 2015)
307	171	191	1473	(ENGENHEIRO NO CANTEIRO, 2015)
260	519	0	1495	(ENGENHEIRO NO CANTEIRO, 2015)
340	179	200	1372	(ENGENHEIRO NO CANTEIRO, 2015)
307	171	191	1473	(ENGENHEIRO NO CANTEIRO, 2015)
260	519	0	1495	(ENGENHEIRO NO CANTEIRO, 2015)
340	179	200	1372	(FAZFÁCIL, 2017)
246	224	63	1717	(FAZFÁCIL, 2017)
321	642	0	1232	(FAZFÁCIL, 2017)
260	519	0	1495	(FAZFÁCIL, 2017)
251	418	0	1604	(FAZFÁCIL, 2017)
307	171	191	1473	(FAZFÁCIL, 2017)
296	296	166	1421	(FAZFÁCIL, 2017)
286	260	146	1498	(FAZFÁCIL, 2017)
261	326	91	1564	(FAZFÁCIL, 2017)
251	418	0	1604	(FAZFÁCIL, 2017)
231	356	0	1707	(FAZFÁCIL, 2017)
260	519	0	1495	(CONSTRUIR BARATO, 2015)
251	418	0	1604	(CONSTRUIR BARATO, 2015)
307	171	191	1473	(CONSTRUIR BARATO, 2015)
240	300	0	1730	(CONSTRUIR BARATO, 2015)
234	234	0	1801	(CONSTRUIR BARATO, 2015)
307	171	191	1473	(CONSTRUIR BARATO, 2015)
254	283	79	1628	(CONSTRUIR BARATO, 2015)
286	260	146	1498	(CONSTRUIR BARATO, 2015)
277	347	97	1497	(CONSTRUIR BARATO, 2015)
251	418	0	1604	(CONSTRUIR BARATO, 2015)
231	356	0	1707	(CONSTRUIR BARATO, 2015)
240	300	0	1730	(SUA OBRA, 2013)
234	234	0	1801	(SUA OBRA, 2013)
307	171	191	1473	(SUA OBRA, 2013)
254	283	79	1628	(SUA OBRA, 2013)
286	260	146	1498	(SUA OBRA, 2013)
277	347	97	1497	(SUA OBRA, 2013)
260	519	0	1495	(PINI, 2013)
289	192	216	1478	(PINI, 2013)
637	255	0	734	(GUIMARÃES; GOMES; SEABRA, 2014)
307	171	191	1473	(GUIMARÃES; GOMES; SEABRA, 2014)
286	260	146	1498	(GUIMARÃES; GOMES; SEABRA, 2014)
307	171	191	1473	(GUIMARÃES; GOMES; SEABRA, 2014)
286	260	146	1498	(GUIMARÃES; GOMES; SEABRA, 2014)
281	469	131	1350	(GUIMARÃES; GOMES; SEABRA, 2014)
296	370	104	1421	(GUIMARÃES; GOMES; SEABRA, 2014)
286	260	146	1498	(GUIMARÃES; GOMES; SEABRA, 2014)
307	171	191	1473	(GUIMARÃES; GOMES; SEABRA, 2014)

Tabela 17 Consumo de materiais no Brasil e no setor da construção, e participação de mercado de cada um. Dados utilizados para definir os setores *foreground* e *background*.

Produto	Consumo total no Brasil (kt)	Consumo na construção (kt)	Participação de mercado (%)	Referências	Observações
Cimento	65.315	65.315	100%	(SNIC, 2019)	–
Areia	301.803	301.803	~100%	(BID; CETESB, 2017; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018) e estimativas de mercado	Os números oficiais da produção de agregados não são suficientes para suprir a demanda de materiais cimentícios. Foi utilizado o consumo de cimento como proxy para estimar estes valores. Setor industrial e agrícola não estão incluídos. De acordo com o <i>International Resource Panel</i> , cerca de 95% dos minerais não metálicos são consumidos pela indústria da construção.
Brita e filitos	240.963	240.963	~100%	(BID; CETESB, 2017; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018) e estimativas de mercado	
Cerâmica	148.195	148.195	100%	(MME, 2018)	Inclui cerâmica vermelha, revestimento e branca. Refratários não incluídos.
Gipsita	3.300	2.626	80%	(DNPM, 2016; USGS, 2019)	Inclui gipsita usada na produção de cimento e a fração calcinada utilizada em painéis de parede e produtos à base de gesso.
Cal	8.300	2.407	39%	(DNPM, 2016; USGS, 2019)	Inclui a cal para a produção de argamassas e a fração consumida na produção de aço que é utilizada no setor da construção.
Rochas ornamentais	7.250	5.800	80%	(ANPO, 2018b; MME, 2018)	–
Madeira	41.762	33.409	81%	(ACR, 2016; FAO, 2017)	Inclui madeira roliça, madeira serrada e painéis à base de madeira. A madeira usada na produção de celulose e combustíveis não estão incluídos, pois pertencem a diferentes mercados e, portanto, diferentes produtores de madeira. Foi adotado 50% do rendimento da serraria.
Aço	23.700	9.385	40%	(IABR, 2018; MME, 2017b; WORLDSTEEL, 2016)	–
Alumínio	1.309	198	15%	(ABAL, 2017; MME, 2017b)	–
Cobre	419	113	27%	(ABCOBRE, 2017; MME, 2017b)	–
Policloreto de vinila (PVC)	1.063	691	65%	(ABIPLAST, 2016; PVC INSTITUTE, 2018)	Como o PVC é o termoplástico mais consumido na construção foi apresentado separado dos demais (próxima linha).
Outros termoplásticos	5.750	903	16%	(ABIPLAST, 2016; PVC INSTITUTE, 2018)	Polímeros termoplásticos incluem PP, HDPE, LDPE, LLDPE, PET, PS, EPS, EVA e nylon. Sem incluir o PVC e a indústria de alimentos que é uma das principais indústrias do setor (~17%).

Produto	Consumo total no Brasil (kt)	Consumo na construção (kt)	Participação de mercado (%)	Referências	Observações
Zinco	182	19	11%	(DNPM, 2016; MME, 2017b)	–
Tintas	1.713	1.439	84%	(ABRAFATI, 2018)	Os valores originais são em volume, portanto a massa específica de 1,3 kg m ⁻³ foi adotada.
Vidro plano	1.788	1.162	65%	(ABRAVIDRO, 2016; AECWEB, 2016; CNQ, 2015)	–
Dióxido de titânio	210	109	52%	(DNPM, 2016; MME, 2017b)(MME 2010; DNPM 2016a)	No setor de construção, o dióxido de titânio é usado principalmente na produção de tintas.
Papel	9.165	302	~3%	(DAHLGREN; STRIPPLE, 2016; IBÁ, 2017; IRANI, 2018; SCRIVENER, 2014)	Não foram encontrados dados sobre o papel consumido pela construção civil brasileira. Massa típica de saco de papelão de cimento é 85 gramas (g) para 25kg de cimento e cerca de 70% do cimento brasileiro é despachado em sacos. Argamassa seca, gesso e cal foram considerados 100% embalados. Para revestimentos cerâmicos, louças sanitárias e janelas, foi adotada a gramatura de 330 g m ⁻² para embalagens.
Asfalto	2.407	2.407	100%	(ABEDA, 2018)	
Químicos	Sem dado	Sem dado	<8%	(ABIQUIM, 2015; CEFIC, 2018)	A indústria química fornece uma grande variedade de produtos para diversas indústrias. Não foram encontrados dados sobre o consumo de produtos químicos pela indústria da construção civil brasileira, mas de acordo com a literatura a participação mercado é entre 6 a 8%.
Outros metais	16	1	<5%	(DNPM, 2016; ILZSG, 2018; USGS, 2019)	Outros metais incluem chumbo, níquel e estanho. A participação no consumo é de 10% para chumbo e estanho e 5% para níquel.

Tabela 18 Análise do consumo de energia térmica e elétrica para a produção dos vários produtos de construção, e energia térmica usada no transporte. Dados utilizados para plotar a Figura 13. Unidades energéticas em toneladas equivalentes de petróleo (tep)

Produtos	Produção de produtos de construção		Energia para transporte de produtos (10 ³ tep)	Referências	Observações
	Energia térmica (10 ³ tep)	Energia elétrica (10 ³ tep)			
Cimento	3.817	618	379	(EPE, 2017; WBCSD, 2016)	–
Areia	357	4	1.752	(TAVARES; LAMBERTS, 2006; VENKATARAMA REDDY; JAGADISH, 2003)	–
Brita e outros minerais	734	129	1.399	(TAVARES; LAMBERTS, 2006; VENKATARAMA REDDY; JAGADISH, 2003)	–
Cerâmica	6.846	336	860	(EPE, 2017; MME, 2017b)	O mercado informal representa cerca de 36% da produção total, para um consumo de energia típico de 2,03 GJ t ⁻¹ .
Gipsita	160	3	16	(BID, 2013)(BID 2013)	–
Cal	507	22	22	(JUNIOR; PINHO, 2015)	–
Rochas ornamentais	117	31	34	(TAVARES; LAMBERTS, 2006)	
Madeira	1.664	341	420	(TAVARES; LAMBERTS, 2006)	–
Aço	3.390	339	54	(EPE, 2017; TAVARES; LAMBERTS, 2006)	85% reciclado e 15% de aço virgem.
Alumínio	118	168	1	(ABAL, 2017)	–
Cobre	120	83	1	(SCHEUER; KEOLEIAN; REPPE, 2003; TAVARES; LAMBERTS, 2006)	–
Policloreto de vinila (PVC)	812	308	4	(ECVM; PLASTICSEUROPE, 2005)	–
Outros termoplásticos	1.401	284	5	(PLASTICSEUROPE, 2005)	–
Zinco	19	5	~0	(BLEIWAS, 2011; TAVARES; LAMBERTS, 2006)	–
Tintas	2.011	233	8	(TAVARES; LAMBERTS, 2006)	–
Vidro plano	223	52	7	(JUNIOR; PINHO, 2015)	Na ausência da matriz energética, considerou-se gás natural como principal combustível.
Dióxido de titânio	–	–	–	–	Já contabilizado na produção de tintas.
Papel	387	61	2	(EPE, 2017)	–
Químicos	469	136	Sem dado	(EPE, 2017)	–
Outros metais	2	1	~0	(BLEIWAS, 2011; MME, 2017b; PANTAROTO, 2008; RANKIN, 2012)	–

Anexo 3 – Informações adicionais sobre estéril, rejeitos, e perdas em obra

Tabela 19 Estimativa de estéril e rejeitos para produção de cimento e agregados. Unidade: t t⁻¹ de produto vendável. Os finos de mineração foram estimados com base no pó de pedra. De acordo com as visitas técnicas existem dois tipos de pó de pedra: a primeira com granulometria entre 2,4 e 4,7mm é vendável e não é considerado como rejeitos, o segundo tipo apresenta uma granulometria variada, com menos 2,6 mm, que não é vendável e foi contabilizada como rejeito. Algumas pedreiras podem processar esse segundo tipo de pó de pedra e recuperar como areia artificial. Os resíduos gerados durante o processo de desmonte e transporte até ao britador primário não foram contabilizadas nas visitas técnicas.

Tipo de recurso		Visitas técnicas (2016)					Literatura brasileira			Literatura internacional				Mín.	Máx.	Mediana
		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	(D'AGOSTINO et al., 2005)	(J. MENDO, 2009a)	(FERREIRA; DAITX, 2003)	(GOODQUARRY, 2005)	(SAHU; DASH, 2011)	(ECOINVENT 3.2, 2015)	(KUMAR; HODSON, 1992)			
Estéril	Brita	–	–	–	0,30	0,10	–	0,10	–	0,11	–	0,36	–	0,10	0,36	0,11
	Areia	–	–	–	–	–	–	0,10	–	0,11	–	0,31	–	0,10	0,31	0,11
	Calcário para cimento	–	–	–	–	–	–	1,00	–	–	1,05	0,98	–	0,98	1,05	1,00
	Gipsita	–	–	–	–	–	–	1,00	–	–	–	0,01	–	0,01	1,00	0,50
	Argila	–	–	–	–	–	–	0,10	–	–	–	–	–	0,10	0,10	0,10
Rejeitos	Brita (finos de pedreira)	–	–	–	0,25	0,14	0,11-0,25	0,43	–	0,27	–	0,05	0,15	0,05	0,43	0,25
	Areia (fração silto-argisolsa)	0,23	0,25	0,18	–	–	–	–	0,25	0,25	–	0,21	–	0,18	0,25	0,24

Tabela 20 Variação dos coeficientes de estéril e rejeitos. Neste caso, a literatura agrega os coeficientes de estéril e rejeito num só. Unidade: t t⁻¹ de produto vendável.

Tipo de recurso	Literatura internacional			Min	Max.	Mediana
	(WUPPERTAL INSTITUTE, 2014)	(GAZLEY; FRANCIS, 2005)	(DOUGLAS; LAWSON, 2000)			
Brita	0.44	0.15	0.20	0.15	0.44	0.20
Areia	0.42	0.25	0.38	0.25	0.42	0.38
Areia (outros)	–	0.08	–	0.08	0.08	0.08
Gipsita	0.83	1.20	0.20	0.20	1.20	0.83
Argila	–	0.70	0.50	0.50	0.70	0.60

Figura 31 Histograma e parâmetros estatísticos utilizados para determinar a incerteza nas perdas de concreto na etapa de aplicação no canteiro de obra.

Figura 32 Histograma e parâmetros estatísticos utilizados para determinar a incerteza nas perdas de argamassa na etapa de aplicação no canteiro de obra.

Tabela 21 Quantificação das incertezas associadas ao uso de recursos - areia, brita, filitos, cal hidratada, cimento e água na produção de concreto e argamassa. A incerteza foi realizada considerando a variabilidade das perdas em obra, estéril, rejeitos e consumo de água. As perdas em obra um intervalo de confiança de 95% para a mediana foi utilizado; os demais indicadores valores máximos e os mínimos foram utilizados. A faixa de incerteza é apresentada em porcentagem, onde valores mais altos refletem uma maior eficiência. Foi considerado a propagação do erro ao longo do MFA para quantificar a causa-efeito de cada uma das incertezas estudadas, por exemplo: aumentando a perda em obra demanda mais recursos naturais na extração, e por conseguinte, gera mais resíduos e consome mais água.

Material usado	Produto	Consumo útil num metro cúbico (kg)	Total de fluxos (ou consume total de recursos) (kg)			Eficiência no uso de recursos (%)		
			Menor	Adotado	Maior	Menor	Adotado	Maior
Areia	Concreto dosado em obra	700	987	1,139	1.547	45%	61%	71%
	Concreto usinado	770	1.035	1,120	1.333	58%	69%	74%
	Argamassa dosada em obra	1.442	2.672	3,487	5.907	24%	41%	54%
	Argamassa industrializada	1.214	2.102	2,575	3.826	32%	47%	58%
Brita	Concreto dosado em obra	1.150	1.572	1,964	2.580	45%	59%	73%
	Concreto usinado	1.165	1.424	1,778	2.315	50%	66%	82%
Filitos	Argamassa dosada em obra	72	108	125	188	38%	57%	66%
Cal hidratada	Argamassa dosada em obra	17	69	81	105	18%	23%	27%
	Argamassa industrializada	14	56	65	85	18%	23%	27%
Cimento (calcário, argila, MCS, e outros materiais corretivos)	Concreto dosado em obra	350	839	867	900	39%	40%	42%
	Concreto usinado	285	695	718	743	38%	40%	41%
	Argamassa dosada em obra	259	816	954	1.232	21%	27%	32%
	Argamassa industrializada	239	753	880	1.137	21%	27%	32%
Água	Concreto dosado em obra	200	547	752	1.663	12%	27%	37%
	Concreto usinado	180	569	739	1.472	12%	24%	32%
	Argamassa dosada em obra	310	1,048	1,519	3.112	10%	20%	30%
	Argamassa industrializada	253	904	1,186	2.026	12%	21%	28%

Anexo 4 – Informações adicionais sobre eficiência no uso de material cimentícios

Figura 33 Eixo esquerdo indica o consumo de recursos naturais para produzir 1m³ de concreto e argamassa em obra e industrializado. Eixo direito a eficiência de cada recurso utilizado em porcentagem.