INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

Estudo da viabilidade de adição de cinzas sulfatadas geradas em usina termoelétrica a carvão em matrizes cimentícias

RAMIRO HIROITO DAS NEVES BIBIANO

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais.

Orientadora:
Profa. Dra. Denise Alves Fungaro

São Paulo
2021

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

Estudo da viabilidade de adição de cinzas sulfatadas geradas em usina termoelétrica a carvão em matrizes cimentícias

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

RAMIRO HIROITO DAS NEVES BIBIANO

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais.

Orientadora:
Profa. Dra. Denise Alves Fungaro

São Paulo
2021

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

Como citar:

HIROITO DAS NEVES BIBIANO, R. ***Estudo da viabilidade da adição de cinzas sulfatadas geradas em usina termoelétrica a carvão em matizes cimentícias***. 2021. 163 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: ‹http://repositorio.ipen.br/› (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

HIROITO DAS NEVES BIBIANO, RAMIRO
Estudo da viabilidade da adição de cinzas sulfatadas geradas em usina termoelétrica a carvão em matizes cimentícias / RAMIRO HIROITO DAS NEVES BIBIANO; orientadora DENISE ALVES FUNGARO. -- São Paulo, 2021.
163 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2021.

1. resíduo industrial. 2. matrizes cimentícias. 3. coproduto da combustão do carvão. 4. destinação sustentável de resíduos. 5. coprocessamento.. I. ALVES FUNGARO, DENISE, orient. II. Título.

DEDICATÓRIA

À minha pequenina, Elen, para quem me preparo e me aperfeiçoo todos os dias, a fim de apresentar seu futuro brilhante e de infinita felicidade. Que você possa atingir seus limites, e quando chegar neste limiar, ir sempre além, olhando para seus pares com o dever de ser a ajudadora que é. O universo é constituído de infinitas possibilidades, e eu espero que você possa sempre, com os desígnios do Altíssimo, caminhar nas sendas das escolhas, neste plano de existência, e nos outros, de forma segura e confiante. Que você possa fazer muito mais do que a capacidade que me foi concedida me conduziu, e que você seja guiada, protegida e amada em todos os momentos de sua vida.

Assim seja!

AGRADECIMENTOS

À Dra. Denise Alves Fungaro, por ter me trazido até esta porta, atravessá-la não foi uma tarefa fácil, mas estive certo e confiante de que teria uma excelente guia no caminho, e hoje sei que me encontro a um degrau acima do que estive antes, em todos os sentidos, meu sincero e fraterno agradecimento, à amiga de todas as horas, além de tudo, até mesmo do conhecimento.

À Sra. Rita Tissot, e à Coordenação de Processos, Meio Ambiente, Geração e Comercialização de Energia – ENGIE, da UTE Pampa Sul.

Ao Dr. Roberto Vicente, que forneceu todo o apoio para a realização dos ensaios no laboratório de caracterização do SEGRR.

Aos Drs. Júlio Takehiro, Ricardo Nunes, Dras. Marycel Cotrim e Maria Claudia, pela confiança e compreensão para que fosse possível a minha frequência nos laboratórios com toda cautela nestes tempos difíceis.

Ao Dr. João Ulrich e Marta Yoshiko, do Laboratório de Análises Química e Ambiental no CEQMA, pelo suporte nas análises realizadas.

A todo o corpo docente do IPEN, a quem pude recorrer a fim obter o conhecimento necessário para a realização deste trabalho.

Aos amigos do grupo de pesquisa Juliana Izidoro, Daniele Villarim, Lucas Grosche, Caio Miranda, Felipe Campello e Davi Melo, pelos poucos, mais importantes momentos em que estivemos juntos.

Ao Dr. Edgar Samúdio, pelo desafio lançado no início de tudo, aqui está mais um passo, adiante do que iniciamos *("la vida es acción, vívela!"*).

Ao MSc Mauro Valério, que me mostrou o caminho até o IPEN, tenho a certeza que continuaremos trabalhando juntos.

Ao Sr. Antoine Curti, a quem compartilhei e organizei os meus pensamentos, assim tive a certeza de que o que realmente procuramos, sempre esteve conosco o tempo todo, nem fora do país, tampouco nas coisas deste mundo.

E não menos importante, mas como destaque aqui, pois é a segurança e as bases de tudo: à minha família, pelos momentos que estive ausente, gratidão.

“Se escolhermos 10mil pessoas ao acaso, 99,9% possui algo em comum: seus interesses estão focados sobre ou perto da superfície da Terra. O que sobra é um astrônomo, um cientista, e um religioso, e poucos pertencem a essas raças estranhas”.

Martin J. Rees, o barão Rees de Ludlow – Inglaterra. TEDGlobal. 2005

(Parafraseado por Ramiro Hiroito)

RESUMO

BIBIANO, R. H. N. ***Estudo da viabilidade de adição de cinzas sulfatadas geradas em usina termoelétrica a carvão em matizes cimentícias***. 2021, 162f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN. São Paulo.

O cimento é um dos materiais mais fabricados no mundo. A indústria mundial de cimento é responsável por 5-7% das emissões antropogênicas de CO_2, portanto é um setor importante para estratégias de mitigação na emissão de CO_2. Uma solução para reduzir a pegada de carbono é substituir uma parte do cimento por resíduos sólidos. Um desses resíduos é o gesso de dessulfurização. O gesso de dessulfurização (FGD, do inglês *Flue Gas Desulfurization*) é um subproduto da purificação dos gases gerados após a combustão do carvão. Composto principalmente sulfato de cálcio, este resíduo é gerado em grandes quantidades e sua reciclagem é escassa, sendo geralmente disposto em aterros. No presente estudo, foi investigada a aplicação do gesso FGD em argamassas. As características físico-químicas do gesso FGD, areia comercial e cimento foram determinadas. As argamassas foram produzidas de acordo com as normas específicas e os corpos de prova moldados com cimento Portland CPII-F-32, areia e teores de 0% (referência), 25%, 50% e 75% de gesso FGD. Após tempos de cura de 1, 3, 7, 28 e 91 dias, os materiais cimentícios foram submetidos a ensaios para determinação de suas propriedades físico-químicas e mecânicas. A utilização do gesso FDG para a produção de matrizes cimentícias pode resultar em uma menor exploração de recursos naturais e estimular a economia circular, sendo uma forma de agregar valor à gestão dos resíduos industriais. O gesso FDG pode ser empregado para minimizar as emissões dos Gases do Efeito Estufa (GEE), associados ao setor da construção civil. Além disso, pode contribuir para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Palavras-chave: resíduo industrial, matrizes cimentícias, coproduto da combustão do carvão, destinação sustentável de resíduos, coprocessamento.

ABSTRACT

BIBIANO, R. H. N. ***Feasibility study of adding of sulfated ash generated in a coal-fired power plant in cement industry***. 2021, 162p. Dissertation (Master degree in Nuclear Technology) – Energy and Nuclear Research Institute – IPEN-CNEN. São Paulo.

Cement is one of the most manufactured materials in the world. The global cement industry account for at least 5-7% of anthropogenic CO_2 emissions, so it is an important sector for CO_2 mitigation strategies. An alternative to reduce the carbon footprint is to replace cement with solid waste. FGD gypsum is a by-product on the purification system of gases generated after the coal combustion. Composed mainly of calcium sulfate, this waste is generated in large quantities and its recycling is scarce, being generally disposed of in landfills. In the present study, the application of FGD gypsum in mortars was investigated. The physicochemical characteristics of FGD gypsum, commercial sand and cement were determined. The mortars were produced according to specific standards and the specimens were molded with Portland cement CPII-F-32, sand and contents of 0% (reference), 25%, 50% and 75% replacement by FGD gypsum. After curing times of 1, 3, 7, 28 and 91 days, the cementitious materials were subjected to tests to determine their physicochemical and mechanical properties. The use of FDG gypsum for the production of cement matrices can result in less exploitation of natural resources and stimulate the circular economy, being a way to add value to the management of industrial waste. FDG gypsum can be used to minimize Greenhouse Gas (GHG) emissions associated with the civil construction sector. Furthermore, it can contribute to the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs).

Key words: industrial waste, cement industry, coal combustion products, sustainable waste management, co-processing.

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1: Emissões de GEE combustíveis fósseis 27
Tabela 2: Emissão de GEE na geração elétrica.....28
Tabela 3: Empreendimentos em construção no Brasil.....28
Tabela 4: Consumo por região no Brasil 28
Tabela 5: Consumo por setor no Brasil 29
Tabela 6: Fluxo de produção/consumo de carvão mineral 32
Tabela 7: Centrais termoelétricas a carvão mineral no Brasil 33
Tabela 8: Centrais termelétricas de autoprodução no Brasil.....33
Tabela 9: Empreendimentos previstos para operação 33
Tabela 10: Consumo de carvão na indústria cimentícia Brasileira 65
Tabela 11: Consumo de carvão na indústria cimentícia Brasileira 65
Tabela 12: Principais compostos do cimento 69
Tabela 13: Composição aproximada do clínquer no cimento.....70
Tabela 14: Abreviações dos principais óxidos no cimento.....70
Tabela 15: Siglas e classes do cimento Portland.....72
Tabela 16: Limites de composição do cimento Portland 72
Tabela 17: Requisitos químicos do cimento Portland 73
Tabela 18: Produtos da hidratação do cimento Portland 77
Tabela 19: Frações granulométricas da areia normalizada.....97
Tabela 20: Classificação da areia pelo módulo de finura.....97
Tabela 21: Quantidades para moldagem dos corpos de prova padrão.....103
Tabela 22: Idades de ruptura das matrizes.....107
Tabela 23: Características do cimento segundo boletim técnico.....110
Tabela 24: Composição química do cimento.....111
Tabela 25: Ensaios físicos e mecânicos no cimento 113
Tabela 26: Índice de finura no cimento 114
Tabela 27: Massa específica no cimento 115

Tabela 28: Composição química no FGD.....117
Tabela 29: Anidridos sulfuroso e carbônico no FGD.....118
Tabela 30: Teores de umidade no FGD 118
Tabela 31: Índice de finura no FGD 119
Tabela 32: Massa específica no FGD 119
Tabela 33: Atividade pozolânica com cal aos 7 dias 122
Tabela 34: Índice de desempenho do FGD com cimento 123
Tabela 35: Teores de umidade na areia comercial.....126
Tabela 37: Granulometria na areia comercial - duplicata 127
Tabela 38: Quantidade de materiais para pasta de consistência normal.....128
Tabela 39: Tempos de início e fim de pega.....130
Tabela 40: Volume de materiais para moldagem dos corpos de prova 131
Tabela 41: Quantidade de materiais para moldagem dos corpos de prova.132
Tabela 42: Resistência à compressão - CP de referência 133
Tabela 43: Resistência à compressão – 25% de FGD.....133
Tabela 44: Resistência à compressão – 50% de FGD.....133
Tabela 45: Resistência à compressão – 75% de FGD.....134
Tabela 46: Fases cristalográficas dos CP00, 25, 50 e 75.....142
Tabela 47: Concentração dos íons metálicos no extrato lixiviado 142
Tabela 48: Concentração dos íons metálicos no extrato solubilizado.....143
Tabela 49: Concentração de sulfatos no extrato solubilizado 143

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1: Pirâmide etária brasileira 2018 20
Figura 2: Pirâmide etária brasileira 2028 20
Figura 3: Pirâmide etária brasileira 2038 21
Figura 4: Pirâmide etária brasileira 2048 21
Figura 5: Projeção de taxa bruta de natalidade e mortalidade no Brasil 22
Figura 6: Geração elétrica mundial por setores 2016 (%) 24
Figura 7: Geração elétrica mundial – 10 maiores países 2016 (%) 24
Figura 8: Geração elétrica no Brasil por setores 2016 (%).....25
Figura 9: Geração elétrica regional no Brasil 2016 (%) 26
Figura 10: Consumo elétrico mundial – 10 maiores países 2016 (%).....26
Figura 11: Perfil esquemático de uma usina termoelétrica a carvão 30
Figura 12: Geração elétrica a carvão no mundo – 10 maiores países.....31
Figura 13: Tecnologias disponíveis no futuro próximo.....40
Figura 14: Classificação dos processos FGD 44
Figura 15: Sistema típico de processo FGD seco 45
Figura 16: Sistema típico de processo FGD CDS/CFB semi-seco.....46
Figura 17: Sistema típico de processo FGD SDA semisseco 47
Figura 18: Sistema típico de processo FGD LSFO úmido.....49
Figura 19: Sistema típico de processo SWFGD água do mar 50
Figura 20: Aterro UTE Figueira 53
Figura 21: Aterro da termoelétrica de Hualien - Taiwan 53
Figura 22: Disposição em barragem de rejeito.....54
Figura 23: Barragem da termoelétrica Qingdao – China 55
Figura 24: Bacias de cinzas úmidas.....55
Figura 25: Tanque de decantação de cinzas - UTE Charqueadas 56
Figura 26: Área de recuperação da mina de Candiota.....56
Figura 27: Hierarquia do manejo de resíduos sólidos.....58

Figura 28: Fluxo da fabricação do cimento 64
Figura 29: Projeção da produção de cimento no Brasil 66
Figura 30: Indicadores econômicos e produção de cimento no Brasil.....67
Figura 31: Mecanismo de hidratação dos grãos de cimento 78
Figura 32: Mecanismo de hidratação dos grãos de cimento 79
Figura 33: Fluxograma da metodologia 82
Figura 34: Materiais para ensaio de índice de finura do cimento 84
Figura 35: Preparação do frasco de Le Chatelier.....86
Figura 36: Banho termorregulador 86
Figura 37: Medição do líquido deslocado.....87
Figura 38: Difratômetro de raios X 88
Figura 39: Amostras de cimento para difração de raios X 89
Figura 40: Secagem das amostras FGD verificação do teor de umidade 91
Figura 41: Segregação das amostras FGD 92
Figura 42: Peneiramento do FGD para ensaio de índice de finura 93
Figura 43: Peneiramento das amostras de areia comercial 96
Figura 44: Frações granulométricas da areia comercial 96
Figura 45: Ensaio de massa específica (método do frasco Chapman) 98
Figura 46: Aparelho Vicat para determinação da consistência da pasta.....100
Figura 47: Ensaio de determinação da pasta de consistência normal.....100
Figura 48: Ensaio de determinação dos tempos de pega 102
Figura 49: Moldes para ensaio de ruptura 103
Figura 50: Moldes para ensaios complementares 104
Figura 51: Cura dos prismas para ensaios complementares.....105
Figura 52: Mesa para ensaio de consistência das argamassas.....105
Figura 53: Corpos de prova para ensaio de ruptura 106
Figura 54: Ensaio de ruptura dos corpos de prova 107
Figura 55: Preparação das amostras para difração de raios X.....108
Figura 56: Preparação das amostras para difração de raios X.....109
Figura 57: Difratograma das fases encontradas no cimento 116
Figura 58: Primeiro ensaio de atividade pozolânica - moldagem.....120
Figura 59: Endurecimento da pasta no ensaio de abatimento.....121
Figura 60: Segundo ensaio de atividade pozolânica - moldagem 121
Figura 61: Primeiro ensaio de atividade pozolânica - desmoldagem.....122

Figura 62: Segundo ensaio de atividade pozolânica - desmoldagem 123
Figura 63: Difratograma das fases encontradas no FGD 124
Figura 64: Difratograma do FGD comparado com o hidróxido de cálcio 125
Figura 65: Pasta do ensaio de consistência com 50 % de FGD.....129
Figura 66: Pasta do ensaio de consistência com 75 % de FGD.....129
Figura 67: Evolução do tempo de pega – amostra CP00.....130
Figura 68: Evolução do tempo de pega – amostra CP75.....130
Figura 69: Determinação de tempo de pega – 75 % de FGD 131
Figura 70: Mesa para ensaio de abatimento com o ensaio CP00 132
Figura 71: Distribuição de carga no cilindro 135
Figura 72: Difratograma dos CP de referência com 1, 3, 7, 28 e 91 dias.....136
Figura 73: Difratograma dos CP de 25% FGD com 1, 3, 7, 28 e 91 dias 136
Figura 74: Difratograma dos CP de 50% FGD com 1, 3, 7, 28 e 91 dias 137
Figura 75: Difratograma dos CP de 75% FGD com 1, 3, 7, 28 e 91 dias 137
Figura 76: Difratograma qualitativo dos CP aos 28 dias 139
Figura 77: Difratograma quantitativo do CP00 aos 28 dias.....139
Figura 78: Difratograma quantitativo do CP25 aos 28 dias.....140
Figura 79: Difratograma quantitativo do CP50 aos 28 dias.....140
Figura 80: Difratograma quantitativo do CP75 aos 28 dias.....141

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
ACAA	*American Coal Ash Association* (Associação Americana de Cinzas de Carvão)
AFt	Alumina trisulfato – Etringita (CAS'Ht)
AFm	Alumina/Ferrita Monocálcico – Monosulfato (CAS'Hm)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	*American Society for Testing and Materials* (Associação Americana para Testes e Materiais)
CAS'Ht	Alumina trisulfato – Etringita
CAS'Hm	Alumina/Ferrita Monocálcico – Monosulfato
CEQMA	Centro de Química e Meio Ambiente
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CCS	*Carbon Capture and Storage* (Captura e Estocagem de Carbono)
CCT	*Clean Coal Technologies* (Tecnologias de Carvão Limpo)
CDS	*Circulating Dry Scrubber* (Lavadores a Seco)
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CFBC	*Circulating Fluidized Bed Combustion* (Combustão por Leito Fluidizado)
CH	Hidróxido de cálcio – Portlandita
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia
COD	*Cristalography Open Database* (Banco de Dados Cristalofráficos)
COPEL	Companhia Paraense de Energia Elétrica
CP	Corpo de Prova
CSH	Silicato de Cálcio Hidratado
CS'H ou CŠH	Sulfato de Cálcio Hidratado – Gesso
CSI	Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento
CSL	Cinzas Sulfatadas Leves

CSP	Cinzas Sulfatadas Pesadas
C_3S	Silicato tricálcico - Alita
C_2S	Silicato dicálcico - Belita
C_3A	Aluminato tricálcico - Celita
C_4AF	Ferroalumitato tetracálcico - Ferrita
DRX	Difração de Raios X
ECOBA	*European Coal Combustion Products Association* (Associação Europeia de Produtos da Combustão de Carvão)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FGD	*Flue Gas Desulfutization* (Resíduo, gesso de dessulfurização de gases)
FRX	Fluorescência de Raios X
FSS	*Fixated Scrubber Solids* (Sólidos de Fixos Depurados)
GEE	Gases do Efeito Estufa
HELE	*High Efficiency Low Emissions Technology* (Tecnologias de Alta Eficiência e Baixas Emissões)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICDD	*International Centre for Difracrion Data* (Centro Internacional de dados de Difração)
IEA	*International Energy Agency* (Agência Internacional de Energia)
IFC	*International Finance Corporation* (Corporação Financeira Internacional)
IGCC	*Integrated Gasification Combined Cycle* (Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado)
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO	*International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização)
LAQA	Laboratório de Análises Química e Ambiental
LSFO	*Limestone Forced Oxidation* (Oxidação Forçada de Calcário)
MF	Módulo de Finura
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora

NIST:	*National Institute of Standards and Technology* (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia)
NOx	Óxidos de nitrogênio
NSP	*New Suspension Pre-heater and Pre-calciner* (Reutilização de Resíduos Pré-calcinados)
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PCC	Produto da Combustão do Carvão
PF	Perda ao Fogo
PGRS	Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos
PNRS	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
RI	Resíduo Insolúvel
SDA	*Spray Dry Absorber* (Sistemas de Absorção por Spray)
SEGRR	Serviço de Gestão de Rejeitos Radioativos
SI	*Sorbent Injection* (Injeção de Sorvente)
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SOx	Óxidos de enxofre
SWFGD	*Seawater Flue Gas Desulfurization* (Dessulfurizador com água do mar)
tep	Tonelada equivalente de petróleo
UTE	Usina Termoelétrica
WBCSD	*World Business Council For Sustainable Development* (Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável)
WHR	*Waste Heat Recovery* (Recuperação de Resíduos Calcinados)

SUMÁRIO

Página

1 INTRODUÇÃO **16**

2 OBJETIVOS **18**

2.1. Objetivo geral **18**

2.2. Objetivos específicos **18**

3 REVISÃO DA LITERATURA **19**

3.1. A demanda de energia **19**

3.2. A energia termoelétrica **29**

3.3. O carvão mineral **30**

3.4. Resíduos provenientes da queima do carvão mineral **33**

3.5. Impactos ambientais na utilização do carvão mineral **38**

3.6. Sistemas de dessulfurização de gases **42**

3.6.1. Eficiência e subprodutos **50**

3.6.2. Disposição dos resíduos das termoelétricas **52**

3.6.3. Aspectos legais **57**

3.7. Cimento e matrizes cimentícias **62**

3.7.1. Definição **62**

3.7.2. Produção **64**

3.7.3. Cenário atual do mercado de cimento no Brasil **65**

3.7.4. Estrutura e composição química do cimento **68**

3.7.5. Tipos de cimento **71**

3.7.6. Hidratação dos componentes do clínquer **74**

3.7.7. Hidratação dos cimentos Portland **76**

3.8. Reaproveitamento de resíduos na construção civil **79**

4 METODOLOGIA **81**

4.1. Materiais **81**

4.2. Métodos **81**

4.3. Cimento Portland **82**

4.3.1. Caracterizações químicas **82**

4.3.1.1. Informações em relatório técnico 82
4.3.1.2. Determinação de perda ao fogo 82
4.3.1.3. Análise química quantitativa por fluorescência de raios X 83
4.3.1.4. Determinação de óxido de cálcio livre (CaO livre) 83
4.3.1.5. Determinação de resíduo insolúvel 83
4.3.1.6. Determinação de anidrido sulfuroso 83
4.3.1.7. Determinação de anidrido carbônico 83
4.3.2. Caracterizações físicas 83
4.3.2.1. Determinação do índice de finura por peneiramento 84
4.3.2.2. Determinação da massa específica 85
4.3.3. Caracterização mineralógica 87
4.4. FGD 90
4.4.1. Caracterizações químicas 90
4.4.1.1. Determinação de perda ao fogo 90
4.4.1.2. Análise química quantitativa por fluorescência de raios X 90
4.4.1.3. Determinação de óxido de cálcio livre (CaO livre) 90
4.4.1.4. Determinação de resíduo insolúvel 91
4.4.1.5. Determinação de anidrido sulfuroso 91
4.4.1.6. Determinação de anidrido carbônico 91
4.4.1.7. Determinação do teor de umidade 91
4.4.2. Caracterizações físicas 92
4.4.2.1. Determinação do índice de finura por peneiramento 92
4.4.2.2. Determinação da massa específica 93
4.4.3. Caracterizações físico-químicas 93
4.4.3.1. Determinação da atividade pozolânica 93
4.4.3.2. Determinação do índice de desempenho 94
4.4.4. Caracterização mineralógica 95
4.5. Agregado Miúdo 95
4.5.1. Caracterização química 95
4.5.2. Caracterizações físicas 95
4.5.2.1. Análise granulométrica 95
4.5.2.2. Determinação do módulo de finura (MF) 97
4.5.2.3. Determinação do diâmetro máximo da areia comercial 97
4.5.2.4. Classificação da areia comercial 97

4.5.2.5. Determinação da massa específica **97**
4.6. Matrizes cimentícias **99**
4.6.1. Caracterizações no estado fresco **99**
4.6.1.1. Determinação da pasta de consistência normal **99**
4.6.1.2. Determinação dos tempos de pega **101**
4.6.1.3. Moldagem dos corpos de prova **102**
4.6.1.4. Preparação das câmaras de controle e cura **106**
4.6.2. Caracterizações no estado endurecido **107**
4.6.2.1. Ensaios de resistência mecânica **107**
4.6.2.2. Caracterização mineralógica **108**
4.6.2.3. Ensaio de lixiviação e solubilização **109**
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES **110**
5.1. Cimento Portland **110**
5.1.1. Caracterizações químicas **110**
5.1.2. Caracterizações físicas **113**
5.1.3. Caracterização mineralógica **115**
5.2. FGD **116**
5.2.1. Caracterizações químicas **116**
5.2.2. Caracterizações físicas **118**
5.2.3. Caracterizações físico-químicas **120**
5.2.4. Caracterização mineralógica **124**
5.3. Agregado miúdo **125**
5.3.1. Caracterização química **125**
5.3.2. Caracterizações físicas **126**
5.4. Matrizes cimentícias **128**
5.4.1. Caracterizações no estado fresco **128**
5.4.2. Caracterizações no estado endurecido **133**
6 CONCLUSÕES **144**
6.1. Sugestões para trabalhos futuros **146**
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **148**

1 INTRODUÇÃO

Por força de Lei, seguindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, todos os produtores nacionais e geradores de economias estão obrigados a elaborar seus respectivos planos de sustentabilidade ecológica, no tocante à destinação de seus resíduos gerados, quer seja decorrente dos processos de transformação de matéria na fabricação de produtos, quer seja da responsabilidade no processamento retornável dos produtos finais.

Como mencionado no Atlas de Energia Elétrica do Brasil referente ao século XX, a produção de energia a partir de combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão mineral, sustentou o crescimento econômico, e inúmeras transformações mundiais; no século atual, o cenário foi colocado à prova por uma nova realidade: a necessidade do desenvolvimento sustentável (ANEEL, 2008).

Em contrapartida, o desenvolvimento econômico humano vem tomando proporções elevadas nas últimas décadas, ao que tange os avanços da tecnologia científica, o que proporciona um aumento exponencial na demanda de produtos e serviços imediatos não naturais, a fim de suprir as necessidades da população, tanto para sobrevivência coletiva essencial, quanto para a vida individual.

Uma enorme quantidade de energia é requerida para que a humanidade mantenha seu ritmo. Dentre as mais utilizadas, a energia elétrica possui três principais matrizes: petróleo, hídrica e carvão. O carvão mineral é uma fonte de energia pouco explorada no Brasil. As termoelétricas a carvão produzem 4,45% do total de energia elétrica, com projeção para 5,35% até 2023. De 32,3 bilhões de toneladas de carvão, o Rio Grande do Sul possui cerca de 89% no país (CIENTEC, 2016).

Algumas termoelétricas do Brasil implantaram a tecnologia de combustão de carvão por leito fluidizado. Este tipo de combustão reduz as emissões de NO_x, e também dos gases sulfurosos SO_x, por meio da inserção de calcário em seu sistema.

No Brasil, até 2016, o total geral de resíduos derivados da queima de carvão esteve na ordem de 4,7 milhões de toneladas anuais (CIENTEC, 2016).

Grandes emissões de CO_2 são encontradas na produção do cimento. Estima-se que para 1 t de clínquer, são gerados 500 kg de CO_2 para calcinação de 1 t de calcário, além do CO_2 gerado pela queima de combustíveis fósseis (NOGUEIRA, 2011).

A indústria cimentícia é a maior consumidora de gipsita, na qual o consumo é de 3-5 % em massa, que é adicionado ao clínquer. (CAILLAHUA, 2017).

Este trabalho visa avaliar o uso dos resíduos que são provenientes da queima do carvão mineral nas termoelétricas, acrescentando-o como coproduto nas matrizes cimentícias, reduzindo o impacto ambiental de duas indústrias, a saber: de emissão de CO_2 nas indústrias cimenteiras e a disposição de resíduo das termoelétricas no meio ambiente.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho foi o desenvolvimento de processo para a utilização do gesso FGD gerado em usina termoelétrica a carvão em substituição parcial ao cimento Portland na produção de matrizes cimentícias.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar as características físicas e químicas dos materiais que compõem as matrizes cimentícias: gesso FGD, areia comercial e cimento;
- Produzir argamassas de acordo com as normas específicas;
- Modelar corpos de prova cilíndricos com traços de cimento Portland CPII-F-32, areia em teores de 0% (referência), 25%, 50% e 75% de gesso FGD;
- Submeter os materiais cimentícios a ensaios para determinação de suas propriedades físico-químicas e mecânicas após tempos de cura de 1, 3, 7, 28 e 91 dias.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1. A demanda de energia

O desenvolvimento tecnológico e econômico, está diretamente ligado à demanda de energia que permeia os processos revolucionários, e é exatamente este tema que atinge diretamente os indicadores econômicos e o nível de qualidade de vida de uma sociedade.

A capacidade de suprimento da demanda de energia determina quão preparada e evoluída tecnológica e economicamente uma determinada sociedade se encontra, pois afeta o do ritmo da atividade industrial, comercial e de serviços, permitindo à população aumentar sua capacidade de aquisição de bens.

Dentre os principais bens que demandam mais energia, estão os automóveis (elétricos ou movidos à combustão), os eletrodomésticos e os eletroeletrônicos, que exigem fácil acesso ao fornecimento de suprimento (nos dois casos pelas redes elétricas e pelos postos de gasolina).

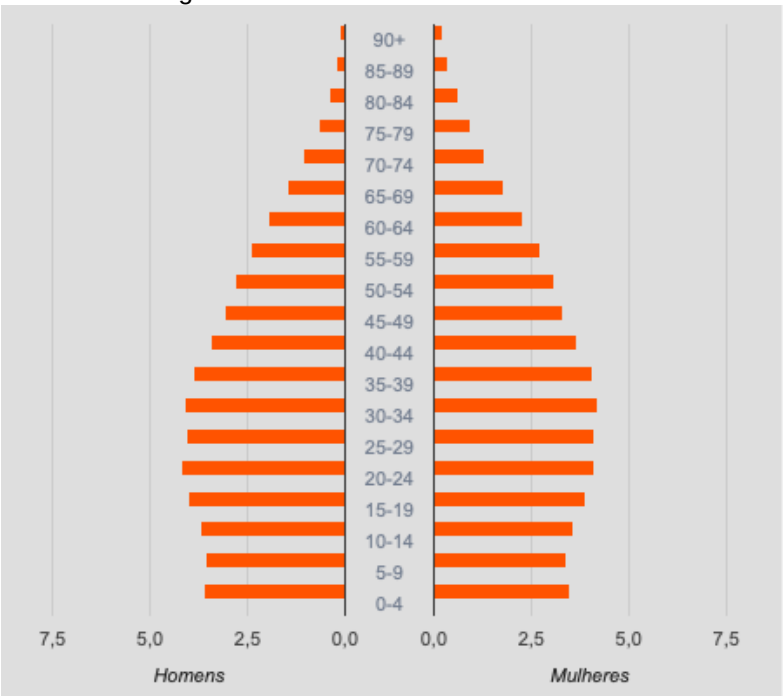
Estes fatores apresentados são apenas uma parte da demanda cotidiana individual, pois também há de se considerar as atividades coletivas (a exemplo de shopping, hospitais e centrais ou equipamentos de telecomunicação) e especulativas (a demanda de centros de pesquisas, indústrias e atividades de desenvolvimento tecnológico).

Quanto maior a disponibilidade de se qualificar o ambiente em que se vive às necessidades humanas, mais propenso o ser humano é para sua reprodução, e o aumento demográfico requer que adaptemos ainda mais o ambiente ao nosso entorno, para torná-lo favorável à sobrevivência.

Pode-se observar nas Figuras 1 a 5, que a situação demográfica nacional nos próximos trinta anos é de estabilidade, deixando a forma triangular emergente para a retangular desenvolvida, concluindo-se que, embora a tendência de diminuição da taxa de natalidade, haverá o aumento da perspectiva de vida da população, sabendo-se que na projeção transitória de modelo econômico e social há uma transformação na proporcional na demanda tecnológica, pode-se prever

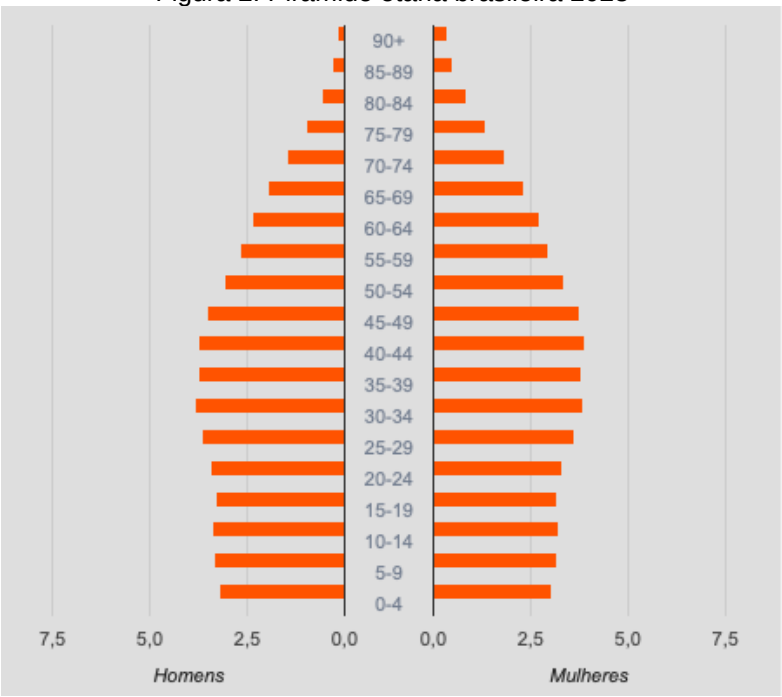
que haverá uma maior exigência na capacidade nacional de produção de energias suficientes para suprir a demanda prevista.

Figura 1: Pirâmide etária brasileira 2018



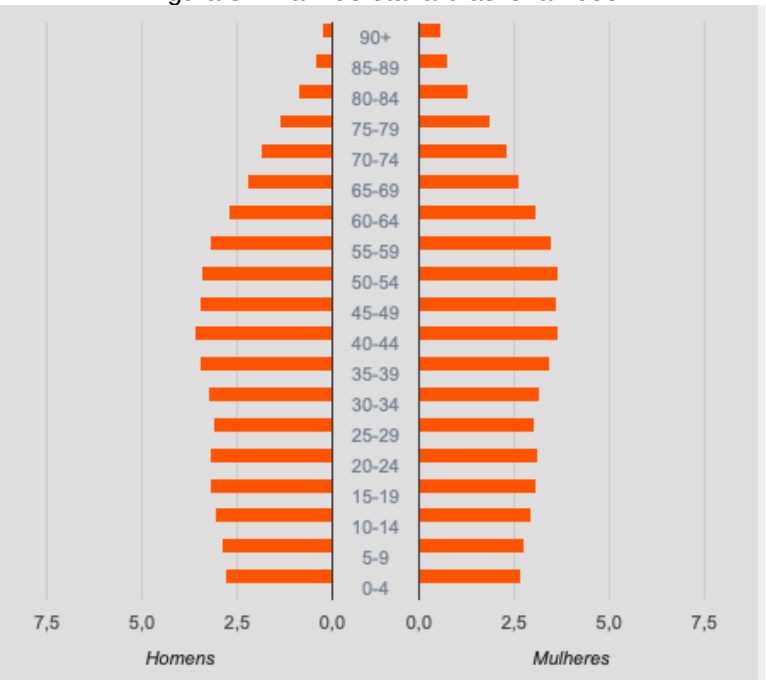
Fonte: IBGE, 2018

Figura 2: Pirâmide etária brasileira 2028



Fonte: IBGE, 2018

Figura 3: Pirâmide etária brasileira 2038

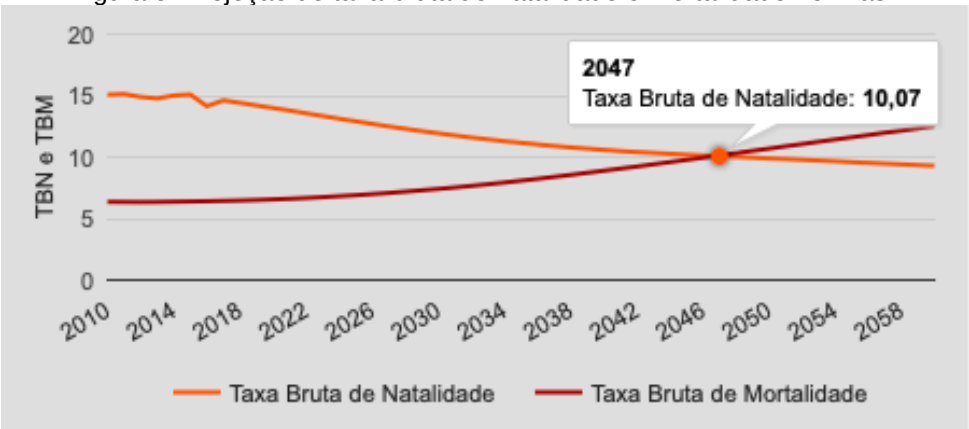


Fonte: IBGE, 2018

Figura 4: Pirâmide etária brasileira 2048

Fonte: IBGE, 2018

Figura 5: Projeção de taxa bruta de natalidade e mortalidade no Brasil



Fonte: IBGE, 2018

Não apenas com a demanda populacional de energia, mas também com a evolução tecnológica, que solicita cada vez mais energia na produção de equipamentos ainda mais sofisticados, como por exemplo as industrias montadoras, que utilizam a mão de obra mecanizada robótica em sua maior parte.

As indústrias 4.0 que automatizam quase que cem por cento de sua mão de obra, os próximos trinta anos serão de relevante importância para as decisões quanto ao futuro energético, que se reflete no planeta como um todo, e em todo seu sistema ecológico autômato.

Nos dias atuais, a demanda exponencial no suprimento de energia requer que iniciemos a adaptação para a destinação dos resíduos resultantes da produção em massa destas energias, a fim de diminuir os impactos no próprio meio que se desenvolve.

As duas soluções mais viáveis serão a adoção de novos meios de obtenção de energia (pelas frentes especulativas de pesquisas tecnológicas) e no reaproveitamento e destinação dos subprodutos provenientes de outros processos.

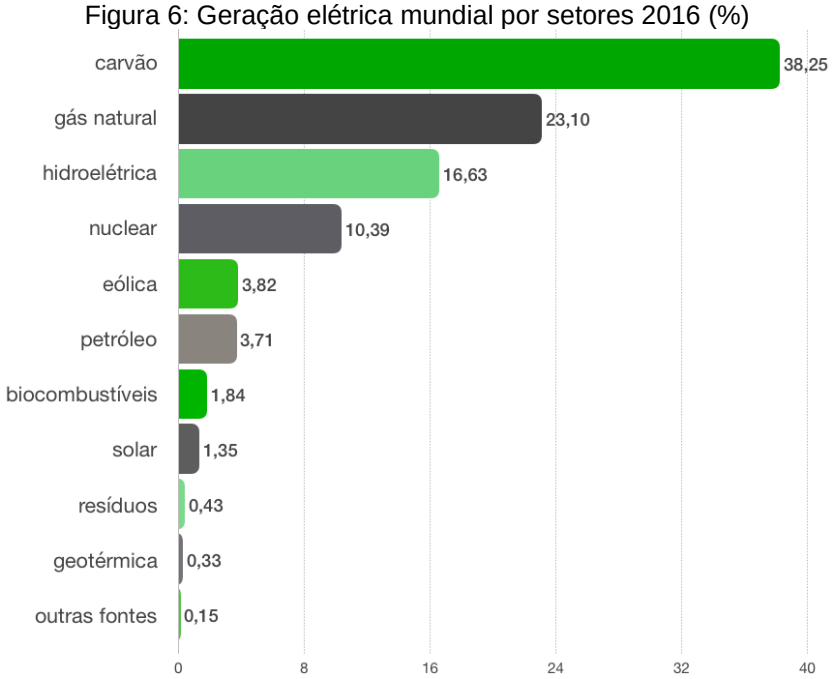
Segundo Anuário Estatístico de Energia Elétrica (EPE, 2017), a Agência Internacional de Energia Elétrica (IEA, 2018) e relatório do Ministério de Minas e Energia (MME, 2017), foram destacados, quanto ao cenário de energia no mundo em 2016 que:

- O mundo consumiu 96,6 Mbbl/d (milhões de barris de petróleo por dia), com crescimento decenal de 12,6%, e equivalentes a 44 vezes o consumo do Brasil;
- A capacidade instalada de refino estava em 97,4 Mbbl/d de petróleo;

- O consumo de carvão mineral foi de 3.732 Mtep (milhões de toneladas equivalentes de petróleo), com 13,3% de aumento nos últimos 10 anos (20,8% decênio anterior), e equivalente a 234 vezes o consumo do Brasil;
- A demanda total de energia no mundo foi de 13.729 Mtep (81,6% de combustíveis fósseis), equivalentes a 48 vezes a demanda brasileira, está com apenas 55,1%;
- Dos 13.729 Mtep consumidos no mundo, 32,0% foram de petróleo, 27,5% de carvão mineral, 21,8% de gás natural, 5,0% de energia nuclear, 2,5% de energia hidráulica e 11,2% de outras fontes não especificadas. As fontes renováveis somaram 13,7%, contra o indicador de 43,5% verificado no Brasil;
- 36,1% da demanda mundial de energia, correspondentes a 4.950 Mtep, foram destinados à geração de energia elétrica, resultando em 24973 TWh ofertados e 2.850 Mtep de perdas térmicas;
- A matriz mundial de geração elétrica (Figura 6) contou com o acréscimo de 2,9% e alcançou 25082 TWh. Em termos de produção, foram contabilizados 67,3% do total de produção bruta de eletricidade (na qual: 65,1% de combustíveis fósseis (subdivididos com 38,5% de carvão mineral, 22,8% de gás, 4,0% de óleo) e 2,3% de biocombustíveis e resíduos), as fontes hidroelétricas (incluindo armazenamento bombeado) forneceu 16,2%, energias nucleares 10,4%, geotérmicas, solares, eólicas e outros recursos 5,6%.
- O mundo emitiu 32.320 Mt de CO_2, mostrando indicador de 2,35 tCO_2 por tep de energia consumida, indicador um pouco inferior ao verificado 10 anos atrás, de 2,37. No Brasil, o indicador de emissões ficou em 1,47 tCO_2/tep (63% do indicador mundial), em razão da maior presença de fontes renováveis na sua matriz energética;
- Há países que são muito dependentes de uma só fonte. Na África do Sul, por exemplo, o carvão mineral ocupa 93% de sua matriz elétrica. No Uzbequistão, o gás natural responde por 88% de sua matriz energética. No Paraguai, a energia hidráulica representa 100% da sua matriz elétrica.

Na Figura 6 podem ser observados dados sobre a geração elétrica a nível mundial, por setores energéticos, no ano de 2016.

Figura 6: Geração elétrica mundial por setores 2016 (%)

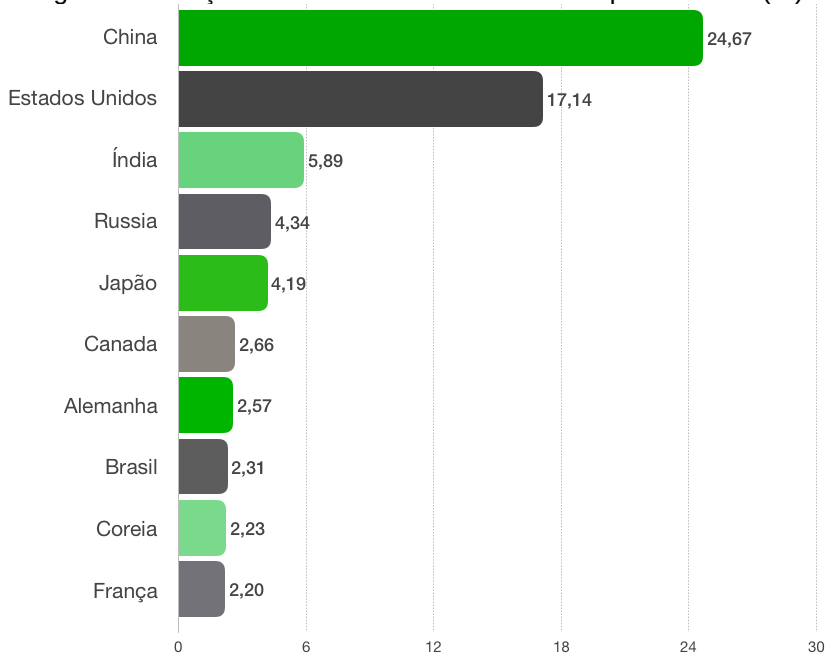


Fonte: IEA, 2018 – adaptado

Total 25082TWh

Globalmente, a produção de energia tem como principais países a China, (24,7%) e os Estados Unidos (17,2%), que juntos atingem mais de 40% da produção total. São seguidos os países: Índia (5,9%), Rússia (4,4%), Japão (4,2%), Canada (2.7%), Alemanha (2,6%), Brasil (2,3%), Coréia (2,2%) e França (2,2%). No total, os países elencados somam mais de dois terços da energia elétrica mundial como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7: Geração elétrica mundial – 10 maiores países 2016 (%)



Fonte: IEA, 2018 - adaptado

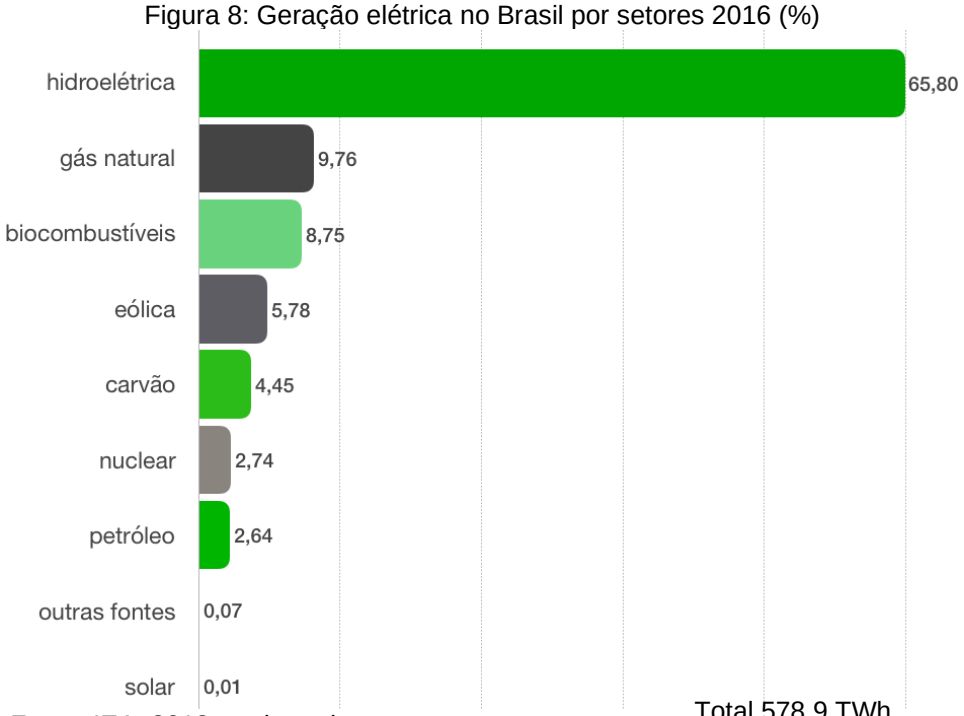
Total 25082TWh

No Brasil, o consumo de energia por meio da rede de distribuição elétrica em 2016, foi de 460,8 TWh, sendo o correspondente por habitante 2,5 MWh/hab.

Quanto à geração total de energia elétrica, foram produzidos no Brasil 578,9 TWh, sendo 381 TWh advindo da fonte de energia hidroelétrica (66% da produção interna de energia), 33 TWh em energia eólica (6% da produção interna), 26 TWh em carvão (4,5% da produção interna), 15 TWh a partir dos derivados de petróleo (3% da produção interna), 56 TWh em gás natural (10% da produção interna), 16 TWh em energia nuclear (16% da produção interna), 51 TWh em biocombustíveis (9% da produção interna), 85 GWh em energia solar (0,01% da produção interna), e 391 GWh em outras fontes.

Na Figura 8 estão resumidos os dados de geração elétrica no Brasil, por setores energéticos, no ano de 2016.

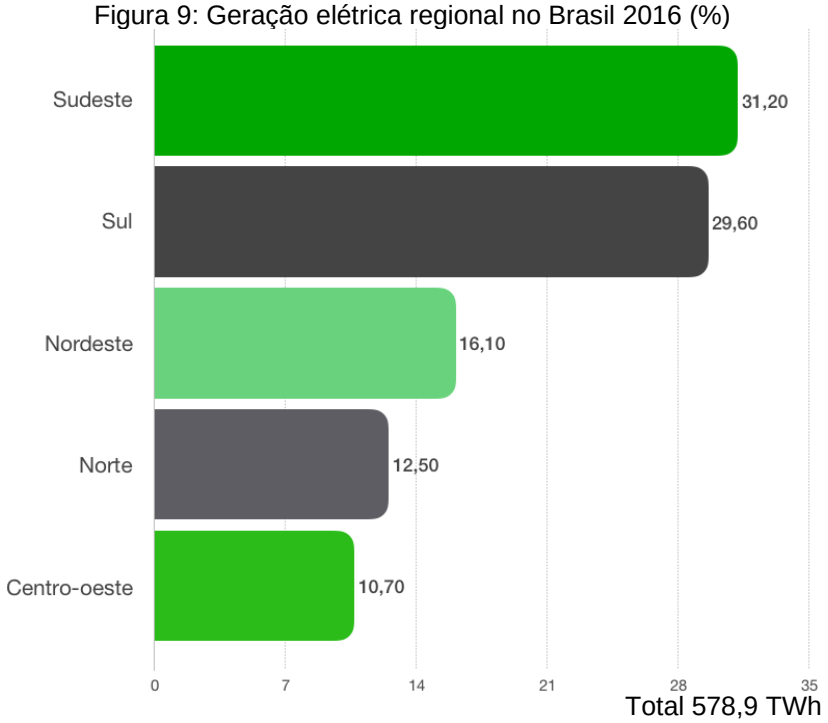
Figura 8: Geração elétrica no Brasil por setores 2016 (%)



Fonte: IEA, 2018 – adaptado

A produção de energia nacional, advém das diversas regiões territoriais, na Figura 9 podem ser observados dados sobre a participação regional na distribuição de energia elétrica.

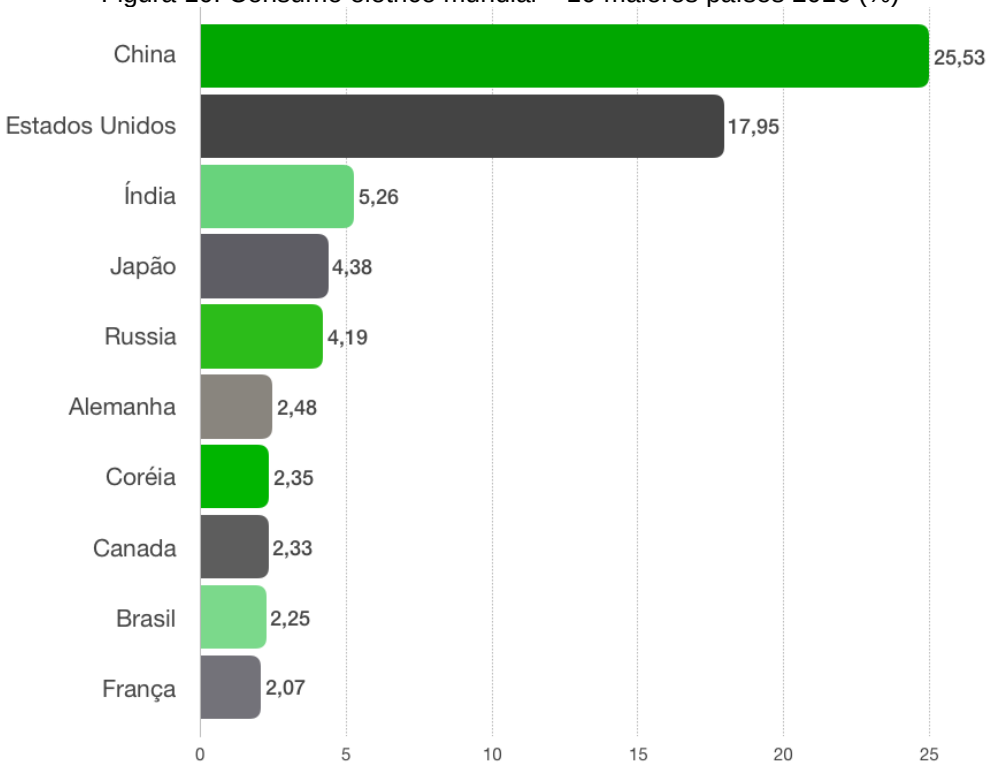
Figura 9: Geração elétrica regional no Brasil 2016 (%)



Fonte: EPE, 2017 – adaptado

A contraparte da produção deve sempre se sobrepor ao consumo, na Figura 10 pode ser observado um resumo do consumo de energia elétrica a nível mundial entre os 10 maiores países no ano de 2016.

Figura 10: Consumo elétrico mundial – 10 maiores países 2016 (%)



Fonte: IEA, 2016 – adaptado

Neste cenário, a emissão de gases do efeito estufa (GEE), apresentaram queda de 34,2 % em relação aos níveis observados em 2015, proveniente da qualidade tecnológica nos serviços prestados, apresentando aumento na qualidade dos serviços prestados, e novas tecnologias adotadas na emissão de poluentes, estando o Brasil como líder entre os países com maior participação de fontes renováveis (EPE, 2017).

Na Tabela 1 podem ser observados dados sobre as emissões de GEE dos 10 maiores países, na área de energia por queima de combustíveis fósseis.

Tabela 1: Emissões de GEE combustíveis fósseis

	População (milhões)	**Emissões Fósseis (Mt CO_2)**	**Emissões Fósseis per capita (Mt CO_2/hab)**
Mundo	**7249**	**32381**	**4,47**
China	1364	9087	6,66
EUA	319	5176	16,22
Índia	1295	2020	1,56
Rússia	144	1468	10,20
Japão	127	1189	9,35
Alemanha	81	723	8,93
Coréia do Sul	50	568	11,26
Irã	78	556	7,12
Canadá	36	555	15,61
Arábia Saudita	31	507	16,40
Brasil	204	476	2,34
Outros	3520	10057	2,86

Fonte: EPE, 2017

10 maiores países

Com relação às emissões de GEE nestes sistemas energéticos, pode-se notar na Tabela 2, que os principais emissores são o óleo diesel, o óleo combustível, o carvão e o gás natural, sendo destes o maior emissor de GEE o gás natural, com 20,39 milhões de toneladas de dióxido de carbono ($MtCO_2$).

Observa-se também uma grande redução entre os anos de 2015 e 2016 de 10,13 $MtCO_2$, com efeito, novas políticas de redução de GEE resultaram em uma diminuição na emissão também nos outros setores de produção de energia.

Nota-se, quanto à demanda de energia no território nacional, a necessidade de instalação de novos empreendimentos, Na Tabela 3 pode ser observado um resumo das centrais energéticas em construção no Brasil e suas potências.

Tabela 2: Emissão de GEE na geração elétrica

Combustível Fóssil	2012	2013	2014	2015	2016	% (2016)
Total	**28,95**	**52,83**	**71,00**	**68,96**	**39,99**	**100**
Óleo Diesel	2,92	3,06	7,11	7,73	0,69	1,7
Óleo Combustível	2,32	8,01	13,16	10,82	3,62	9,1
Carvão	8,58	15,68	19,28	19,89	15,28	38,2
Gás Natural	15,13	26,08	31,45	30,42	20,39	51,0

Fonte: EPE, 2017

$MtCO_2$

Tabela 3: Empreendimentos em construção no Brasil

	Usinas 2016	Potência Outorgada 2016 (MW)	% (2016)
Total	**213**	**8.539**	**100**
Usina Hidroelétrica	6	1.922,1	22,5
Central Eolielétrica	137	3.136,8	36,7
Usina Termoelétrica	26	1.374,5	16,1
Usina Termonuclear	1	1.350,0	15,8
Usina Fotovoltaica	12	346,0	4,1
Pequena Central Hidrelétrica	30	409,1	4,8
Central Hidrelétrica	1	0,8	0,0

Fonte: EPE, 2017

Em suma, o consumo geral por sistema e por setor na demanda de energia nacional nos comprova as grandes aplicações massivas da destinação de energia nos setores residenciais e industriais, seguido do setor comercial, comprovando as afirmativas do crescimento da requisição de energia pela quantidade populacional e sua atividade em sociedade, e nos setores tecnológico e industrial. Nas tabelas 4 e 5 são apresentados os resumos dos dados coletados.

Tabela 4: Consumo por região no Brasil

	2012	2013	2014	2015	2016	% (2016)
Brasil	**448.176**	**463.134**	**474.823**	**464.976**	**460.829**	**100**
Norte	29.098	30.209	32.364	33.413	34.071	7,4
Nordeste	75.610	79.694	80.746	79.979	80.147	17,4
Sudeste	235.259	240.084	242.513	234.712	229.970	49,9
Sul	77.491	80.393	84.819	82.012	82.063	17,8
Centro-Oeste	30.718	32.755	34.381	34.860	34.579	7,5

Fonte: EPE, 2017

GWh

Tabela 5: Consumo por setor no Brasil

	2012	2013	2014	2015	2016	% (2016)
Brasil	**448.176**	**463.134**	**474.823**	**464.976**	**460.829**	**100**
Residencial	117.646	124.908	132.302	131.190	132.872	28,8
Industrial	183.475	184.685	179.106	168.856	164.557	35,7
Comercial	79.226	83.704	89.840	90.768	87.873	19,1
Rural	22.952	23.455	25.671	25.899	27.266	5,9
Poder público	14.077	14.653	15.354	15.189	15.092	3.3
Iluminação pública	12.916	13.512	14.043	15.333	15.035	3,3
Serviço público	14.525	14.847	15.242	14.730	14.969	3,2
Próprio	3.359	3.371	3.265	3.011	3.164	0,7

Fonte: EPE, 2017

GWh

3.2. A energia termoelétrica

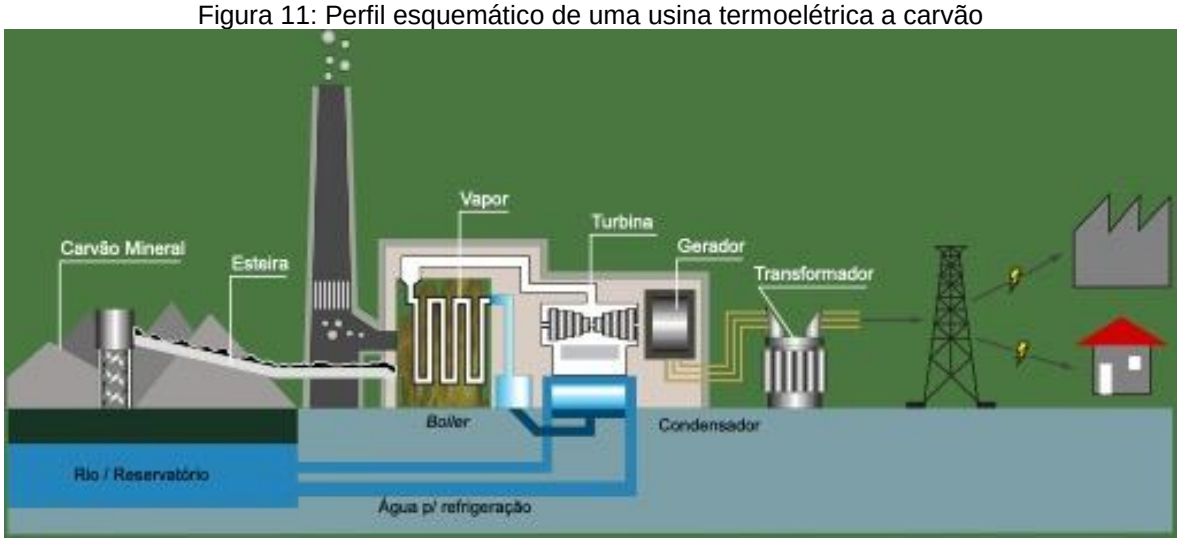
A energia térmica, é a que se define pelo processo de transformação de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, ou que possuem certo potencial calorífico, o qual pode ser extraído naturalmente ou pela queima em instalações próprias

Tais instalações possuem, em geral, tecnologias específicas de queima, para a o aproveitamento do potencial calorífico destes materiais; os principais materiais utilizados são o carvão mineral, o petróleo, o gás natural, a nafta[1], e a biomassa[2].

A usina termoelétrica utiliza a queima do combustível para o aquecimento de água armazenada, que movimenta as turbinas geradoras a vapor, responsável pela produção de eletricidade. Outros processos utilizam a gaseificação, no caso do carvão, para o maior aproveitamento calorífico. Na Figura 11 pode ser observado um perfil esquemático de uma usina termoelétrica a carvão.

1 Gás derivado do petróleo.
2 Materiais de origem orgânica com poder calorífico como a lenha, bagaço de cana-de-açúcar, resíduos florestais, resíduos agrícolas, casca de arroz, excrementos de animais, etc.

Figura 11: Perfil esquemático de uma usina termoelétrica a carvão



Fonte: ANEEL, 2008

A primeira usina termoelétrica do Brasil foi inaugurada em 1883, em Campos dos Goytacazes, com a potência de 52 kW.

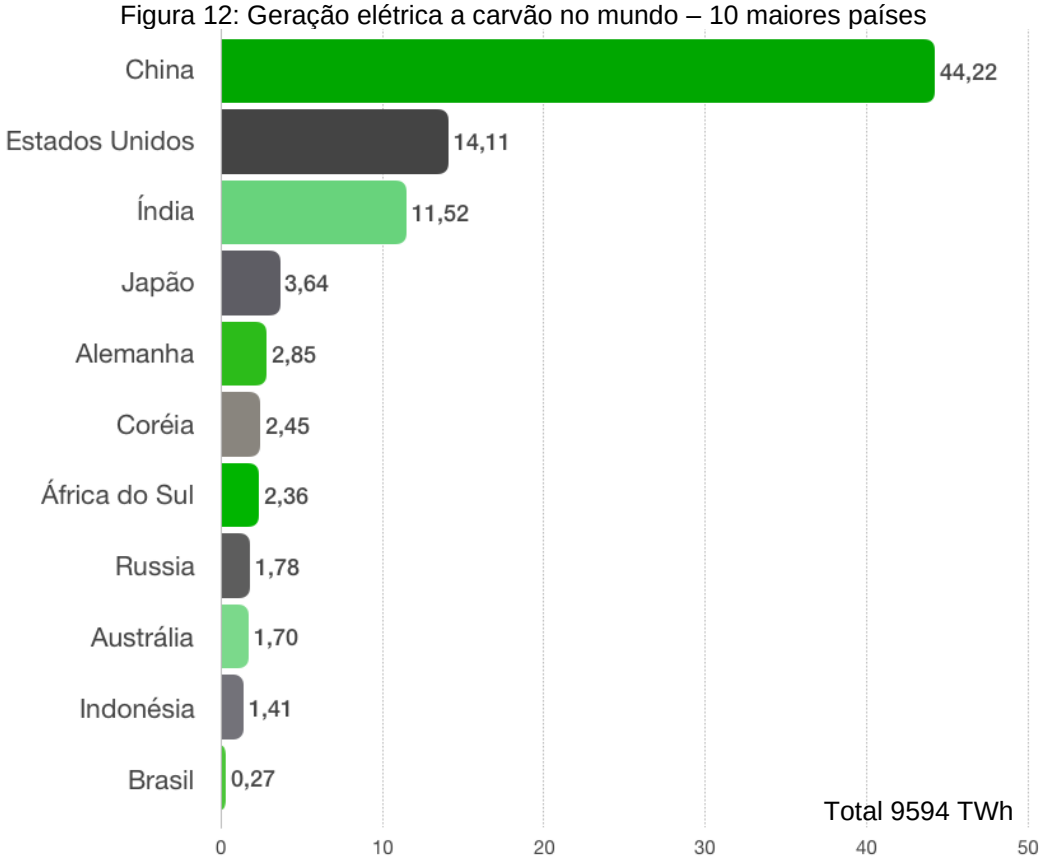
As principais fontes de energia térmica são consideradas como não renováveis, o que se considera alarmante no ponto de vista ecológico, tanto nos fatores de consumo das reservas disponíveis, quanto na emissão de CO_2 liberado no processo de queima, além dos resíduos decorrentes.

3.3. O carvão mineral

Des de os tempos mais antigos, o carvão vem sendo utilizado como a principal fonte de calor como combustível, sendo que o de origem fóssil foi um dos primeiros utilizados em larga escala pelo homem, com destaque na época da Primeira Revolução Industrial, sendo substituído posteriormente pelo petróleo e seus derivados.

No mundo, o carvão é o principal meio de conversão em energia elétrica, com 38,5% da produção total no globo, na Figura 12 pode-se observar os maiores conversores de carvão em eletricidade, em relação a esse percentual.

Figura 12: Geração elétrica a carvão no mundo – 10 maiores países



Fonte: IEA, 2018 – adaptado

Das fontes de energia, o carvão é considerado não renovável, e assume papel importante no cenário mundial na produção elétrica. Na Tabela 6 pode ser observado o relatório da produção versus consumo de carvão mineral atualmente no Brasil, nos principais setores em que é utilizado.

As reservas são consideradas na medida de um total de 32.264×10^6 t (cerca de 32,3 bilhões de toneladas), equivalentes à $7.024.019 \times 10^3$ tep (cerca de 7 bilhões de toneladas equivalentes de petróleo) (BEN, 2017).

Em relação a soma total de produção de energia por setores, no Brasil, a queima de carvão representa 4,45 % da produção elétrica nacional conforme visto anteriormente na Figura 8.

Tabela 6: Fluxo de produção/consumo de carvão mineral

Fluxo	2012	2013	2014	2015	2016
Produção	9.683	9.393	9.496	9.079	9.233
Importação	1.591	1.896	1.818	2.295	1.107
Variação (perdas)	318	25	-107	56	-30
Consumo total	11.592	11.314	11.207	11.430	10.310
Cimento	108	114	112	101	71
Ferro-Gusa/Aço	135	10.593	10.488	10.784	9.750
Ferro-Ligas	135	122	113	102	100
Mineração/Peletização	83	85	89	87	58
Não-Ferrosos outros metalurgia		400	404	356	331

Fonte: BEN, 2017 10^3 ton

Segundo o Atlas de Energia Elétrica (ANEEL, 2008), existem dois tipos básicos de carvão: vegetal e mineral. O vegetal é obtido a partir da carbonização da lenha.

O carvão mineral é formado pela decomposição da matéria orgânica durante milhões de anos, sob determinadas condições de temperatura e pressão. É composto por átomos de carbono, oxigênio, nitrogênio, enxofre, associados a outros elementos rochosos (como arenito, siltito, xisto argiloso e diamictitos) e minerais, como a pirita.

Tanto o carvão vegetal quanto o mineral podem ser usados na indústria (principalmente siderúrgica) e na produção de energia elétrica. No carvão vegetal, o poder calorífico é baixo enquanto a participação de impurezas é elevada.

No carvão mineral, o poder calorífico e a incidência de impurezas variam, o que determina a subdivisão do minério nas categorias: baixa qualidade (linhito e sub-betuminoso) e alta qualidade (ou hulha, subdividida nos tipos betuminoso e antracito).

Das reservas de aproximadamente 32,3 bilhões de toneladas, o Rio Grande do Sul possui cerca de 89% no país. Nas Tabelas 7, 8 e 9 estão elencadas as centrais termoelétricas em operação no Brasil, além das usinas de autoprodução, sua potência nominal, e os empreendimentos previstos para implantação.

Tabela 7: Centrais termoelétricas a carvão mineral no Brasil

Usina	Potência (MW)	Localização
Charqueadas	72	Charqueadas (RS)
Presidente Medici (A, B e C)	796	Candiota (RS)
Figueira	20	Figueira (PR)
Jorge Lacerda A	232	Capivari de Baixo (SC)
Jorge Lacerda B	262	Capivari de Baixo (SC)
Jorge Lacerda C	363	Capivari de Baixo (SC)
São Jerônimo	20	São Jerônimo (RS)
Porto do Pecém I	720	São Gonçalo do Amarante (CE)
Porto do Pecém II	365	São Gonçalo do Amarante (CE)
Porto do Itaqui	360	São Luís (MA)
Total	3,2 GW	

Fonte: ANEEL, 2008

Tabela 8: Centrais termelétricas de autoprodução no Brasil

Usina	Potência (MW)	Localização
Alunorte	103	Barbacena (PA)
Alumar	75	São Luís (MA)
Total	178	

Fonte: ANEEL, 2008

Tabela 9: Empreendimentos previstos para operação

Usina	Potência (MW)	Município	Situação
Pampa Sul	72	Candiota - RS	Contratado (Leilão A-5)
Sul Catarinense	796	Treviso - SC	Não Contratado
Jacuí	20	Charqueadas - RS	Não Contratado
Concórdia	232	Concórdia - SC	Não Contratado
CTSUL	262	Cachoeira do Sul - RS	Não Contratado

Fonte: ANEEL, 2008

3.4. Resíduos provenientes da queima do carvão mineral

A normatização brasileira define resíduos como resíduos nos estados sólido e semissólido[3], que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

Nesta definição pela NBR 10004, estão inclusos os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e

3 Entendem-se como substâncias ou produtos semissólidos todos aqueles com teor de umidade inferior a 85%.

instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos[4] cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004).

Existem muitas maneiras de se classificar os resíduos sólidos. A mais comum é por meio da identificação dos riscos de contaminação ao meio ambiente e quanto à natureza ou origem, quanto à classificação segundo a norma, temos:

a) Resíduos de Classe I – Perigosos:

Os resíduos desta classe são aqueles cujas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas podem acarretar em riscos à saúde pública e/ou riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

Para que um resíduo seja apontado como classe I, ele deve estar contido nas características elencadas nos anexos A ou B conforme a ou apresentar uma ou mais das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade (NBR 10004, ABNT, 2004).

Exemplos: óleo lubrificante usado ou contaminado; óleo de corte e usinagem usado; equipamentos descartados contaminados com óleo; lodos de galvanoplastia; lodos gerados no tratamento de efluentes líquidos de pintura industrial; efluentes líquidos ou resíduos originados do processo de preservação da madeira; acumuladores elétricos a base de chumbo (baterias); lâmpada com vapor de mercúrio após o uso (fluorescentes);

b) Resíduos de Classe II – Não perigosos:

Seguindo os mesmos parâmetros, os resíduos classe II – Não perigosos dividem-se em:

c) Resíduos de Classe II A – Não inertes:

Que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes. Estes podem apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Exemplos: o lixo comum gerado em qualquer unidade industrial (provenientes de restaurantes, escritórios, banheiros, etc.).

---

4 Válido somente para resíduos industriais perigosos.

d) Resíduos de Classe II B – Inertes:

Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa (NBR 10007, ABNT, 2004), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente (NBR 10006, ABNT, 2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor (NBR 10004, ABNT, 2004).

Exemplos: resíduo de papel e papelão; resíduo de madeira; resíduo de materiais têxteis; resíduos de minerais não-metálicos; bagaço de cana, etc.

Os resíduos sólidos gerados pelas atividades humanas constituem um campo de ação muito amplo para gestores, técnicos e pesquisadores. A sua gestão exige a existência de arranjos institucionais envolvendo vários agentes o que torna a sua concepção e operacionalização bastante complexa, exigindo elevado nível de articulação e cooperação para que sejam eficazes.

Especificamente, no que se refere aos resíduos de origem industrial, a responsabilidade pela gestão destes resíduos sólidos é da própria indústria. Outros tipos de resíduos são passiveis de serem geridos com diferentes níveis de intervenção ou acompanhamento para preservar os interesses da coletividade quanto à promoção da saúde, buscando-se a melhoria da qualidade de vida.

Para a concepção dos trabalhos realizados, o conhecimento das características físico-químicas dos resíduos sólidos é determinante, bem como outros condicionantes, de ordem política, social, cultural, legal, econômica, financeira e tecnológica.

Com este enfoque multidimensional, o conceito de gestão de resíduos sólidos tem sido discutido e proposto por vários autores visando se ter uma maior sustentabilidade do sistema.

A reciclagem é a primeira fase no tratamento dos resíduos sólidos, pois é através dela que podemos contribuir para a preservação de recursos naturais, na economia de energia gasta, na economia de transporte, na redução de material que demanda o aterro e na geração de emprego e renda.

A reciclagem se baseia ainda, na conscientização para as questões ambientais, neste sentido, a utilização dos resíduos para matrizes cimentícias é uma proposta que traz expectativas de resultados promissores.

Os produtos da combustão do carvão (PCCs) são subprodutos gerados a partir da queima do carvão mineral nos processos de combustão pulverizada ou leito fluidizado.

As cinzas são materiais granulares finamente divididos, resíduos da combustão de certas substâncias. A formação das cinzas ocorre combustão direta do carvão, matéria-prima sólida, constituída por duas frações intimamente misturadas: uma orgânica (material volátil mais carbono fixo) e uma mineral (argilas, quartzo, piritas, carbonatos, etc.).

Pela ação do calor, a fração orgânica gera materiais voláteis e coque, enquanto a mineral se transforma em cinza com mineralogia modificada, tendo em vista: a perda de água das argilas, a decomposição dos carbonatos, a oxidação dos sulfetos, etc. (NOGUEIRA, 2011).

Na queima do carvão, dependendo do tipo de sistema, podem ser geradas diferentes tipos de cinzas, as mais conhecidas são as **cinzas volantes**, que são partículas finas, menor que 0,15 mm que são carregadas pelos gases após a combustão e são coletadas por filtros em um dos trechos, estas partículas podem variar de tamanho e morfologia, de acordo com o tipo de captura a saber: filtro de tecido, filtro de ciclone ou precipitadores eletrostático.

Outro tipo de cinza é comumente chamado de **cinza pesada** (ou cinza de fundo), que são as cinzas com maior densidade e granulometria intermediária, de forma que não são transportadas pelos gases de combustão, e precipitam no leito da caldeira, e possuem cerca de 5 a 10 % de carbono não queimado.

A composição química das cinzas depende da constituição e da granulometria do carvão original. Também influenciam o sistema de combustão empregado (leito fixo, fluidizado ou suspensão), temperatura e tempo de residência das partículas (SANTANA, 2002).

As **escórias**, são cinzas provenientes de processos mais antigos, são materiais que foram se acumulando nas grelhas de combustão, originada nos processos de combustão ou gaseificação do carvão em grelhas fixas e móveis. Apresentam-se, frequentemente, com granulometria grosseira e blocos sinterizados, com consideráveis teores de carbono não queimado (10-20 %). São retiradas pelo fundo das fornalhas, após resfriamento com água (MARGON, 2002).

Além destes tipos de cinzas, a combustão do carvão que possui sistema de controle de emissão de gases ou sistema de dessulfurização *in situ*, na qual o

calcário é introduzido no leto fluidizado, pode produzir outros tipos de cinzas, chamados de **resíduos da dessulfurização de gases** (FGD); os resíduos de combustão de leito fluidizado do tipo atmosférico, pressurizado ou circulante.

Os resíduos FGD são gerados passando-se os gases por um meio aquoso alcalino, resultando uma combinação de cinza volante, sulfito e/ou sulfato de cálcio, e carbonato de cálcio, sendo que o tamanho das partículas varia normalmente entre 5 a 50 μm (NOGUEIRA, 2011). A composição química destas cinzas varia de acordo com o tipo de reagente no dessulfurizador.

De acordo com Associação Americana de Cinzas de Carvão (ACAA) e Associação Europeia de Produtos da Combustão de Carvão (ECOBA), somente nos EUA, a combustão de carvão gerou, em 2010, 130 milhões de toneladas de produtos residuais de cinzas em 2010, 68 milhões de toneladas de cinzas leves, 18 milhões de toneladas de cinzas pesadas, 32 milhões de cinzas leves provenientes do sistema FGD, e 2 milhões de toneladas de cinzas pesadas.

Das cinzas leves produzidas, 13 milhões de toneladas são usadas no cimento, concreto e aplicações de argamassas; e outras 13 milhões de toneladas são usadas em várias outras aplicações (RAMME e THARANIYIL, 2013).

Excetuando empresas privadas de outros ramos, somente na área de plantas termoelétricas a carvão no Brasil, até 2016, pode-se encontrar o total geral de resíduos derivados da queima de carvão na ordem de 4,7 milhões de toneladas anuais, deste número, cerca de 1,9 milhões de toneladas anuais de cinzas leves, 800 mil toneladas anuais de cinzas pesadas, 300 mil toneladas anuais de cinzas resultantes dos processos de dessulfurização de gases, e 1,7 milhões de toneladas anuais de resíduos mistos (CIENTEC, 2016).

Durante a era Paleozoica, há 600 milhões de anos atrás, quando o oceano cobria a maior parte da Terra, a gipsita foi formada. A gipsita é um mineral não metálico, encontrado na forma rochosa entre os mais abundantes minerais do mundo.

A gipsita é composta de 79,1% de sulfato de cálcio e 20,9% de água em massa. Sua fórmula química é $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Em sua forma pura, é branca, porém, normalmente contém impurezas (como argilas e outros minerais e em outros casos, sais solúveis) que fazem com que a rocha pareça cinza, marrom, rosa ou em alguns casos quase preta.

A gipsita é conhecida e usada desde a antiguidade. Os antigos Assírios chamavam esta rocha de Alabastro, e a utilizavam para esculpir. Há cinco mil anos atrás, os Egípcios aprenderam a fazer o estuque, argamassa de reboco, que utilizavam para alinhar muros de palacetes e tumbas. Também é encontrado dentro das grandes pirâmides, ainda imutáveis depois de quinze séculos (ou mais).

Os antigos gregos chamavam este mineral de "*gypsos*", e hoje é chamado de *gypsum* em inglês, em português gesso. Era descrito que "*gypsos*" seria um material que não queimava. Anos mais tarde, esta propriedade única o fez muito valioso.

Ao final do ano de 1700, um químico francês chamado Lavoisier analisou as propriedades químicas do material. Ele e outros químicos do grupo fizeram o pó de gesso e o submeteram ao fogo (calcinação) até que a água evaporasse. Quando a água era adicionada ao pó branco resultante, formava-se uma massa maleável, conhecida como o Gesso de Paris. Com o seu desenvolvimento o material permitia moldar qualquer forma, que após endurecido mantinha aquela forma.

A gipsita é a única substância natural que pode ser restaurada à sua forma original de rocha adicionando-se somente água. (RAMME e THARANIYIL, 2013)

O sistema FGD utiliza o calcário e água para remover os gases contendo enxofre proveniente da combustão do carvão. A reação química entre o calcário e o enxofre na presença de oxigênio produz o sulfato de cálcio, na literatura em inglês, *FGD gypsum*, o gesso de FGD. (RAMME e THARANIYIL, 2013)

O gesso de FGD é similar à gipsita minada em sua composição, e também pode ser utilizada nos vários produtos do gesso natural. Porém antes de ser utilizado como o gesso comum, o gesso de FGD é calcinado, removendo-se uma vez e meia sua hidratação, resultando no sulfato hemi-hidrato de cálcio ($CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$). Somente então que se adicionando água, é reidratado, recristaliza e endurece. (RAMME e THARANIYIL, 2013)

A quantidade de calcário no gesso FGD é diretamente proporcional à quantidade de enxofre no combustível utilizado (RAMME e THARANIYIL, 2013).

3.5. Impactos ambientais na utilização do carvão mineral

Segundo a Agencia Nacional de Energia Elétrica, o carvão é uma das formas de produção de energia mais agressivas ao meio ambiente. Ainda que sua

extração e posterior utilização na produção de energia gere benefícios econômicos (como empregos diretos e indiretos, aumento da demanda por bens e serviços na região e aumento da arrecadação tributária), o processo de produção, da extração até a combustão, provoca significativos impactos socioambientais (ANEEL, 2008).

Na mineração a céu aberto, o processo geralmente ocupa grandes extensões de terra e utilizam grandes estruturas de coleta como dragas, pás, caminhões, escavadoras e transportadoras.

Na mineração subterrânea, além dos campos de disposição do material coletado, mineração consome grandes volumes de água: na sondagem do campo (sondas rotativas e amostragens), na extração (desmonte hidráulico, bombeamento de água de minas subterrâneas etc.), no processo de tratamento do material coletado (britagem, moagem, flotação, lixiviação etc.), no transporte e na infraestrutura (pessoal, laboratórios etc.).

Em muitos casos, é necessário o rebaixamento do lençol freático para o acesso da matéria bruta a ser coletada, prejudicando outros possíveis consumidores.

Diversas pesquisas estão sendo realizadas para assegurar a destinação final dos resíduos decorrentes da utilização do carvão mineral em observação dos regulamentos ambientais cada vez mais exigentes. Novas tecnologias de remoção de impurezas e de combustão eficiente do carvão têm sido pesquisadas e desenvolvidas, as chamadas Tecnologias de Carvão Limpo (CCT).

Estas tecnologias têm foco em: remoção de impurezas antes da combustão; remoção de poluentes durante o processo de combustão; remoção de impurezas após a combustão; conversão em combustíveis líquidos (liquefação) ou gasosos (gaseificação).

Assim, tais pesquisas levarão à uma utilização mais eficiente da matéria bruta para geração de eletricidade a carvão mineral, além de contribuir para que os processos Tecnologias de Alta Eficiência e Baixas Emissões (HELE) de gases do efeito estufa (EPE, 2007).

O documento *Technology Roadmap - High-Efficiency, Low-Emissions Coal-Fired Power Generation* (IEA, 2012), indica que as plantas subcríticas convencionais (tipo mais utilizado em usinas térmicas a carvão mineral, inclusive no Brasil, com eficiência que pode atingir até 38 %) continuarão sendo as

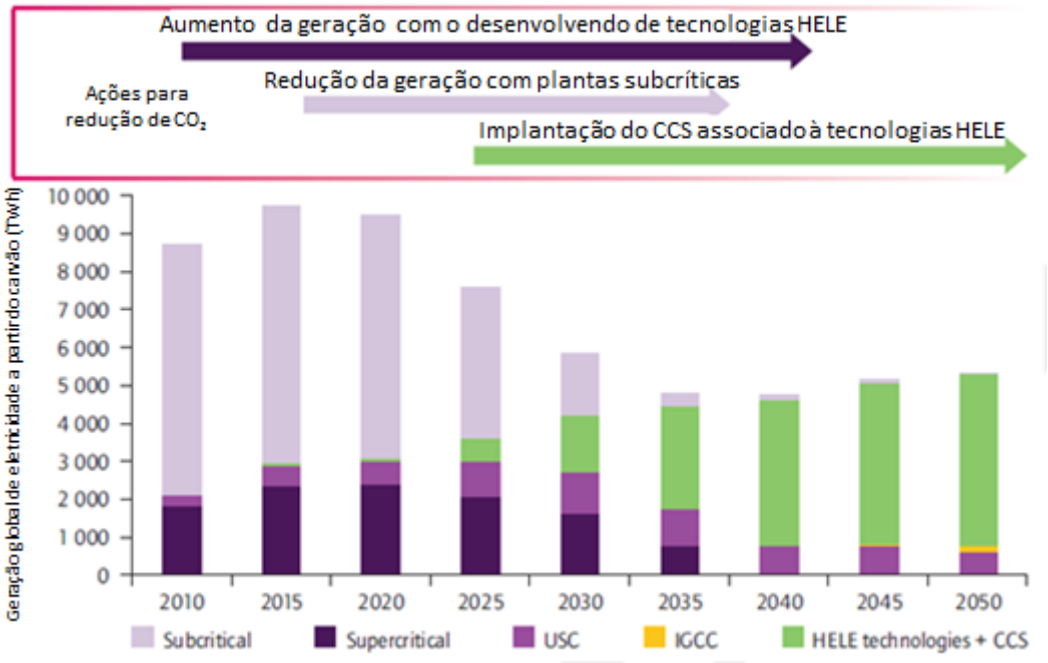
tecnologias preponderantes na expansão do parque gerador termoelétrico mundial no horizonte até 2025.

A partir de 2030, segundo a IEA, essa tecnologia perderá participação no conjunto global em detrimento a uma participação maior de tecnologias com maior eficiência e baixa emissão, incluindo avanços para ciclos ultra supercríticos (eficiência superior à 50%) e tecnologias de Captura e Estocagem de Carbono (CCS) até 2050.

A partir de 2050 tecnologias de gaseificação integrada com ciclo combinado (IGCC) tornam-se uma opção tecnológica viável e atraente do ponto de vista ambiental, contudo, ainda dependem de redução dos custos de investimentos para se viabilizarem no longo prazo (EPE, 2007).

Na Figura 13 pode ser observado o resumo das tecnologias que estarão disponíveis no futuro próximo (EPE, 2017).

Figura 13: Tecnologias disponíveis no futuro próximo



Fonte: EPE, 2017

Quanto aos impactos atmosféricos, existe uma grande preocupação quando se trata de usinas termoelétricas, pois são grandes emissoras de óxidos de nitrogênio (NO_x) e de óxidos de enxofre (SO_x), que afetam diretamente na qualidade do ar e na acidificação das águas pelo efeito de precipitação pelas chuvas.

Nestes casos, a escolha de locais adequados para a instalação e equipamentos com tecnologia de redução na emissão de poluentes (dessulfurizadores) e o controle da emissão dos gases são de relevante importância.

No Brasil, a redução nas emissões de SO_x é realizado com o uso de calcário ($CaCO_3$) ou cal (CaO) como reagentes de dessulfurização, removendo o SO_x da corrente gasosa na queima do carvão.

O calcário ou a cal virgem podem ser adicionados na combustão por leito fluidizado, ou após a combustão, onde os gases são direcionados para dessulfurizadores externos à caldeira. O produto da reação com calcário é o sulfito de cálcio ($CaSO_3$) e sulfato de cálcio ($CaSO_4$).

No procedimento de combustão em leito fluidizado há uma redução de enxofre (até 90 %) e de NO_x (70-80 %), por conta da aplicação das partículas de calcário e da queima em temperaturas inferiores ao processo convencional de carvão pulverizado.

A vantagem é a redução de enxofre sem perdas significantes de eficiência térmica, e também a possibilidade de queima de resíduos e carvões de baixa qualidade. A combustão em leito fluidizado possui dois sistemas: Leito Fluidizado Borbulhante e Leito Fluidizado Circulante (EPE, 2007).

Quando se trata de resíduos sólidos, as usinas a carvão são as maiores produtoras. Os resíduos vão dês das cinzas leves, pesadas, até os sedimentos do sistema de tratamento de efluentes e do tratamento prévio carvão.

Esses resíduos, caso não destinados corretamente, podem causar alteração da qualidade do solo e cursos d'água. Assim o melhor gerenciamento deve ser a quantificação destes resíduos, tratamento e destinação adequados, e priorizar o seu reaproveitamento (EPE, 2007).

Para a questão de efluentes líquidos, as termoelétricas produzem pelo processamento e pelo esgotamento sanitário. Os efluentes de processamento ocorrem principalmente das purgas do sistema de resfriamento das caldeiras.

O lançamento destes efluentes sem o devido tratamento podem causar alteração da qualidade do solo e de cursos d'água. Estes efluentes devem ser tratados e monitorados antes de seu lançamento no corpo hídrico receptor (EPE, 2007).

3.6. Sistemas de dessulfurização de gases

Com o advento de novas tecnologias para captura de gases expelidos pela queima do carvão nas indústrias, para garantir menores impactos ao meio ambiente, deu-se início à implantação dos sistemas de captura de gases SO_x e NO_x, os chamados dessulfurizadores.

Depois de entrar em combustão, o carvão mineral libera os gases e as cinzas leves, sendo estas arrastadas juntamente pela coluna de exaustão e direcionadas às torres absorvedoras, onde é realizada a adição de adsorventes para tratamento dos gases de sulfurosos. Após essa etapa, as cinzas são recolhidas em um filtro e direcionadas aos silos de armazenamento (CARVALHO, 2017).

O Sistema de dessulfurização de gases faz a limpeza dos gases originados da combustão na caldeira, através da adição de solução absorvente. Este composto é combinado em fluxo concorrente, permitindo a absorção do dióxido de enxofre (CARVALHO, 2017).

Existem basicamente dois processos que descrevem o sistema FGD:

Processos regenerativos: o absorvente usado é reciclado após tratamento térmico ou químico gerando SO_2 concentrado, que é posteriormente transformado, geralmente, em enxofre elementar.

São processos complexos, precisam de altos custos de investimento e maior consumo de energia durante a exploração. Estes processos não são utilizados em larga escala, principalmente devido aos custos e ao baixo valor comercial do enxofre.

Processos não regenerativos: o absorvente não é reciclado, estas são as tecnologias FGD mais utilizadas à escala industrial.

Dependendo do estado de agregação do absorvente usado, as tecnologias FGD podem ser classificadas como:

• <u>sistemas úmidos</u> (suspensão ou solução; os gases descarregados são saturados em água);

• <u>sistemas semissecos</u> (umidificação controlada, o absorvente úmido torna-se sólido no processo de absorção de SO_2);

• <u>sistemas secos</u> (a água não é utilizada em sua totalidade, umidificação zero).

A tecnologia de FGD serve para reduzir a quantidade de SO_2 presente nos gases exaustos dos sistemas geradores de energia baseada em combustíveis fósseis.

Deste processo, os resíduos classificados como seco, semisseco e úmido, depende do tipo de material empregado para se capturar as partículas de gases sulfurosos em suspensão no vapor de calor. E podem ser classificados com base em espécies de cálcio ($CaCO_3$/CaO/$Ca(OH)_2$), espécies de sódio alcalinas (NaOH), espécies de zinco (ZnO) e espécies de amônia (NH_3) (EPRI, 2007; CASTRO, 2016).

A combustão de combustíveis fósseis para aquecimento e geração de energia é a maior fonte de emissões de SO_x para o ambiente. O SO_x é altamente solúvel na água e, portanto, é facilmente evaporado e absorvido pelas vias respiratórias.

O controle de óxidos de enxofre pode ser realizado através de várias tecnologias, sendo estas aplicáveis principalmente nas fases de combustão e de pós-combustão (CORÁ, 2006).

O SO_x é altamente solúvel na água e, portanto, é facilmente evaporado e absorvido pelas vias respiratórias. O controle de óxidos de enxofre pode ser realizado através de várias tecnologias, sendo estas aplicáveis nas fases de combustão e de pós-combustão.

Durante a fase de combustão, o controle de SO_x pode ser realizado pelo emprego da combustão em leito fluidizado, a qual utiliza um sorvente para a captura do enxofre no próprio leito fluidizado (CORÁ, 2006).

Na pós-combustão, temos os controles de poluentes emitidos derivados do processo de queima: os dessulfurizadores (lavadores de gás), os sistemas de limpeza química e o sistema de particulados.

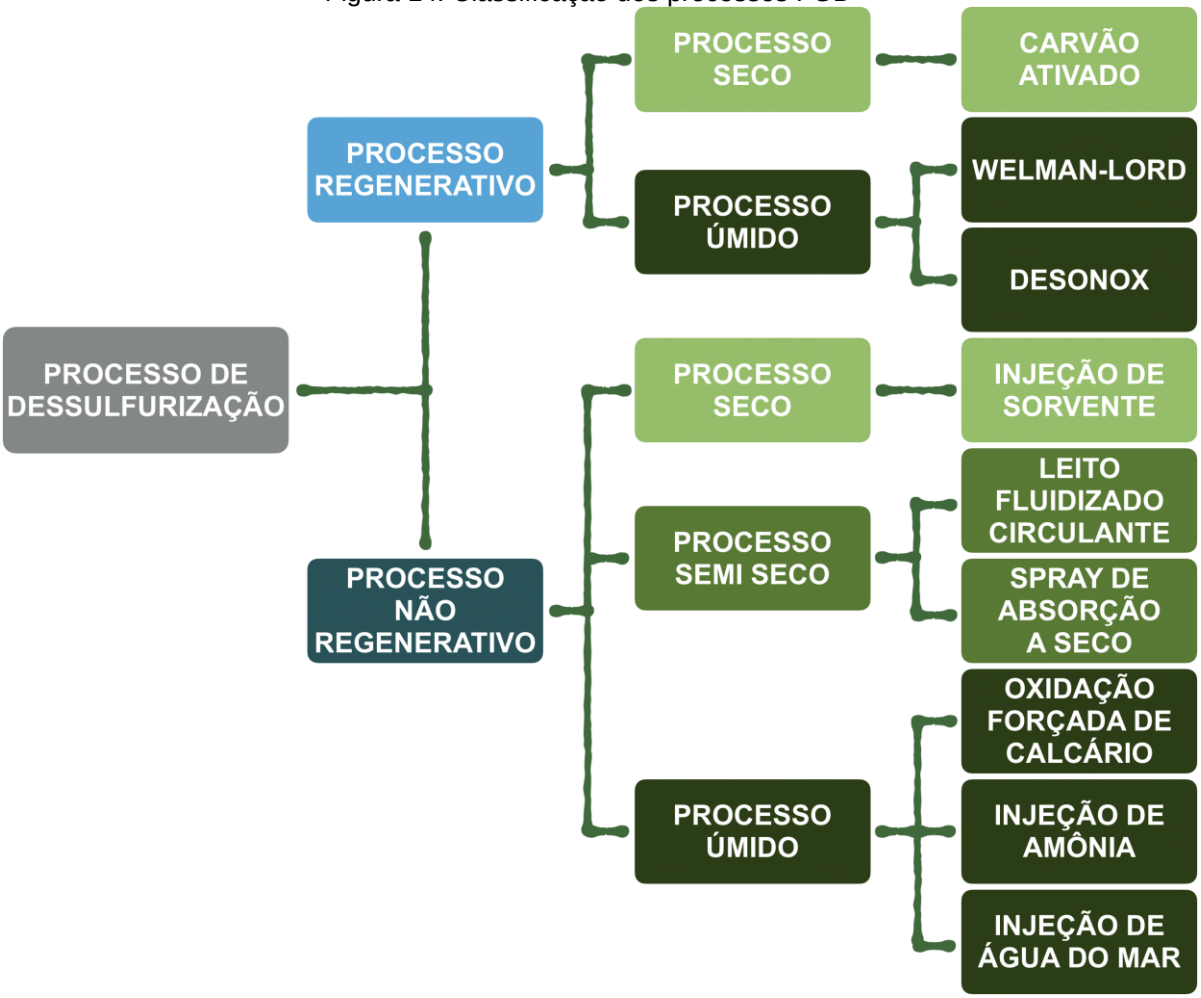
A remoção dos gases ocorre pela reação com um sorvente alcalino, cal ou calcário, que correspondem a dois processos distintos: via úmida (o sorvente está contido em um lodo de água que é atomizado em um recipiente absorvedor no qual o gás flui diretamente, com remoção de até 97 %); e via seca (o lodo aquoso de reagente alcalino é atomizado nos gases quentes da caldeira, que evapora imediatamente dentro do lavador, tornando-se um resíduo seco) (EPRI, 2007).

No sistema de limpeza química, são utilizados reagentes que fazem a redução catalítica dos gases (geralmente por amônia ou ureia) para o controle da

emissão de óxidos de nitrogênio após a queima. Também há processos de injeção de sorvente na fornalha, próximo aos queimadores ou mais distante (CORÁ, 2006).

Na Figura 14 pode ser observado o panorama dos sistemas FGD, em sua classificação segundo os dois processos e suas modalidades de captura de gases.

Figura 14: Classificação dos processos FGD



Fonte: O autor.

Em suma, atendo-se aos sistemas de produção de resíduos não regenerativos, temos:

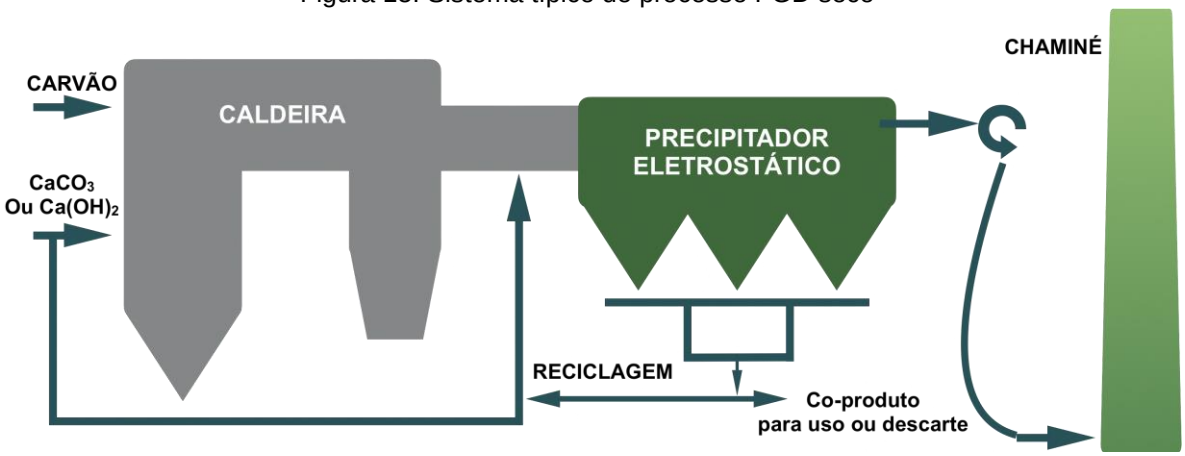
Sistema seco: Injeção de sorvente (SI). Utilizam-se compostos absorventes alcalinos injetados no fluxo de gás, ou o fluxo de gás é passado através de uma camada absorvente. Sorventes típicos incluem carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e dolomita ($CaCO_3 \bullet MgCO_3$), o fluxograma do processo pode ser visto na Figura 15.

No ponto de combustão, o calor determina a geração de partículas reativas de CaO através da calcinação sorvente. A superfície destas partículas reage com SO_2 no fluxo de gás para formar sulfito de cálcio ($CaSO_3$) e sulfato de cálcio ($CaSO_4$).

Os produtos de reação são retidos juntamente com as cinzas volantes pelo dispositivo de controle de micropartículas, geralmente um precipitador eletrostático ou um filtro de tecido, também chamado de filtro de manga.

O uso industrial desta tecnologia a seco não é muito difundido e suas aplicações são limitadas, o que depende do ponto de fornecimento da substância alcalina. Devido à baixa eficiência de dessulfurização, as instalações por processo seco estão diminuindo (SANTOS, 2007).

Figura 15: Sistema típico de processo FGD seco



Fonte: LISNIC, 2019, adaptado.

Sistemas semi-secos: são similares aos secos, exceto que a água é adicionada para criar uma fina camada líquida nas partículas adsorventes, na qual o SO_2 é dissolvido, aumentando assim a reação com o sólido. O produto sólido é coletado em filtros para ser vendido ou armazenado.

Os processos semi-secos mais conhecidos são os lavadores a seco (CDS), também conhecido como leito fluidizado circulante (CFB) e o spray de absorção a seco (SDA).

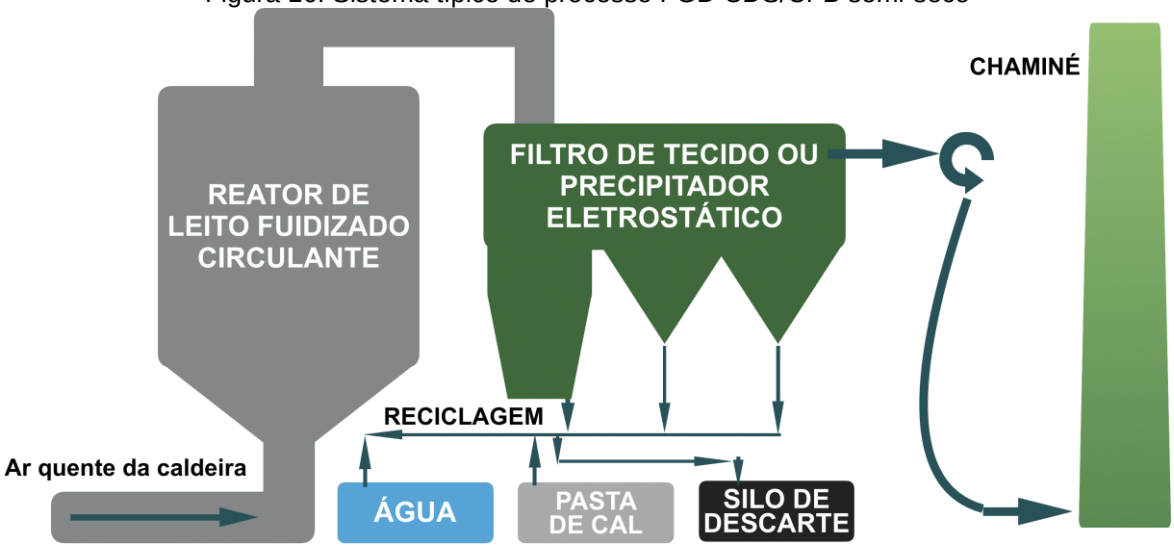
• Processo CDS ou CFB: o CDS é um processo de FGD semisseco no qual o gás de combustão é passado através de uma mistura úmida de calcário ou cal hidratada em um leito fluidizado circulante.

O gás de combustão entra através do fundo do absorvedor e os gases ácidos (SO_3, SO_2, HCl, HF e parcialmente CO_2) são removidos por cal hidratada.

Os produtos da reação são arrastados para o topo do absorvedor e recolhidos no precipitador a jusante em um filtro de manga ou um precipitador eletrostático (SANTOS, 2007).

O SO_2 é extraído em uma proporção de até 99 %, todo o SO_3 e HCl também são extraídos, na Figura 16 pode-se observar uma ilustração do sistema CDS/CFB.

Figura 16: Sistema típico de processo FGD CDS/CFB semi-seco



Fonte: LISNIC, 2019, adaptado.

• Processo SDA: neste processo, a pasta de cal é injetada aos gases de combustão para extrair SO_2, SO_3 e HCl. As reações químicas neste processo de aspersão são semelhantes às do processo CFB e o produto final é um pó sólido rico em cálcio.

É um processo de lavagem a seco geralmente usado para carvão com baixo teor de enxofre. São normalmente localizados após os pré-aquecedores de ar, para obter redução de dióxido de enxofre acima de 80%, o lavador a seco é geralmente seguido por filtro de mangas (EPRI, 2007).

Há um baixo uso do processo SDA, comparado com o processo CFB, devido a custos operacionais mais altos, maior uso de adsorvente e dos custos de armazenamento dos resíduos (LISNIC, 2019).

As desvantagens são: menor eficiência na remoção de SO_2; falta de um coproduto de venda; maiores custos de operação devido aos reagentes utilizados e custos de manutenção para equipamentos de remoção de poeira.

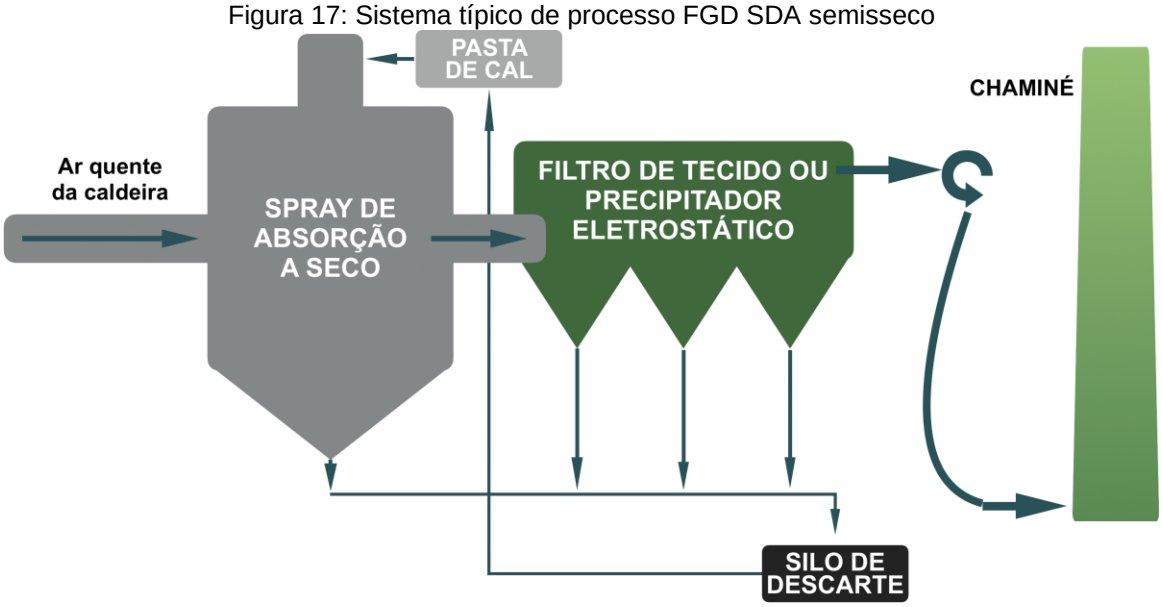
Nas torres absorvedoras, a lama combinada rica em hidróxido de cálcio é aspergida por atomizadores rotativos de alta velocidade e entra em contato com os gases provenientes da combustão, reagindo com os óxidos de enxofre, produzindo sulfito/sulfato de cálcio (sais de cálcio) e água (umidade).

As reações que ocorrem no interior das torres absorvedoras são de neutralização ácido-base, as torres absorvedoras são dimensionadas para que o tempo de residência do gás seja suficiente para evaporar a água da lama combinada e diminuir a umidade dos sais gerados nas reações (CARVALHO, 2017).

Embora os processos semissecos sejam menos utilizados que os úmidos, os processos SDA e CDS apresentam muitas vantagens que o processo úmido LSFO: consumo com aproximadamente 60 % menos água, menor espaço para instalação, menor consumo de energia auxiliar, menores custos de investimento, maior eficiência de remoção de SO_3, HCl, Hg e outros gases ácidos.

A Figura 17 apresenta uma ilustração do sistema SDA.

Figura 17: Sistema típico de processo FGD SDA semisseco



Fonte: LISNIC, 2019, adaptado.

Sistemas úmidos: necessitam de um agente de reação alcalino (calcário, cal, soda cáustica, amoníaco, água do mar). Os processos de dessulfurização úmida mais conhecidos são: oxidação forçada de calcário (LSFO), água do mar e processo de amônia.

• O sistema LSFO é a melhor tecnologia na dessulfurização de gases de combustão através do processo úmido, nele os gases de combustão passam através de um trocador de calor e entram no depurador FGD, onde o SO_2 é removido por contato direto com uma suspensão de calcário aquoso denso continuamente introduzido, o calcário deve conter mais de 95% de $CaCO_3$.

Todo o HCl que existe no gás de combustão é extraído. Os produtos de reação são extraídos da instalação e transferidos para desidratação e processamento adicional.

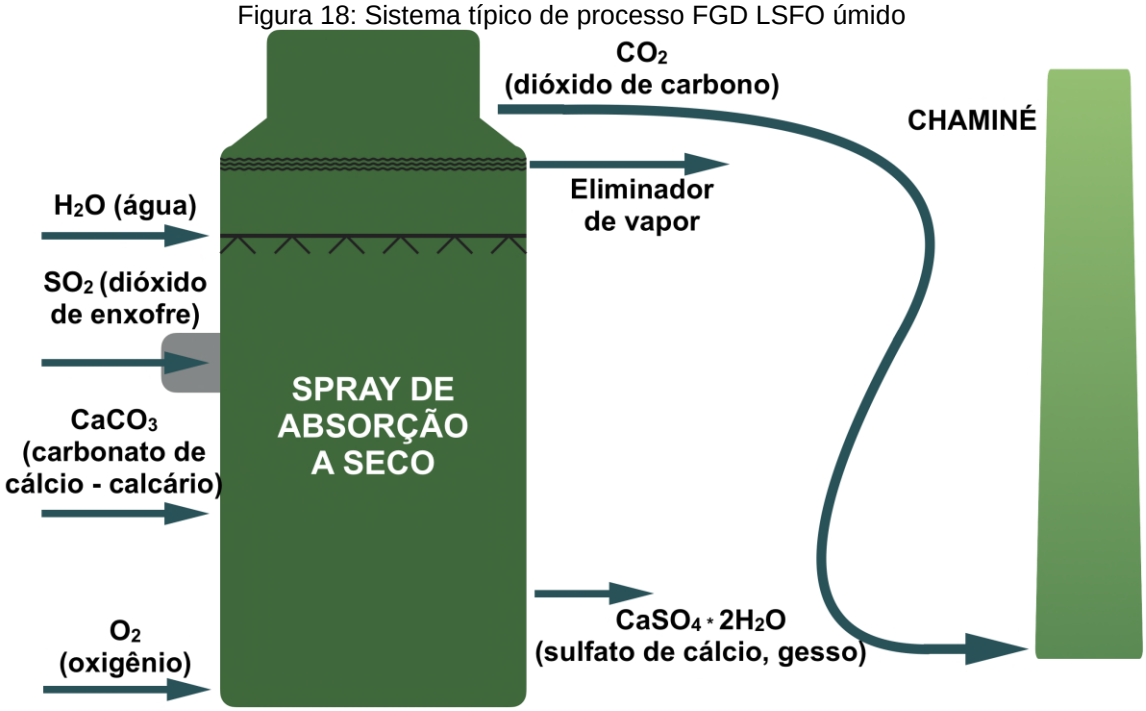
O sulfito ou bissulfito de cálcio (gerado na reação de SO_2 com calcário), pode ser submetido a oxidação forçada (pelo ar injetado no depurador) ou natural. A qualidade do coproduto depende do tipo de oxidação. A desidratação primária é geralmente feita em hidro ciclones, seguida por uma desidratação secundária em filtros ou centrífugas. O produto final contém aproximadamente 90% de resíduos sólidos.

A tecnologia de dessulfurização úmida com cal/calcário precisa de grandes áreas de aterro para o descarte de lodo. Se a qualidade for boa, o coproduto pode ser comercializável. Se o gesso contiver grandes quantidades de cinza volante ou sulfito, ele não poderá ser usado e deverá ser descartado em um aterro apropriado (rejeitos não perigosos).

O processo LSFO precisa de altos custos de investimento, embora este processo seja semelhante ao de dessulfurização úmida com cal, os custos de operação são menores porque o calcário é mais barato.

Testes em usinas termoelétricas da Alemanha e Holanda indicaram que pelo menos 40% da água usada na dessulfurização pode ser recuperada com qualidade, podendo ser usada não apenas para a desmineralização na indústria, mas também para uso público (LISNIC, 2019). A Figura 18 apresenta uma ilustração do sistema LSFO.

Figura 18: Sistema típico de processo FGD LSFO úmido



Fonte: LISNIC, 2019, adaptado.

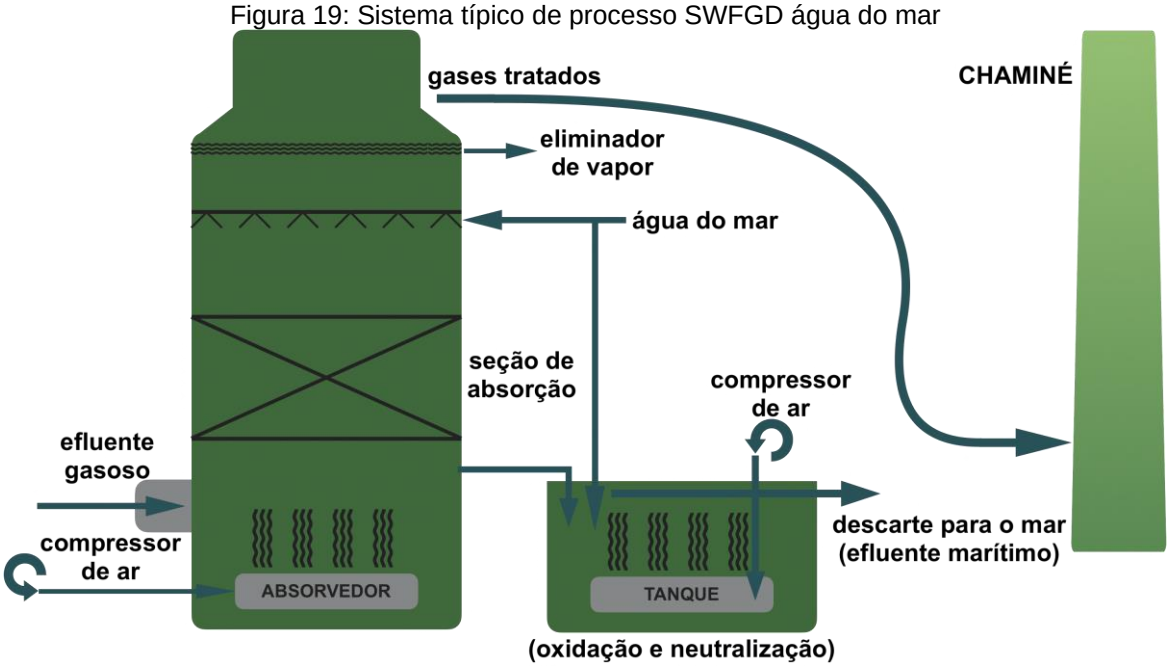
• Sistema FGD com amônia: a dessulfurização baseada em amônia é similar ao processo LSFO, e pode ser mais interessante no ponto de vista econômico em comparação com o LSFO. Possui benefícios de gerar coproduto comercializável, menor investimento e custos operacionais. Além de não produzir emissões adicionais de CO_2.

• Sistema dessulfurizador com água do mar (SWFGD): O processo data do início dos anos 70, e obviamente, só pode ser usado em áreas costeiras. A água do mar geralmente tem um pH de 7,6 - 8,4, permitindo a neutralização dos gases de combustão que vêm com pH ácido.

Os gases de combustão entram em contato com a água do mar na área de absorção, passando a névoa por filtros e depois descarregados. Na Figura 19 pode-se observar uma ilustração do sistema dessulfurizador com água do mar.

Possui condições de corrosão agressiva geralmente atendidas, caracterizadas por perigos químicos, altas temperaturas e erosão. Usinas termoelétricas que utilizam este sistema precisarão melhorar seus processos para maximizar a eficiência na redução de SO_2, seja pela adição de absorventes secundários, ou pela modernização dos absorventes existentes.

Figura 19: Sistema típico de processo SWFGD água do mar



Fonte: LISNIC, 2019, adaptado.

3.6.1. Eficiência e subprodutos

A eficiência de remoção de SO_2 em uma instalação FGD pode ser caracterizada pela “taxa de dessulfurização” (ou “eficiência de dessulfurização”), que é a relação entre a quantidade de enxofre que não é mais lançada na atmosfera por uma instalação em um determinado período de tempo, e a quantidade de enxofre contida no combustível sólido introduzido na instalação, no mesmo período de tempo.

Ao longo do tempo, a tecnologia úmida mostrou eficiências mais significativas para remoção de SO_2 do gás de combustão. Assim, vemos eficiências de até 97 % para o processo seco, 95-98 % para o processo CDS/CFB e 90-95 % para o processo SDA. Aproximadamente 80-85 % das instalações de FGD no mundo estão usando o processo úmido LSFO, com eficiência que pode alcançar 99 %, mesmo levando em consideração a alta demanda de água que este sistema requer (SANTOS, 2007; LISNIC, 2019).

As instalações de dessulfurização com água do mar têm a mesma eficiência que o LSFO. Também no processo úmido encontramos eficiências de 95-98 % no processo de amônia.

Os subprodutos do processo seco ou semisseco são mais fáceis de manusear e armazenar em comparação com aqueles que são gerados pelo

processo úmido. Pode-se encontrar esses subprodutos na fabricação de materiais de construção civil, aplicações em minas, construção de rodovias ou agricultura.

Uma vantagem do processo úmido LSFO é ter como subproduto o gesso sintético, material diretamente comercializável que tem as mesmas propriedades que o gesso natural e lugar no mercado de materiais de construção substituindo com sucesso o gesso natural.

Um dos benefícios associados ao uso de gesso sintético na indústria de cimento é diminuição da dependência da matéria-prima natural. O gesso sintético obtido é usado como aditivo na fabricação de cimento Portland, indústria de materiais de construção, agricultura e outros.

A tendência do processo de FGD é melhorar as instalações existentes com uma taxa de dessulfurização de 90 % até 99,9 %. Outro aspecto é reduzir a necessidade de água para o processo úmido.

Em relação às tendências futuras, o LSFO é o mais difundido. As instalações de FGD seguirão os seguintes critérios: atualização e otimização, com instalações menores para reduzir os custos de investimento, manutenção e consumo de água; alta eficiência de remoção de SO_2 e SO_3; remoção de metais pesados e subprodutos que podem ser vendidos ou reutilizados (LISNIC, 2019).

A lavagem do gás de combustão é um processo químico em etapas em que a reação da pasta de calcário (composta principalmente de carbonato de cálcio, $CaCO_3$) reage com enxofre ácido, conforme representado pela Equação 1.

Equação 1: Reação de enxofre com carbonato de cálcio

$$CaCO_3 + SO_2 + 2H_2O \rightarrow CaSO_3 \cdot 2H_2O + CO_2 \uparrow$$

Na ausência de quaisquer outros reagentes, os íons de cálcio e sulfito precipitarão como um hemihidrato, onde a água está realmente incluída na estrutura cristalina do subproduto do depurador, conforme a Equação 2.

Equação 2: Reação de enxofre com cálcio

$$Ca^{+2} + SO_3^{-2} + 1/2H_2O \rightarrow CaSO_3 \cdot 1/2H_2O \downarrow$$

Muitos purificadores de calcário úmido operam em um pH de solução de cerca de 5,6 a 5,8. Uma solução de lavagem muito ácida inibe a transferência de SO_2 do gás para o líquido; enquanto que a mistura com base excessiva (pH > 6,0) indica uma sobrealimentação de calcário.

O oxigênio presente nos gases de combustão influencia nas reações com o bissulfito aquoso e os íons sulfito reagem com oxigênio para produzir íons sulfato (SO_4), como pode-se ver na Equação 3.

Equação 3: Reação de sulfato com cálcio

$$Ca^{+2} + SO_4^{-2} + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O \downarrow$$
$$2SO_3^{-2} + O_2 \rightarrow 2SO_4^{-2}$$

Ocorre também a oxigenação forçada de oxigênio no leito do dessulfurizador para formar o sulfato de cálcio conforme a Equação 4:

Equação 4: Reação de sulfato com cálcio

$$CaSO_3 \cdot 2H_2O + CaSO_3 + 0{,}5O_2 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$$

Qualquer sulfato acima da proporção molar de 15 por cento precipita com cálcio como gesso. Em suma, para cada parte de SO_2 removida do gás de combustão, uma parte do carbonato de cálcio do calcário deve reagir com ele. Consequentemente, para cada parte do SO_2 removida, uma parte do subproduto do gesso é gerada, como pode ser visto na Equação 5 (RAMME e THARANIYIL, 2013).

Equação 5: Reação de sulfato com cálcio

$$SO_2 + CaCO_3 \rightarrow CaSO_3 \cdot 1/2H_2O + CO_2 + O_2 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O \text{ (gesso)}$$

3.6.2. Disposição dos resíduos das termoelétricas

Os resíduos sólidos que são gerados nas termoelétricas a carvão, são depositados conforme elencado abaixo:

a) Aterros industriais: podem ser classificados nas classes I, II ou III, conforme a periculosidade dos resíduos a serem dispostos, ou seja, os aterros

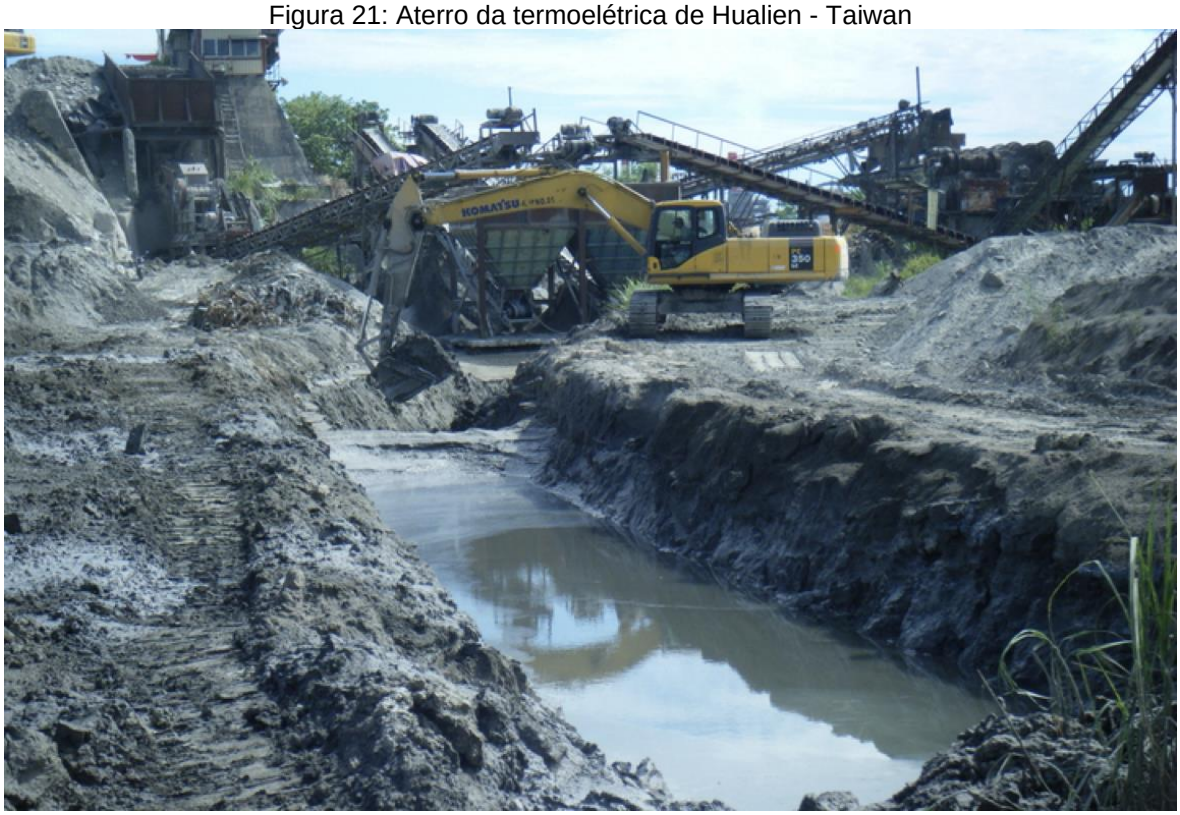
Classe I podem receber resíduos industriais perigosos; os Classe II, resíduos não-inertes; e os Classe III, somente resíduos inertes.

Nas Figuras 20 e 21 podem ser observados dois exemplos de aterros de termoelétricas para resíduos da queima de carvão.

Figura 20: Aterro UTE Figueira

Fonte: CIENTEC, 2016

Figura 21: Aterro da termoelétrica de Hualien - Taiwan



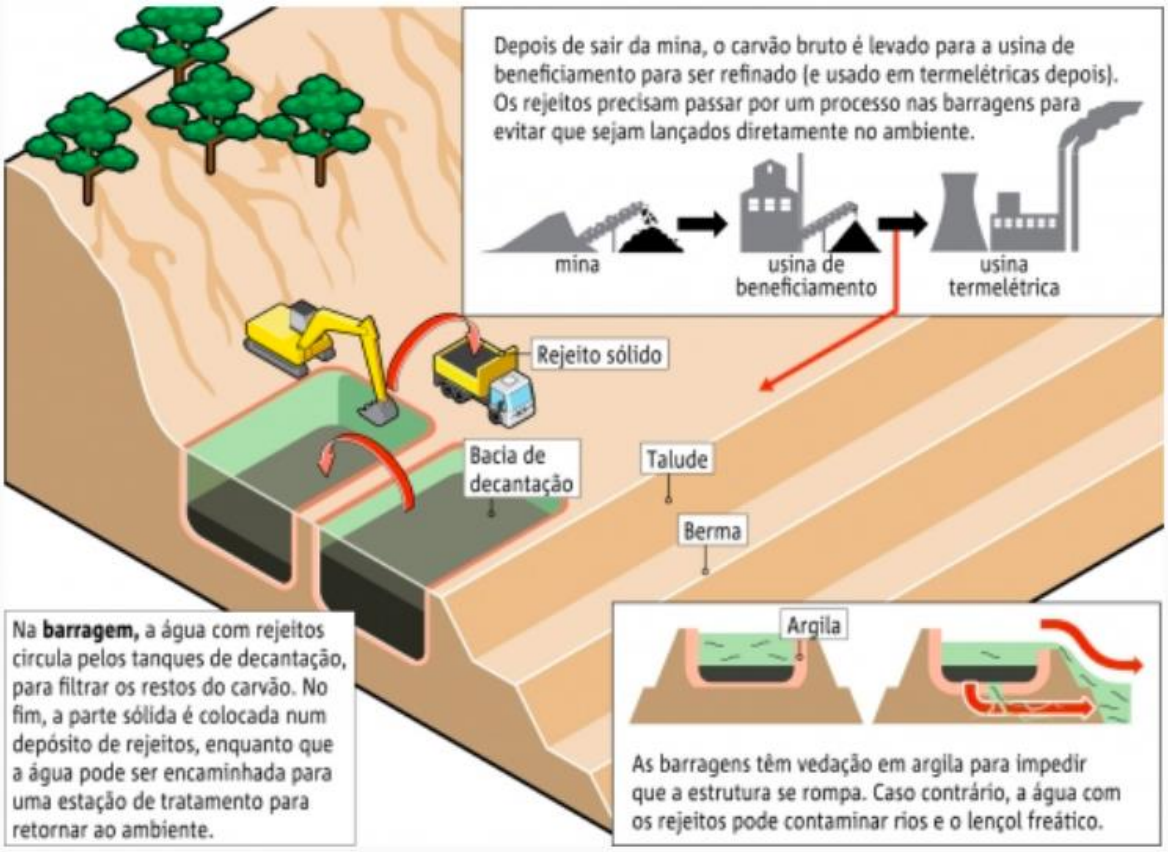
Fonte: chinatimes.com

b) Barragens de rejeito: são usadas para resíduos líquidos e pastosos, com teor de umidade acima de 80%. Esses aterros possuem pequena profundidade e necessitam muita área. São dotados de um sistema de filtração e drenagem de fundo para captar e tratar a parte líquida, deixando a matéria sólida no interior da barragem.

O resultado dos processos de beneficiamento e queima do minério de carvão é o rejeito que deve ser descartado de forma adequada. O mineral, reagentes e água descartada devem ser dispostos em forma de polpa em barragens de rejeitos (EPE, 2017).

Nas Figuras 22 e 23 podem ser observados dois exemplos da disposição de resíduos da queima de carvão em termoelétricas em barragens de rejeito.

Figura 22: Disposição em barragem de rejeito



Fonte: www.ndonline.com.br

Figura 23: Barragem da termoelétrica Qingdao – China

Fonte: hanhe-cable.com

Nas Figuras 24 e 25 podem ser observados mais dois exemplos da disposição de resíduos, a primeira trata-se de bacia à céu aberto e a segunda de um tanque de decantação, nesta última o resíduo é posteriormente removido disposto em aterros menores e/ou cavas de mineração.

Figura 24: Bacias de cinzas úmidas

Fonte: CIENTEC, 2016.

Figura 25: Tanque de decantação de cinzas - UTE Charqueadas

Fonte: CIENTEC, 2016.

c) Outros: Além dos tipos de disposição apresentados nos itens anteriores, os resíduos considerados de alta periculosidade ainda podem ser dispostos em cavernas subterrâneas salinas ou calcárias, injetados em poços de petróleo esgotados.

Na Figura 26 pode ser observada a figura de um aterro de cava de mineração de carvão, feito com o próprio resíduo da queima do mineral extraído.

Figura 26: Área de recuperação da mina de Candiota

Fonte: CIENTEC, 2016.

3.6.3. Aspectos legais

No Brasil, logo após a promulgação da Constituição Federal de 1988, deu-se início ao processo de regulamentação dos artigos 182 e 183 sobre a política urbana que veio culminar com a promulgação da Lei nº 10.257 de 2001, denominada de Estatuto da Cidade.

Assunto de maior interesse para os municípios, o Estatuto da Cidade foi fruto do entendimento dos constituintes de 1988, ao afirmar que a política de urbanização tem por objetivo ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade, também do atendimento de compromissos assumidos pelo País no que se refere ao desenvolvimento sustentável.

Enfatiza, ainda, a questão do controle do uso e ocupação do solo; inclui a preocupação de evitar e corrigir os efeitos negativos do crescimento urbano sobre o meio ambiente como um dos objetivos do planejamento local, abrangendo as áreas urbanas e rurais e todo o território do município; induz a uma nova pratica de planejamento e gestão local visando à adoção de padrões de produção e consumo de bens e serviços e de expansão urbana compatíveis com os limites da sustentabilidade ambiental, social e econômica.

Deste modo, o Estatuto da Cidade, como também a Lei 8.080/1990 – Lei Orgânica da Saúde, a Lei nº 12.305 de 2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos, dentre outras, que coordenam ações em diferentes áreas no Brasil, incorporam conceitos, diretrizes e instrumentos, consideram interfaces setoriais e incluem dispositivos que propiciam o diálogo, a articulação e, até mesmo, a possibilidade de integração entre as diferentes políticas públicas, bem como entre os planos estabelecidos por cada uma delas, para que seja melhor definido o tema de destinação de resíduos.

No geral, temos os seguintes aspectos legais:

Segundo a Constituição Federal Título VIII da Ordem Social, Capítulo VI do Meio Ambiente em seu artigo 225: todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

Baseando-se nestes preceitos foram criadas e adaptadas uma série de leis, Decretos e Resoluções para regulamentar o gerenciamento de resíduos sólidos tais como:

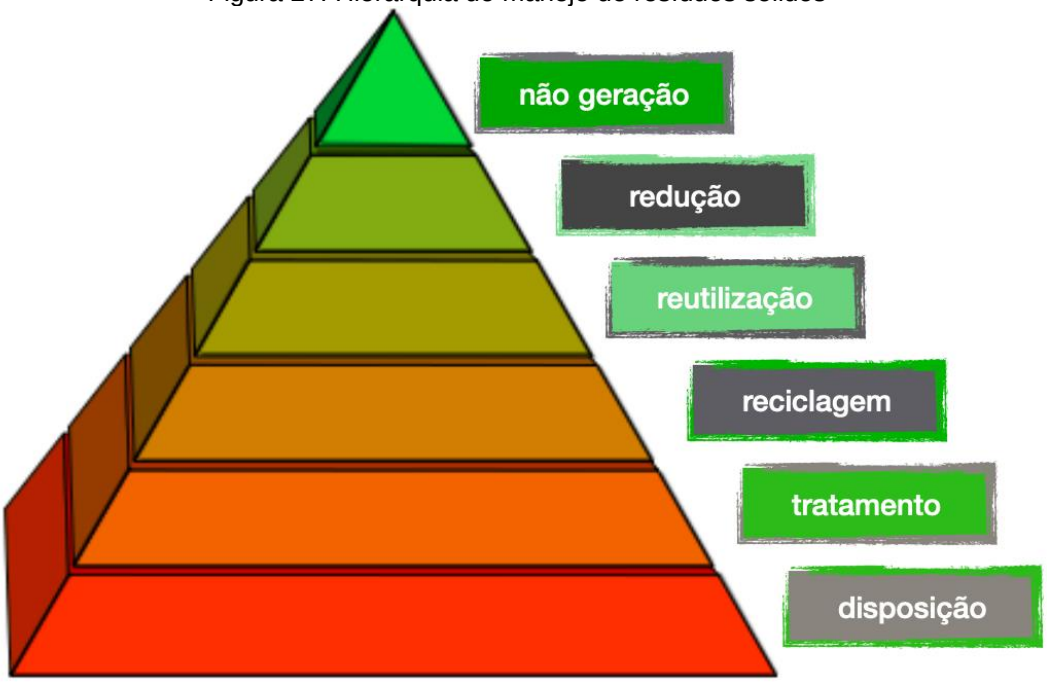
- Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010:

Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

Esta lei estabelece normas técnicas relativas ao correto gerenciamento de resíduos sólidos incluindo os perigosos, e define as responsabilidades de quem os gera, do poder público e de quem desenvolva ações para o seu gerenciamento. São elencadas definições importantes e a classificação dos resíduos sólidos conforme a sua origem e periculosidade.

O artigo 9º desta lei preconiza o que hoje é conhecido como “pirâmide, ou hierarquia do manejo de resíduos sólidos”, na qual os resíduos gerenciados devem possuir uma ordem prioritária, quais sejam: a não geração, a redução, a reutilização e a reciclagem (os três “r”), o tratamento e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27: Hierarquia do manejo de resíduos sólidos



Fonte: O autor, 2018

Também é imposta através da lei a criação do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) para a correta coleta, armazenamento e descarte do material, tal plano deve ser elaborado por responsável técnico devidamente habilitado que irá monitorar todas as etapas do processo de elaboração, implementação e operacionalização.

No artigo 20º do PGRS, temos uma lista de quem está sujeito à elaboração do PGRS e no artigo 21º o conteúdo mínimo para sua elaboração, cabe ressaltar que nos empreendimentos que necessitam do licenciamento ambiental o PGRS se faz obrigatório.

> [...] Art. 20. Estão sujeitos à elaboração de plano de gerenciamento de resíduos sólidos:
>
> I - os geradores de resíduos sólidos previstos nas alíneas “e”, “f”, “g” e “k” do inciso I do art. 13;
>
> II - os estabelecimentos comerciais e de prestação de serviços que:
> a) gerem resíduos perigosos;
> b) gerem resíduos que, mesmo caracterizados como não perigosos, por sua natureza, composição ou volume, não sejam equiparados aos resíduos domiciliares pelo poder público municipal;
>
> III - as empresas de construção civil, nos termos do regulamento ou de normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama;
>
> IV - os responsáveis pelos terminais e outras instalações referidas na alínea “j” do inciso I do art. 13 e, nos termos do regulamento ou de normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e, se couber, do SNVS, as empresas de transporte;
>
> V - os responsáveis por atividades agrossilvopastoris, se exigido pelo órgão competente do Sisnama, do SNVS ou do Suasa.
>
> Parágrafo único. Observado o disposto no Capítulo IV deste Título, serão estabelecidas por regulamento exigências específicas relativas ao plano de gerenciamento de resíduos perigosos. [...]
>
> [...] Art. 21. O plano de gerenciamento de resíduos sólidos tem o seguinte conteúdo mínimo:
>
> I - descrição do empreendimento ou atividade;
>
> II - diagnóstico dos resíduos sólidos gerados ou administrados, contendo a origem, o volume e a caracterização dos resíduos, incluindo os passivos ambientais a eles relacionados;
>
> III - observadas as normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama, do SNVS e do Suasa e, se houver, o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos:
> a) explicitação dos responsáveis por cada etapa do gerenciamento de resíduos sólidos;
> b) definição dos procedimentos operacionais relativos às etapas do gerenciamento de resíduos sólidos sob a responsabilidade do gerador;
>
> IV - identificação das soluções consorciadas ou compartilhadas com outros geradores;
>
> V - ações preventivas e corretivas a serem executadas em situações de gerenciamento incorreto ou acidentes;

> VI - metas e procedimentos relacionados à minimização da geração de resíduos sólidos e, observadas as normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama, do SNVS e do Suasa, à reutilização e reciclagem;
>
> VII - se couber, ações relativas à responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, na forma do art. 31;
>
> VIII - medidas saneadoras dos passivos ambientais relacionados aos resíduos sólidos;
>
> IX - periodicidade de sua revisão, observado, se couber, o prazo de vigência da respectiva licença de operação a cargo dos órgãos do Sisnama.
>
> § 1º O plano de gerenciamento de resíduos sólidos atenderá ao disposto no plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos do respectivo Município, sem prejuízo das normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama, do SNVS e do Suasa.
>
> § 2º A inexistência do plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos não obsta a elaboração, a implementação ou a operacionalização do plano de gerenciamento de resíduos sólidos.
>
> § 3º Serão estabelecidos em regulamento:
> I - normas sobre a exigibilidade e o conteúdo do plano de gerenciamento de resíduos sólidos relativo à atuação de cooperativas ou de outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis;
> II - critérios e procedimentos simplificados para apresentação dos planos de gerenciamento de resíduos sólidos para microempresas e empresas de pequeno porte, assim consideradas as definidas nos incisos I e II do art. 3º da Lei Complementar nº 123, de 14 de dezembro de 2006, desde que as atividades por elas desenvolvidas não gerem resíduos perigosos.
> [...]

A Lei de PNRS foi regulada através do Decreto n° 7.404 de 23 de dezembro de 2010 que também criou o Comitê Interministerial da PNRS que tem como principal objetivo apoiar a estruturação e implantação da política aprovada na Lei nº 12.3015 e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa cujo objetivo é devolver a indústria os resíduos que possam ser aproveitados e reutilizados.

- Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981:

Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Regulamentada pelo Decreto nº 99.274/1990.

Considerada uma das leis mais importantes sobre o tema, pois antes dela os municípios ou estados tinham a autonomia para eleger as suas próprias políticas em relação ao meio ambiente de forma independente, porém poucos se interessavam pelo tema, trazendo com isso um grande prejuízo a coletividade.

Após a edição desta lei, o Brasil passou a ter de uma forma efetiva uma Política Nacional do meio ambiente e um grande marco da lei foi a criação do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) formado pelos órgãos e entidades da União, do Distrito Federal, dos estados e dos municípios responsáveis pela proteção, melhoria e recuperação da qualidade ambiental no Brasil.

- Lei nº 12.527, de 18 de novembro de 2011:

Regula o acesso a informações previsto no inciso XXXIII do art. 5o, no inciso II do § 3o do art. 37 e no § 2o do art. 216 da Constituição Federal; altera a Lei no 8.112, de 11 de dezembro de 1990; revoga a Lei no 11.111, de 5 de maio de 2005, e dispositivos da Lei no 8.159, de 8 de janeiro de 1991; e dá outras providências.

- Decreto nº 7.724, de 16 de maio de 2012:

Regulamenta a Lei no 12.527, de 18 de novembro de 2011, que dispõe sobre o acesso a informações previsto no inciso XXXIII do caput do art. 5o, no inciso II do § 3o do art. 37 e no § 2o do art. 216 da Constituição.

- Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999:

Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências.

- Decreto nº 4.281, de 25 de junho de 2002:

Regulamenta a Lei no 9.795, de 27 de abril de 1999, que institui a Política Nacional de Educação Ambiental, e dá outras providências.

- Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998:

Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.

- Decreto n° 6.514, de 22 de julho de 2008:

Dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente, estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações, e dá outras providências.

- Decreto nº 7.619, de 21 de novembro de 2011:

Regulamenta a concessão de crédito presumido do Imposto sobre Produtos Industrializados - IPI na aquisição de resíduos sólidos.

- Decreto nº 5.098, de 3 de junho de 2004:

Dispõe sobre a criação do Plano Nacional de Prevenção, Preparação e Resposta Rápida a Emergências Ambientais com Produtos Químicos Perigosos - P2R2, e dá outras providências.

- Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009:

Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.

- Resolução CONAMA nº 264, de 26 de agosto de 1999:

Trata de coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer para fabricação de cimento.

- Resolução CONAMA n° 264, de 26 de agosto de 1999:

Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos.

- Resolução CONAMA nº 313, de 29 de outubro de 2002:

Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais.

- Resolução CONAMA nº 316, de 29 outubro de 2002:

Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Foi alterada pela Resolução 386/06.

- Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002:

Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

3.7. Cimento e matrizes cimentícias

3.7.1. Definição

Cimento é uma palavra originada do latim *caementu*, um tipo de pedra natural de rochedos, não esquadrejada, utilizada na Roma antiga, datado há cerca de 4.500 anos. Sua história é, porém, muito mais antiga.

No Egito antigo, era utilizado uma mistura de gesso calcinado rígida e resistente, em seus imponentes monumentos. Grandes obras como Panteão e o Coliseu, de origem grega e romana, utilizaram em suas construções uma massa obtida de solos de origem vulcânica, provenientes da ilha grega de Santorino ou

das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento quando adicionada água.

O desenvolvimento do cimento ocorre nas mãos do inglês John Smeaton, em suas pesquisas para encontrar um aglomerante para construir o farol de Eddystone em 1756, e com James Parker, que descobriu em 1791 e patenteou em 1796 um cimento com o nome de Cimento Romano, composto por sedimentos de rochas da ilha de Sheppel, e ganha destaque com as pesquisas e publicações feitas pelo engenheiro francês Louis José Vicat em 1818 (CARVALHO, 2008; KAEFER, 1998).

No entanto, o marco para a história do cimento atual se deu pelas mãos do construtor inglês Joseph Aspdin, com suas experiências envolvendo processos de mistura, queima e moagem de argila e pó de pedra calcária retirado das ruas. Neste desenvolvimento, Aspdin conseguiu um material em pó, no qual ele misturava uma certa quantidade de água, produzindo a argamassa que após secar, obtinha-se um material de dureza parecida com as pedras utilizadas nas edificações.

Por fim, o construtor patenteou este pó em 1824, com o nome de cimento Portland, devido às semelhanças de seu produto final, com a rocha *Portlandstone*, da ilha britânica de Portland, que tem cor resistência e durabilidades semelhantes e que eram extraídas nesta pequena península para serem utilizadas nas construções (CARVALHO, 2008; KAEFER, 1998).

O cimento Portland passou ainda por uma difícil fase de desenvolvimento, até que em 1845, Isaac Charles Johnson, encarregado por Aspdin em produzir o cimento Portland, após várias observações, mensurou a elevação de temperatura da queima na produção do clínquer em torno de 1450°C, que após moído em pó, obteve-se um cimento mais fino e de excelente qualidade (PEDROSO, 2009; KAEFER, 1998).

Matriz cimentícia pode ser definida com os compósitos formados pela escolha de materiais multifásicos específicos com propriedades cerâmicas cimentantes.

A cimentação pode ocorrer por precipitação de sílica, carbonato, óxidos de ferro, entre outros elementos, bem como por ação bacteriana com a formação de óxido de ferro e de carbonato de cálcio. Esta precipitação pode se dar por via

natural, como ocorre na sedimentação das rochas ígneas, e de forma artificial, que é o caso do cimento Portland comumente utilizado.

A NBR 16697 define cimento Portland como sendo um ligante hidráulico, obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais, em teores pré-estabelecidos (ABNT, 2018).

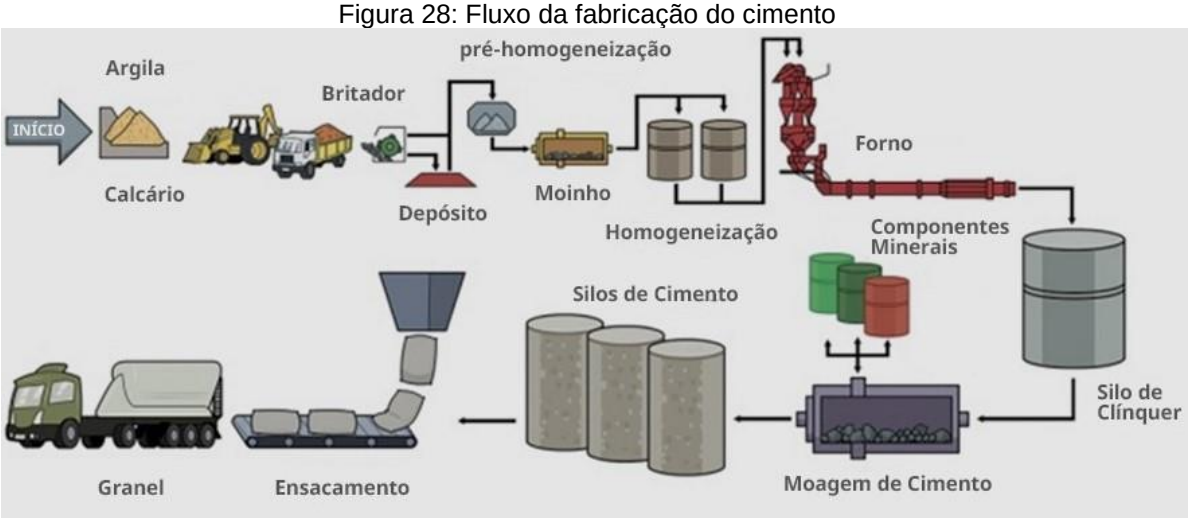
3.7.2. Produção

O clínquer é um ligante hidráulico, responsável pela reação química do cimento na presença da água, causando o seu endurecimento (TEIXEIRA, 2013), sendo o principal reagente do cimento, é obtido pela calcinação de uma mistura composta de calcário, que representa 80 % da matéria prima, e 20% de argila.

Os materiais são submetidos a 1450 °C em forno rotativo. Depois de preparado e moído, o clínquer é misturado com cerca de 3% de gesso a fim de produzir o cimento Portland.

A Figura 28 ilustra um fluxograma dos processos de fabricação do cimento.

Figura 28: Fluxo da fabricação do cimento



Fonte: cimentomaua.com.br

O processo de produção de cimento é considerado poluidor para o meio ambiente. Estima-se que para cada tonelada de cimento Portland fabricado, seja emitido uma tonelada de CO_2.

Isto posto, a indústria cimenteira emite de 5 a 7% de CO_2 em todo o mundo. O consumo atual de concreto no mundo é de cerca de 19 bilhões de toneladas ao ano (WITZKE, 2018; TEIXEIRA, 2013; IEA, 2019; XU *et al.*, 2017).

Outro ponto relevante na produção do clínquer acontece a extração das matérias-primas que também contribui para a emissão de CO_2 (CARVALHO, 2017). Nas Tabelas 10 e 11 pode-se observar o consumo de carvão, dentre outras fontes de energia, para a produção do cimento Portland no Brasil.

Tabela 10: Consumo de carvão na indústria cimentícia Brasileira

Fontes	2012	2013	2014	2015	2016
Gás natural	55	31	25	12	5
Carvão mineral	108	133	123	70	60
Lenha	81	83	79	70	64
Óleo diesel	70	68	72	60	55
Óleo combustível	17	17	14	9	5
Eletricidade	645	673	681	611	568
Carvão vegetal	142	128	122	109	99
Coque de petróleo	3.578	3.696	3.763	3.386	3.048
Outros	440	458	460	417	366
Total	5135	5287	5338	4744	4271

Fonte: BEN 2017 10^3 tep

Tabela 11: Consumo de carvão na indústria cimentícia Brasileira

Fontes	2012	2013	2014	2015	2016
Carvão mineral	2,1	2,5	2,3	1,5	1,4
Óleo combustível	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1
Eletricidade	12,6	12,7	12,8	12,9	13,3
Carvão vegetal	2,8	2,4	2,3	2,3	2,3
Coque de petróleo	69,7	69,9	70,5	71,4	71,4
Outros	12,6	12,1	11,9	11,8	11,5
Total	100	100	100	100	100

Fonte: BEN 2017 (%)

3.7.3. Cenário atual do mercado de cimento no Brasil

A indústria cimenteira no Brasil contribui significativamente para o desenvolvimento do país, buscando a concordância com as exigências da sustentabilidade, procurando a referência internacional. Em 2016, o Brasil foi o sexto maior produtor e o oitavo maior consumidor de cimento no mundo.

Com atualmente 100 plantas, das quais 62 são unidades integradas e 38 unidades de moagem, presentes em 88 municípios e 24 estados, as fábricas

estão localizadas, em sua maior parte, na costa do país (VISEDO e PECCHIO, 2019).

Nos períodos de 2003 a 2014, o consumo anual de cimento no Brasil praticamente dobrou chegando a 72 milhões de toneladas, atingindo atualmente cerca de 53 milhões de toneladas por ano no período de abril de 2018 a março de 2019 (SINC, 2019).

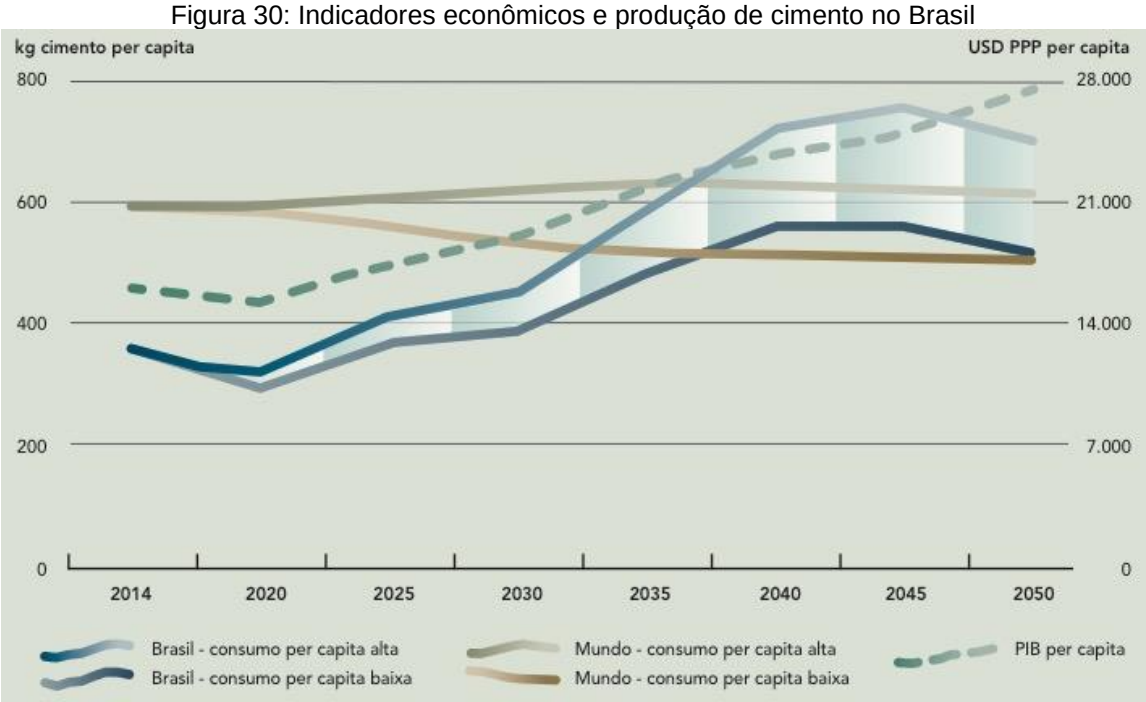
O consumo per capita brasileiro encontra-se em 260 kg/habitante, sendo que a média mundial é de 553 kg/habitante/ano. Considerando o aumento populacional, em trajetória crescente, e sendo o cimento a base para a infraestrutura, evidencia-se a tendência de aumento na produção do insumo nas próximas décadas. Conciliar o crescimento com a redução das suas emissões de carbono é primordial para o setor (VISEDO e PECCHIO, 2019).

Nas Figuras 29 e 30 pode-se observar a projeção da produção de cimento no Brasil de 2014 até o ano de 2050, e os indicadores econômicos para projeção do consumo *per capita* de cimento neste período, respectivamente.

Figura 29: Projeção da produção de cimento no Brasil

Fonte: VISEDO e PECCHIO, 2019.

Figura 30: Indicadores econômicos e produção de cimento no Brasil



Fonte: VISEDO e PECCHIO, 2019.

O Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) e a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), com o apoio da Agência Internacional de Energia (IEA), Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (CSI) do Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD), da Corporação Financeira Internacional (IFC), e ainda os grandes centros acadêmicos de pesquisa no país, realizaram em Brasília o lançamento do Roadmap Tecnológico do Cimento, que traça as principais diretrizes para a redução de cerca de 35 % nas emissões de carbono pela indústria cimenteira do Brasil até 2050.

O documento propõe alternativas para contribuir na redução das emissões de CO_2 pela indústria nacional de cimento, adotando medidas que se concentram em quatro principais áreas na produção dos insumos:

1) adições e substitutos de clínquer por subprodutos alternativos residuais de outras atividades;

2) combustíveis alternativos para o processamento e sintetização dos insumos, utilizando a carga energética de biomassas e resíduos em substituição a combustíveis fósseis não renováveis;

3) busca de eficiência energética, mediante o desenvolvimento de sistemas e equipamentos de menor consumo térmico e/ou elétrico; e

4) pesquisa e desenvolvimento em tecnologias emergentes, como a captura de carbono e sintetização de novos materiais cerâmicos.

Com base nos avanços tecnológicos, o crescimento populacional, e o desenvolvimento social do país como um todo, estima-se para os próximos anos uma demanda cada vez maior dos insumos da indústria cimenteira, o que pode trazer maiores perspectivas para o aumento na produção dos insumos e, consequentemente com o enfoque mais sustentável, o emprego de resíduos neste setor também poderá ser diretamente proporcional.

A exemplo da China, onde as tecnologias de Recuperação de Resíduos Calcinados (WHR) e de reutilização de Resíduos Pré-calcinados (NSP) tem estado em alta, houve uma fusão de pequenas empresas com alto consumo de energia, possibilitando o aumento de eficiência, além de uma série de novos padrões de consumo de energia, e o aumento de outras tecnologias, o que diminuiu o consumo de eletricidade na produção de cimento (WEI e CEN, 2019).

Embora a produção de cimento na China tenha aumentado ano a ano, um fator importante pode ser destacado: a razão da utilização de clínquer por cimento, declinou devido à adição de cinzas volantes, escória, calcário e cinzas de alto forno, o que denota que o aumento da produção de cimento não segue a relação de aumento das emissões de CO_2 por cimento diretamente (XU *et al.*, 2019; WEI e CEN, 2019).

Assim, as perspectivas para o crescimento da indústria cimenteira no Brasil, e o emprego de resíduos neste setor tende a seguir exemplos de novas tecnologias e novos meios de mitigação dos impactos ambientais, tornando os produtos e processos cada vez menos poluidores e cada vez mais eficientes.

3.7.4. Estrutura e composição química do cimento

Cimento Portland é uma substancia alcalina, cuja composição é formada em sua maior parte de silicatos e aluminatos de cálcio que, por hidrolise, originam compostos cristalinos hidratados e gel.

Os silicatos e aluminatos liberam hidróxido de cálcio durante a reação com a água. Os cristais aciculares se entrelaçam à medida que o processo de hidratação avança, criando a estrutura resistente mecanicamente (TEIXEIRA, 2013; MEHMET, 2006).

Com a calcinação das matérias-primas usadas na fabricação do cimento Portland, as substâncias reagem entre si dando origem a uma série de produtos mais complexos, alcançando o equilíbrio químico de materiais reagentes que são e responsáveis pelas características do cimento, causadas das reações que ocorrem entre esse aglomerante com água ou agregados.

Estes reagentes são classificados em quatro fases principais, cuja fórmula é comercialmente resumida em uma notação simbólica, os principais compostos químicos do cimento, sendo sua maior parte os silicatos, podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12: Principais compostos do cimento

Composto	Nome	Constituição	Abreviação	Teor
Silicato tricálcico	alita	$3CaO•SiO_2$	C_3S	42-60 %
Silicato dicálcico	belita	$2CaO•SiO_2$	C_2S	10-35 %
Aluminato tricálcico	celita	$3CaO•Al_2O_3$	C_3A	6-13 %
Ferroalumitato tetracálcico	milenita	$4CaO•Al_2O_3•Fe_2O_3$	C_4AF	5-12 %

Fonte: WITZKE, 2018; NOGUEIRA, 2011; SANTANA, 2002; MEHMET, 2006, adaptado.

Cada composto é responsável por determinadas características do aglomerante hidráulico. O C_3S é o principal composto, apresenta início e fim de pega (que é o intervalo de tempo em que a mistura hidratada passa da consistência de pasta para a mais rígida) em poucas horas, sendo a resistência final à compressão nesta desta fase em torno de 70 MPa em 360 dias (NOGUEIRA, 2011; SANTANA, 2002; MEHMET, 2006).

Os silicatos presentes no cimento não são compostos puros, também podem ser identificadas pequenas quantidades de óxidos livres, responsáveis por certas características que interferem nas propriedades hidráulicas dos silicatos. A Tabela 13 apresenta os principais óxidos encontrados na composição do clínquer do cimento.

Tabela 13: Composição aproximada do clínquer no cimento

Óxido	Teor (% massa)
CaO	60-67 %
SiO_2	17-25 %
Al_2O_3	3-8 %
Fe_2O_3	0,5-6 %
MgO	0,1-4 %
SO_3	0,7-3 %
CO_2	0-1 %
Na_2O	0-1 %
K_2O	0-1 %
TiO_2	0-0,5 %
P_2O_5	0-0,2 %
Mn_2O_3	0-0,2 %

Fonte: MEHMET, 2006; CHANDRA, 2009; NOGUEIRA, 2011; CAILLAHUA, 2017, adaptado.

Dos óxidos secundários, alguns possuem relevante importância na composição do cimento: óxido de sódio (Na_2O) e óxido de potássio (K_2O) (também conhecidos como álcalis), pois eles podem reagir com agregados, levando a fases tardias de reações que irão interferir na qualidade da coesão entre as partículas cristalinas, mesmo após a hidratação das fases principais. Neste caso é desejável o menor percentual possível desses tipos de compostos na produção do cimento (NOGUEIRA, 2011).

A cal livre, por exemplo, possui características de expansão, seu teor máximo deve ser controlado no processo de fabricação do cimento. A cal livre é decorrente de uma combinação incompleta da cal no processo de produção do clínquer.

As abreviações típicas para os óxidos são elencadas na Tabela 14.

Tabela 14: Abreviações dos principais óxidos no cimento.

Componente	Abreviatura
SiO_2	S
Al_2O_3	A
Fe_2O_3	F
CaO	C
MgO	M
SO_3	Š

Fonte: MEHMET, 2006.

As características dos produtos finais do cimento e suas funções são:

• C_3S - dá origem a resistência inicial do cimento, contribui para o endurecimento rápido, possui alto calor de hidratação e alta resistência inicial. Apresenta forma polimórfica, sem relevantes modificações quanto a estrutura cristalina (GOBBO, 2003).

• C_2S - apresenta menor velocidade de reação de hidratação, é observado com maior frequência na forma arredondada, pouco influencia na resistência inicial do cimento, no entanto se torna mais importante para a resistência ao longo do tempo, apresenta baixo calor de hidratação (CIRINO, 2016);

• C_3A - possui maior velocidade de hidratação e maior calor de hidratação, reage em poucos minutos com a água e também possui a função de controlar o tempo de pega. O teor incorporado deve ser baixo para se evitar ataques dos sulfatos no cimento (WARD e FRENCH, 2006; CHANDRA, 2009).

• C_4AF - contribui de maneira pouco significativa para a resistência do cimento, apresenta baixo calor de hidratação, sendo um composto resistente a sulfatos e responsável pela coloração escura dos cimentos (GOBBO, 2003).

3.7.5. Tipos de cimento

O cimento Portland, como mencionado, é composto de clínquer e de adições, sendo o clínquer o principal componente em todos os tipos de cimento Portland, as adições acrescentadas a esta matéria base vai determinar a variação de um tipo de cimento para outro, definindo assim os diferentes tipos de cimento (TEIXEIRA, 2013).

As adições são outras matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem que o cimento assuma diferentes comportamentos, dependendo da utilização final, que são diversos tipos de cimento Portland hoje disponíveis no mercado.

Essas outras matérias-primas são basicamente materiais carbonáticos como o gesso, e os materiais pozolânicos, que podem ser naturais ou artificiais, como as escórias de alto-forno (ABCP, 2002).

Os diferentes tipos de cimentos atendem demandas especificas para cada finalidade de utilização. Os cimentos Portland são representados pela sigla CP (abreviatura de Cimento Portland), acompanhadas de algarismos romanos indicando a classe em que o cimento se enquadra (CIRINO, 2016).

As classes de cimento comercializados e suas respectivas composições mineralógicas e químicas são elencadas na nas Tabelas 15 a 17.

Tabela 15: Siglas e classes do cimento Portland

Cimento Portland (tipo)	Sigla	Variações	Descrição
Comum	CP I	CP I	Cimento sem adições
		CP I-S	Cimento com adições
Composto	CP II	CP II-E	Composto com escória
		CP II-Z	Composto com pozolana
		CP II-F	Composto com *filler*
Alto forno	CP III		Adição de escória de alto forno
Pozolânico	CP IV		Adição de pozolanas
Alta resistência inicial	CP V-ARI		Maior porcentagem de C_3S
Resistente a sulfatos	RS		Menor porcentagem de C_3A
Branco	CPB	Estrutural	Ausência de C_4AF, mais clínquer
		Não Estrutural	Ausência de C_4AF, menos clínquer

Fonte: NOGUEIRA, 2011; NBR 16697,18 – adaptado.

Tabela 16: Limites de composição do cimento Portland

Cimento Portland	Variações	Resistência	Clínquer + Sulfatos (Ca)	Escória de alto forno	Material Pozolânico	Material carbonático[5],
Comum	CP I	25, 32 ou 40	95 – 100	0 – 5		
	CP I-S		90 – 94	0	0	6 – 10
Composto	CP II-E		51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
	CP II-Z		71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
	CP II-F		75 – 89	0	0	11 – 25
Alto forno	CP III		25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Pozolânico	CP IV		45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Alta resistência inicial	CP V-ARI	ARI	90 – 100	0	0	0 – 10
Branco	Estrutural	25, 32 ou 40	75 – 100	-	-	0 – 25
	Não Estrutural	-	50 – 74	-	-	26 – 50

Fonte: NBR 16697,18 – adaptado.

5 O material carbonático é proveniente das rochas sedimentares, cuja composição principal são os carbonatos. Os principais tipos são o calcário (calcita - $CaCO_3$) e a dolomita ($CaMg(CO_3)_2$). Os tipos de rochas carbonáticas são o cré e o tufo.

Tabela 17: Requisitos químicos do cimento Portland

Sigla	Resíduo insolúvel (RI)	Perda ao Fogo (PF)	Óxidos de magnésio (MgO)	Trióxido de enxofre (SO_3)
CP I	≤ 5,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP I-S	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP II-E	≤ 5,0	≤ 8,5	-	≤ 4,5
CP II-F	≤ 7,5	≤ 12,5	-	≤ 4,5
CP II-Z	≤ 18,5	≤ 0,0	-	≤ 4,5
CP III	≤ 5,0	≤ 8,5	-	≤ 4,5
CP IV	-	≤ 6,5	-	≤ 4,5
CP V	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Estrutural	≤ 3,5	≤ 12,0	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Não Estrutural	≤ 7,0	≤ 27,0	≤ 10,0	≤ 4,5

Fonte: NBR 16697,18 – adaptado.

% massa

Os cimentos possuem uma imensa variedade alguns deles em composições especiais, tais como à base de óxido de magnésio, de fosfato de cálcio, o cimento colorido, o expansivo (K, M, S e O), cimento de pega e endurecimento rápido, cimento com alto teor de ferro, cimento termoplástico, cimento à base de cal e à base de gesso, cimento à base de materiais orgânicos, cimento geopolimérico, e cimento à base de alumino silicatos.

BELÉM (2011)[6], apud CIRINO (2016), apresenta algumas peculiaridades dos principais cimentos produzidos no Brasil:

- Cimento Portland Comum - CPI: não possui nenhum tipo de adição durante o processo de fabricação, além da gipsita como retardador do tempo de pega. Este foi um os primeiros cimentos Portland produzidos, servindo de referência para se avaliar as propriedades dos demais cimentos produzidos (ABCP, 2002);
- Cimento Portland Composto - CPII: representam cerca de 75% da produção de cimentos no Brasil, sendo utilizados fortemente na indústria da construção civil, a qual é responsável por praticamente toda a demanda;

6 BELÉM, Francisco Aldemir Teles. Desenvolvimento de pastas cimentantes utilizando cimento Portland composto para cimentação de poços de petrolíferos. 2011. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, C, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

- Cimento Portland de alto forno e pozolânico – CPIII e CPIV: com a necessidade de reduzir o consumo energético, sendo o cimento responsável por cerca de 8% da emissão mundial de CO_2 (ULUSU et al, 2016), foram adicionados resíduos industriais com propriedades pozolânicas ao cimento;

As adições minerais no processo dos cimentos CPIII e CPIV modificam a microestrutura dos compostos cimentícios reduzindo a permeabilidade, e o calor de hidratação, no entanto, apresentam menor velocidade de hidratação.

- Cimento Portland Alta Resistência Inicial – CPV ARI: apresenta a propriedade de atingir altos valores de resistência nas primeiras idades. Em sua composição há a adição de até 5% de material carbonático (*filler* calcário, ou carbonato de cálcio), clínquer e por sulfato de cálcio durante a moagem;
- Cimento resistente a sulfatos: qualquer cimento cujo teor de C_3A (alumina do clínquer) é de até 8% e as adições carbonáticas em torno de 5%; o cimento de alto-forno possui sua resistência a sulfatos quando o teor de escória se situa entre 60% e 70% em massa; no caso do cimento pozolânico, a adição mineral é entre 25% e 40%, em massa; e
- Cimento Portland de baixo calor de hidratação: projetados para diminuírem a taxa de calor liberado nas reações de hidratação do cimento, muito frequente em estruturas com grandes volumes, pois com o aumento de temperatura, os cimentos podem apresentar fissuras de origem térmica, ocasionando diminuição do desempenho nas matrizes de concreto.

3.7.6. Hidratação dos componentes do clínquer

O C_3S é o componente de clínquer mais importante, pois controla predominantemente o desenvolvimento da resistência e o processo de endurecimento da pasta de cimento (MEHMET, 2006).

Sob hidratação de C_3S obtém-se silicatos de cálcio hidratados ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ = CSH) e hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$ = CH). Os CSH são responsáveis pela resistência do cimento. Nesta categoria também se enquadram silicoaluminatos de cálcio como a gelenita e anortita, presentes em cinzas sulfatadas. (SANTANA, 2002).

As duas principais fases, quando no contato com água, dá início ao processo de hidratação, representada pelas Equações 6 e 7:

Equação 6: Reação de silicato tricálcico com água

$$2C_3S + 6H_2O \rightarrow C_3S \bullet 3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

Equação 7: Reação de silicato dicálcico com água

$$2C_2S + 4H_2O \rightarrow C_3S_2 \bullet 3H_2O + Ca(OH)_2$$

Devido à sua solubilidade limitada, as fases C-S-H precipitam e preenchem o espaço inicialmente ocupado pela água, levando a uma diminuição da porosidade, o tempo de pega e por último atingindo a resistência. A razão Ca/Si da fase C-S-H resultante geralmente cai na faixa de 1,4 e 2,0 (MEHMET, 2006; CHANDRA *et al.*, 2009; QINGFA *et al.*, 2015).

Embora sua hidratação seja significativamente mais lenta, verifica-se que o mecanismo de hidratação de C_2S (belita) é próximo ao de C_3S (Equação 6). No entanto, também é visto que a hidratação de C_2S produz várias fases C-S-H distintas com razões Ca/Si variando de 1,1 a 1,6 (QIAO *et al.*, 2005; MEHMET, 2006; QINGFA *et al.*, 2015).

A experiência derivada de estudos anteriores sobre hidratação de C_3A indica que na ausência de $CaSO_4$, a hidratação de C_3A resulta na formação de uma fase de aluminato de cálcio hidratado, C_3AH_6, por meio de um mecanismo de reação fortemente influenciado pela temperatura e presença de $Ca(OH)_2$ (TELESCA, 2013).

A rápida hidratação de C_3A causa um endurecimento repentino da pasta de cimento, que é denominada como pega rápida (do inglês *flash set*).

A pega rápida é controlada pela moagem de clínquer de cimento com gesso ($CaSO_4 \bullet 2H_2O$), que altera o mecanismo de hidratação do C_3A. Um sulfoaluminato de cálcio insolúvel, também conhecido como etringita (AFt), é gerado a partir da reação entre C_3A e gesso, de acordo com a Equação 8.

Equação 8: Reação de aluminato tricálcico, sulfato de cálcio e água

$$C_3A + 3C\check{S}H_2 + 26H \rightarrow C_6A\check{S}_3H_{32} \text{ (etringita)}$$

No entanto, a etringita é eventualmente consumida e os hidratos de monosulfatos de cálcio (AFm) são formados. Deve-se ter em mente que a formação

de etringita resulta em expansão volumétrica nas estruturas; portanto, o teor de C_3A dos cimentos a serem utilizados em ambientes agressivos por sulfatos é limitado.

Sabe-se que a hidratação das fases C_4AF é semelhante à da C_3A, mas as taxas de reação são diferentes. A hidratação de C_4AF na presença de gesso e $Ca(OH)_2$ resulta na formação de análoga de etringita, como monosulfato e hidratos de alumino e cálcio. Alumino silicatos de cálcio e ferro silicatos de cálcio, também conhecidos como *hydrogarnets* (composto não reativo e estável), também são produzidos (MEHMET, 2006; QIAO *et al.*, 2005).

Estudos realizados sobre interações entre C_3S e C_3A ou C_4AF apontam que a taxa de hidratação pode ser retardada ou acelerada. Além disso, é sabido que a hidratação de C_3S na presença de C_3A produz C_4AH_x, C-S-H e $Ca(OH)_2$. A hidratação de C_4AF e $Ca(OH)_2$ na presença de C_3S, por outro lado, resulta na geração de fases de *hydrogarnets* como C_6AFSH (MEHMET, 2006; SADIQUE e AL-NAGEIM, 2012).

3.7.7. Hidratação dos cimentos Portland

A reatividade hidráulica pode ser definida como a capacidade reativa de hidratos proporcionar rigidez a um material independentemente de adição de cal. Estes hidratos obtidos têm propriedades coesivas e ligantes (SANTANA, 2002).

As reações de hidratação são muito complexas, e ocorrem por meio de reações entre compostos anidridos, silicatos e aluminatos, com a água dando origem aos produtos hidratados. Em cada fase da hidratação, as reações ocorrem com velocidade e mecanismos diferentes, elas podem ser divididas em duas partes.

A primeira é caracterizada pela dissolução e precipitação, onde ocorre a dissolução dos compostos anidridos também com a formação de hidratos na solução aquosa com baixa solubilidade, precipitando os produtos hidratados.

No segundo mecanismo, o processo de hidratação ocorre na fase sólida, e as reações ocorrem na superfície dos grãos do cimento (CIRINO, 2016; RATHBONE, 2010; WIITZKE, 2018). Os principais produtos de hidratação possuem as quantidades volumétricas e formatos de grão conforme a Tabela 18.

Tabela 18: Produtos da hidratação do cimento Portland

Produto	Quantidade	Formas
Silicato de cálcio hidratado (C-S-H)	50% a 60% do volume de sólidos	Pequenos cristais fibrilares
Portlandita $Ca(OH)_2$	20% a 25% do volume de sólidos	Cristais prismáticos grandes hexagonais
Sulfoaluminatos	15% a 20% do volume de sólidos	Cristais prismáticos aciculares

Fonte: TEIXEIRA, 2013 – adaptado.

Segundo Miranda (2008), Nóbrega (2009) e Mehmet (2006), são cinco os principais estágios de hidratação dos cimentos Portland: (I) período de pré-indução, (II) período de indução, (III) período de aceleração, (IV) período de desaceleração e (V) período de difusão. Estes estágios estão descritos a seguir:

I) nos primeiros minutos de contato com a água, denominada **período de pré-indução**, é observada uma rápida hidratação dos componentes do clínquer. Durante esse período, as concentrações de Ca^{2+}, SO_4^{2-} e OH^- na fase líquida aumentam; as fases C-S-H se desenvolvem a partir do C_3S envolvendo as partículas de cimento (camada de gel precipitada), e cristais hexagonais de CH (hidróxido de cálcio) se depositam nos interstícios das partículas de cimento. A etringita (AFt - alumina trisulfato), também é produzida devido à rápida hidratação do C_3A juntamente com CŠH. A hidratação de C_4AF produz fases análogas;

II) após o período de pré-indução, a taxa de hidratação é significativamente reduzida devido à deposição de produtos de hidratação de C_3S e C_2S na superfície das partículas de cimento que não reagiram, formando uma camada adicional (C-S-H exterior). A hidratação prossegue muito lentamente por algumas horas. Esse período é chamado **período de indução** ou período de inatividade. Ocorre redução na taxa liberação de calor. Após o término do período dormente tem-se início à pega, e a hidratação começa a acelerar novamente;

III) no **período de aceleração**, a hidratação acelera novamente particularmente associada à hidratação dos aluminatos C_3A e C_4AF formando os cristais aciculares de etringita. Durante esse estágio, outras fases C-S-H são desenvolvidas de forma interior, diminui-se a porosidade do produto e ocorre um novo período de liberação de calor, e é onde se tem o fim da pega.

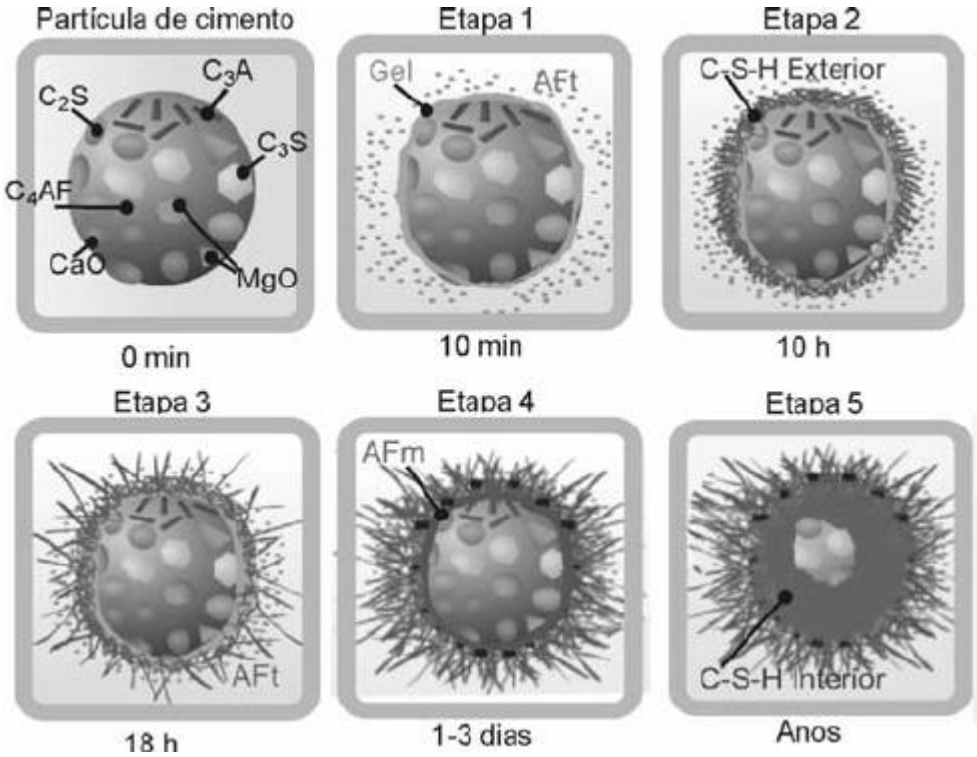
IV) no final de aproximadamente 12 horas após o contato do cimento com a água, a hidratação começa a **desacelerar** gradualmente, mas as fases C-S-

H continuam a se desenvolver interiormente devido à hidratação de β-C_2S e C_3S (período pós-indução), as reações ocorrem em estado sólido. Ocorrem também formações dos AFm (monosulfatos).

V) em razões água/cimento suficientes, a difusão na hidratação do cimento continua até que todo o cimento seja hidratado, ocorre um aumento gradual da densidade macroestrutural da pasta de cimento que causa o preenchimento dos poros. No entanto, em baixas relações água/cimento, o cimento não reagido permanece, mesmo após longos períodos de tempo.

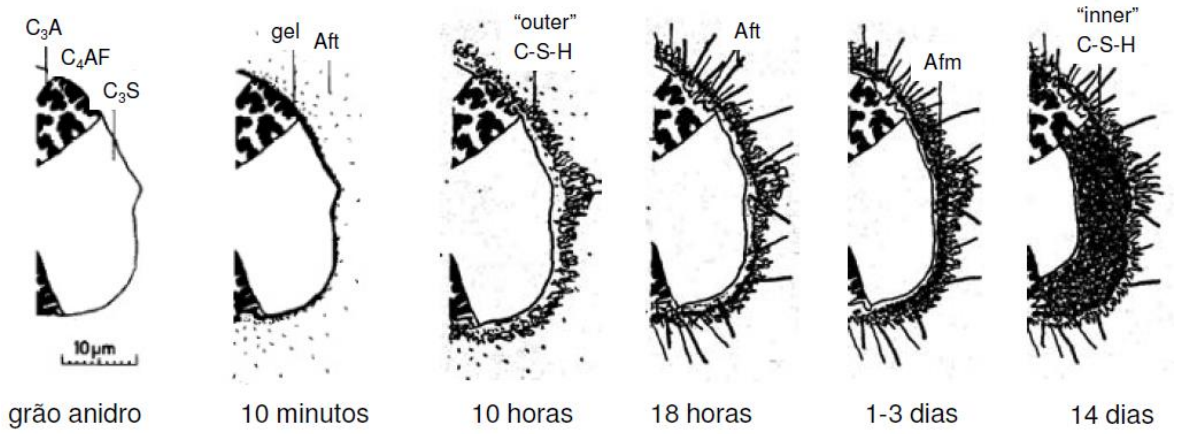
As Figuras 31 e 32 ilustram as fases de hidratação dos grãos de cimento.

Figura 31: Mecanismo de hidratação dos grãos de cimento



Fonte: COSTA e CARVALHO, 2019.

Figura 32: Mecanismo de hidratação dos grãos de cimento



Fonte: SCRIVENER, 1989.

3.8. Reaproveitamento de resíduos na construção civil

De acordo com a ACAA (2007), 33 milhões de toneladas de FGD foram gerados nos Estados Unidos, na qual somente 10,3 milhões de toneladas foram utilizadas em representando 31% de reutilização.

O gesso FGD foi o mais utilizado com 75%, a maioria utilizada na fabricação de placas ou painéis de gesso. Ainda em 2007, de aproximadamente seis milhões de toneladas de FGD, 5,1 milhões de toneladas foram reutilizadas em uma margem de 84% como material de enchimento (conhecido no ramo da construção como *filler*) na estabilização de solos contaminados, e material de base para construção de estradas (RATHBONE et al., 2010).

Existem poucos relatos da utilização do gesso FGD na construção civil, no entanto existem usos nobres para este tipo de resíduo, como na produção de cimento, concreto e outros materiais construtivos que ainda são pouco explorados, principalmente no Brasil.

O FGD de via seca, material proveniente dos Sistemas de Absorção por Spray (SDA) misturado com cinzas volantes, tem sido usado comercialmente no ramo da engenharia civil na Europa e tem sido um tópico de estudo em projetos de pesquisa. Foram realizadas aplicações de engenharia civil, incluindo construção de aterros, estrutura e base de estradas (ACAA, 2007).

Nos países nórdicos, existem seis estações em usinas a carvão que misturam FGD seco e cinzas volantes, também com adição de cimento, o material FGD úmido é misturado com cinzas volantes para produzir sólidos fixadores purificadores (FSS) ou *Pozzotec*.

Em Västerås, Suécia, o um produto chamado *Cefill* é produzido com 30 % a 70 % de FGD seco, 30 % a 70 % de cinza volante e 0 % a 8 % de cimento é utilizado em coberturas e no tratamento de solos para evitar a contaminação do fluxo de águas subterrâneas. As resistências de compressão variam de 5 a 30 MPa e a permeabilidade à água varia de 10 a 12 cm/s. Um produto estabilizado semelhante chamado *REALIT* é produzido em usinas a carvão em Dürnrohr, na Áustria (BENGTSSON, 2001).

Nos Estados Unidos, o uso de resíduos e derivados de produtos industriais na fabricação de cimento Portland comum em concretos rápidos bem como construções de concreto pré-moldado é um tema em constante pesquisa, principalmente em se tratando de gesso FGD, pois são resíduos gerados em larga escala.

Por ter propriedades pozolânicas, estes subprodutos são estudados a fim de substituir a gipsita natural, ou a areia natural para a produção de tijolos autoclavados, pré-moldados e concretos aerados, ou em projetos internos na qual a solubilidade do produto não seja afetada (TELESCA *et al.*, 2012).

Na *Sussex Corporate Center Pilot*, Village of Sussex, Wisconsin, em 1995, foram utilizadas grandes quantidades de cinzas em projetos de pavimentação, que não requereu grandes manutenções durante muito tempo, apenas para reposição de superfície. O projeto custou 5,5% do custo original, com uma economia de U$ 34,000,00, adicionando-se ao custo também calçadas com a mesma mistura.

Foram realizados testes de longa data para estes pavimentos, concluindo-se, em suma, que a taxa de resistência inicial para as cinzas classe sulfatadas foram maiores do que as de classe aluminiosas, e a resistência à compressão e agressão por ácidos das cinzas classe aluminosas foi maior comparado à classe sulfatada (RAMME e THARANIYIL, 2013).

AACA, em 2016, publica um acervo de utilizações para os produtos da combustão do carvão, dentre eles, o FGD apresenta com potencial elemento para a fabricação de gesso granular para agricultura em Ohio e Wisconsin, nos Estados Unidos; este mesmo produto granular foi utilizado na produção de placas de gesso acartonado no Canadá; fazendeiros utilizam o FGD para adensamento das pavimentações e correções do solo contra erosão em Chicago e Winona, Minnesota.

4 METODOLOGIA

4.1. Materiais

A amostra de cinzas obtida do sistema de dessulfurização de gases por via úmida foi fornecida pela Usina Termoelétrica Pampa Sul, localizada no município de Candiota, RS.

Para os ensaios de composição das matrizes, o cimento utilizado foi do tipo comercial CP II-F 32, por possuir teor de clínquer + gesso entre 75-89 % em massa; sem adições de escória granulada de alto-forno (sigla E), nem pozolanas adicionais, com adição de material carbonático entre 11-25 % em massa.

Para a composição da argamassa, foi utilizada primeiramente areia (agregado) de padrão normal, manipulada em laboratório de acordo com especificações técnicas (NBR 7214, ABNT, 2015), fornecidas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

Em segunda etapa, foi analisada a areia do tipo normal comercial, comumente conhecida como areia média lavada, a qual estudou-se a granulometria, teor de umidade e possibilidade de posterior utilização em comparativo com a areia normalizada em laboratório.

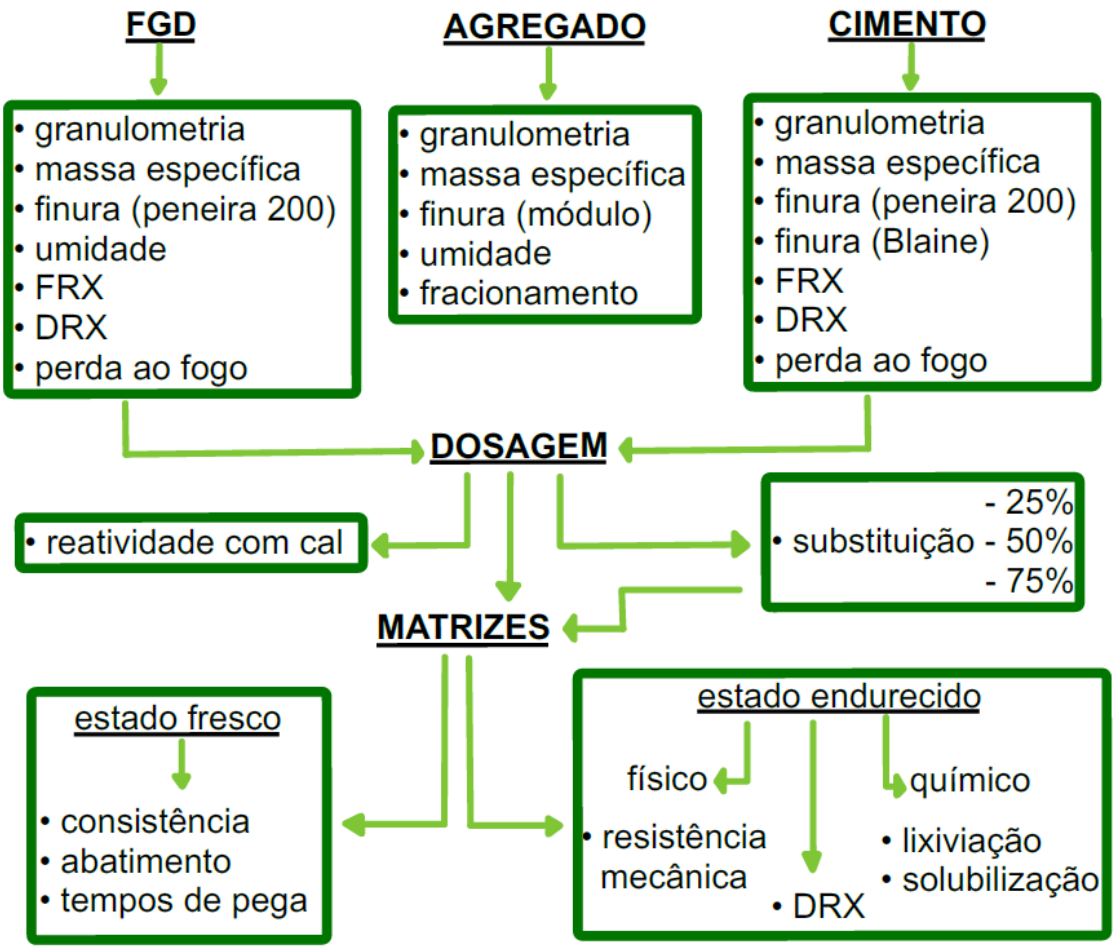
Para os testes de pozolanicidade, foi utilizada a cal hidratada do laboratório de caracterização do Serviço de Gestão de Rejeitos Radioativos (SEGRR).

A hidratação dos compostos foi realizada com água deionizada do laboratório de caracterização do SEGRR.

4.2. Métodos

A caracterização dos materiais foi realizada conforme o fluxograma esquemático das etapas que pode ser visto na Figura 33.

Figura 33: Fluxograma da metodologia



Fonte: O autor.

4.3. Cimento Portland

4.3.1. Caracterizações químicas

As caracterizações químicas do cimento em pó foram realizadas conforme elencado a seguir:

4.3.1.1. Informações em relatório técnico

As composições e demais informações para o tipo de cimento escolhido foram obtidas nos relatórios técnicos da cimenteira.

4.3.1.2. Determinação de perda ao fogo

Os ensaios de determinação de perda ao fogo (PF) foram realizados com apoio do laboratório do IPT de acordo com a norma (NBR NM 18, ABNT, 2012), além dos dados obtidos pela cimenteira para fins de parametrização.

4.3.1.3. Análise química quantitativa por fluorescência de raios X

A análise química fluorescência de raios X (FRX) (NBR 14656, ABNT, 2001) foi realizada no laboratório do IPT, utilizando-se espectrômetro de fluorescência de raios X da marca Panalytical modelo Minipal Cement, a partir de pastilhas fundidas em máquina de fusão da marca Claisse modelo M4, com fundentes à base de mistura de tetraborato de lítio/metaborato de lítio da marca MAXXIFLUX (66,67 % de $Li_2B_4O_7$, 32,8 3% de $LiBO_2$ e 0,7% de LiBr), com proporção de 1,0 g de amostra e 6,75 g de fundente.

Para análise quantitativa, o espectrômetro foi calibrado utilizando-se padrões internos, padrões IPT (28, 32, 38, 42, 46, 57, 63), padrões NIST (633, 634, 635, 636, 637, 638, 639) e verificado com o padrão NIST 636.

4.3.1.4. Determinação de óxido de cálcio livre (CaO livre)

A determinação de óxido de cálcio livre foi obtida com apoio do laboratório do IPT de acordo com a norma (NBR NM 13, ABNT, 2013).

4.3.1.5. Determinação de resíduo insolúvel

A determinação de resíduo insolúvel (RI) foi obtida com apoio do laboratório do IPT de acordo com a norma (NBR NM 15, ABNT, 2012).

4.3.1.6. Determinação de anidrido sulfuroso

As determinações de anidrido sulfuroso (SO_2), anidrido sulfúrico (SO_3) total foram obtidas com apoio do laboratório do IPT de acordo com a norma (NBR 6473, ABNT, 2003).

4.3.1.7. Determinação de anidrido carbônico

A determinação de anidrido carbônico (CO_2) foi obtida com apoio do laboratório do IPT de acordo com a norma (NBR 6473, ABNT, 2003).

4.3.2. Caracterizações físicas

As caracterizações físicas do cimento em pó foram realizadas conforme elencado a seguir:

4.3.2.1. Determinação do índice de finura por peneiramento

A determinação do índice de finura foi realizada pelo método de peneiramento de acordo com a norma (NBR 11579, ABNT, 2013).

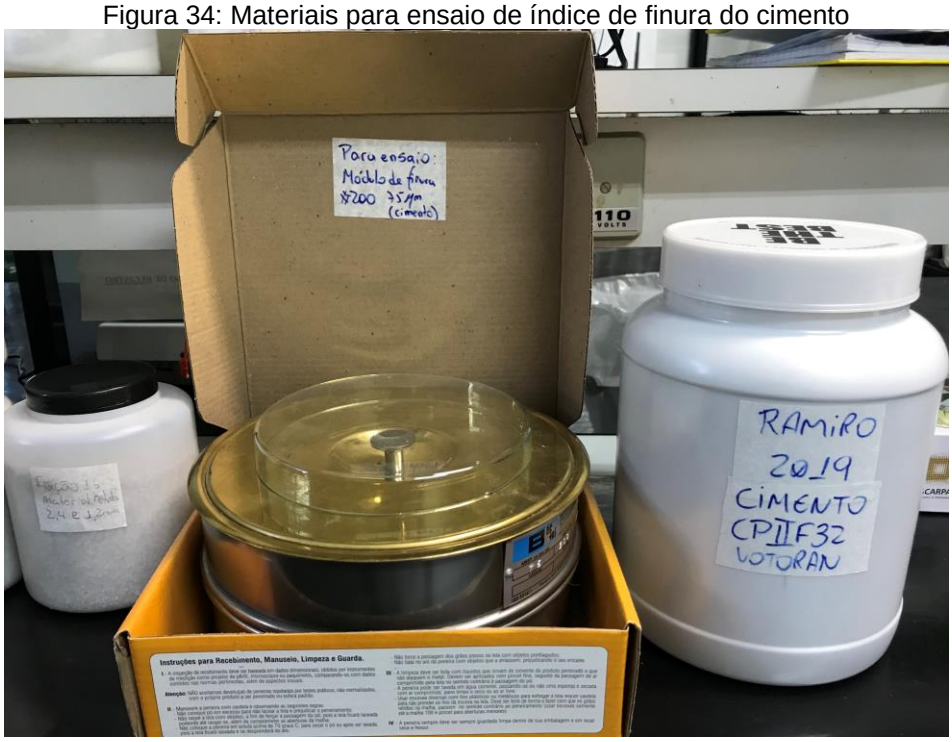
O peneiramento foi realizado com peneira de abertura de malha 75 µm conforme a Figura 34. O índice de finura é a relação entre a massa de cimento, cujas dimensões de grãos são superiores a 75 µm (fração retida), e a massa total da amostra, em porcentagem.

Em primeira etapa, a peneira foi seca, limpa e encaixada no fundo; colocado 50 ± 0,05 g de cimento sobre a tela da peneira e peneirado até que os grãos mais finos passassem quase que totalmente pelas malhas da tela.

Em segunda etapa, foram desprendidas as partículas aderidas à superfície inferior da tela da peneira e continuado o peneiramento horizontalmente, durante 15 min a 20 min; no final do período, o material passante foi desprezado.

Em terceira etapa, peneirado o material retido durante 60 s, este peneiramento foi repetido até que a massa da amostra de cimento que passa fosse inferior a 0,05 g (0,1 % da massa inicial).

Figura 34: Materiais para ensaio de índice de finura do cimento



Fonte: O autor.

O cimento retido na peneira foi transferido para o recipiente de pesagem, a fim de determinar sua massa. A pesagem desse resíduo foi feita com precisão de 0,01 g.

O índice de finura do cimento é obtido multiplicando-se a massa do material retido do último peneiramento (quando o material passante for inferior a 0,05g), pelo fator de correção da peneira, e dividido pela massa inicial da amostra, expresso em porcentagem, conforme a Equação 9.

Equação 9 – cálculo do índice de finura do cimento

$$I_F = \frac{r * F_C}{m} * 100$$

Na qual:

I_F é o índice de finura do cimento, expresso em porcentagem (%);

r é o resíduo do cimento na peneira 75µm, expresso em gramas (g);

m é a massa inicial do cimento, expressa em gramas (g);

F_C é o fator de correção da peneira utilizada no ensaio, determinado de acordo com o disposto na ABNT NBR NM ISO 3310-1.

4.3.2.2. Determinação da massa específica

A determinação da massa específica foi realizada de acordo com a norma (NBR 16605, ABNT, 2017).

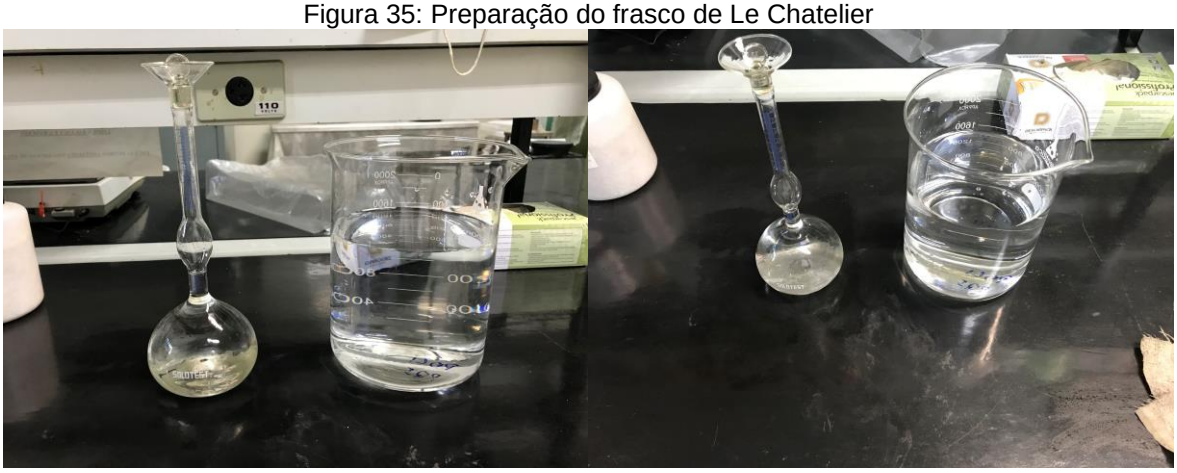
A massa específica foi obtida através do método do frasco volumétrico de Le Chatelier apresentado nas Figuras 35 a 37.

Em primeira etapa, o frasco foi preenchido com auxílio de um funil de haste longa, com líquido não reagente (querosene) até o nível entre as marcas a zero e 1 cm^3, após ser inserido o frasco em banho de água, foi mantido submerso durante 30 min, para equalização das temperaturas dos líquidos do frasco e do banho (termorregulador), e registrada a primeira leitura com aproximação de 0,1 cm^3.

Em segunda etapa, foi introduzida no frasco a amostra de 60 g de cimento em pequenas porções, com auxílio de um funil de haste curta; tampado o frasco agitado suavemente para eliminação de ar incorporado na amostra em pó;

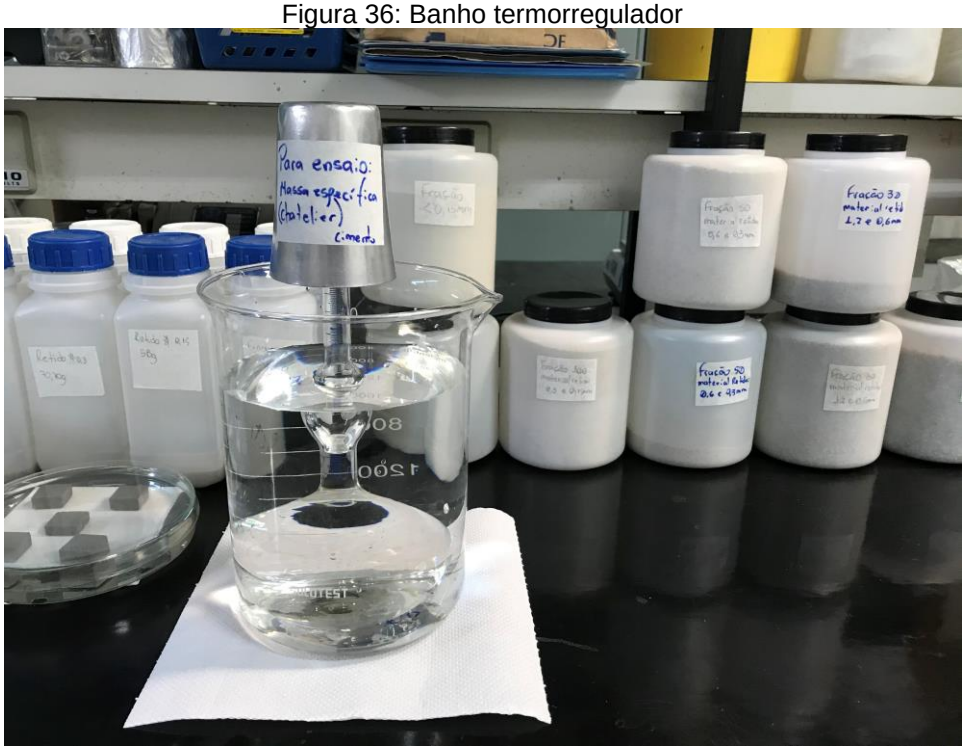
colocado novamente o frasco no banho de água, submerso durante 30 min (termorregulador), e registrada a leitura final com aproximação de 0,1 cm^3.

Figura 35: Preparação do frasco de Le Chatelier



Fonte: O autor.

Figura 36: Banho termorregulador



Fonte: O autor.

Figura 37: Medição do líquido deslocado

Fonte: O autor.

A massa específica do cimento é obtida dividindo-se amassa de cimento introduzida no frasco de Le Chatelier pela diferença de volume de líquido deslocado provocada pela adição do cimento como pode ser observado na Equação 10.

Equação 10 – cálculo da massa específica do cimento

$$\rho = \frac{m}{(V_2 - V_1)}$$

Na qual:

ρ é a massa específica do material ensaiado, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

m é a massa do material ensaiado, expressa em gramas (g);

V é o volume deslocado pela massa do material ensaiado ($V_2' - V_1'$), expresso em centímetros cúbicos (cm^3);

$V_2' - V_1'$ são os valores corrigidos de V_2 e V_1 respectivamente, a partir da calibração da escala do frasco volumétrico, em centímetros cúbicos cm^3.

4.3.3. Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica foi realizada por difratometria de raios X foi realizada de acordo com as normas (ASTM C1365, 2018 e NBR 14656, ABNT, 2001).

As análises foram obtidas por difratometria de raios X, no Centro de Química e Meio Ambiente (CEQMA), com o difratômetro de marca/modelo Rigaku MiniFlex-II, apresentado na Figura 38, em configuração angular de 5° a 80°, passo de 0,05°/s, contagem de 1°, com tubo de cobre (λ = 1,542 Å) a 30 kV / 15 mA, *divergence slit* (divslit) 1,25 deg; *receiving slit* (recslit) 0,3 mm; *anti-scatter slit* (sctslit) 1,25 mm.

Figura 38: Difratômetro de raios X

Fonte: O autor.

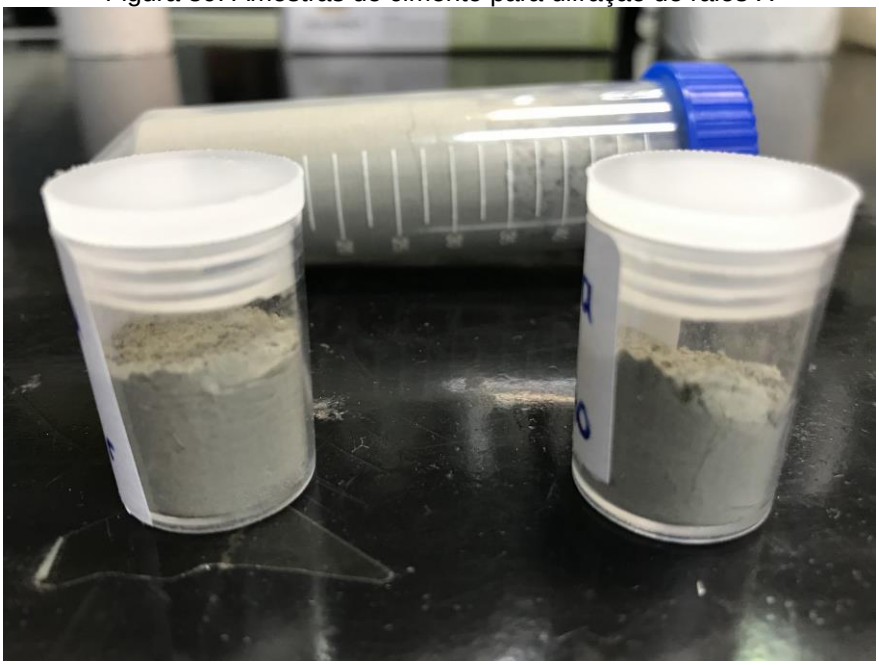
A interpretação dos dados para análises qualitativas foi realizada pelos softwares Search-Match - PF[7] e QualX[8], ambos disponíveis em código aberto (*open source)*.

A análise por difração de raios X do cimento anidro (em pó), conforme apresentado na Figura 39, foi realizada de modo a observar suas principais fases

7 Crystallographica Search-Match Version 2.1.1.1 Oxford Cryosystem, disponível em www.crystallographica.co.uk.
8 QualX version 2.24. Build data: 22.11.18. Institute of Crystallography (IC) - CNR - Bari, Italy, disponível em: http://www.ic.cnr.it/.

cristalográficas qualitativa e quantitativamente, para então verificar as suas transformações ao ser submetido à hidratação.

Figura 39: Amostras de cimento para difração de raios X



Fonte: O autor.

O refinamento dos dados para análise qualitativa foi realizado utilizando os softwares Profex BMNG[9]; e o programa QualX[10], que fornece uma estimativa qualitativa e semiquantitativa de acordo com o somatório de dados de material multifásico, ambos não trazem as porcentagens para o banco de dados do *International Centre for Difracrion Data (ICDD),* apenas para o *Cristalography Open Database (COD*), como banco de dados em mineralogia inorgânica[11].

Também foram utilizados como programas de apoio: Match[3] (Qt - Match! – *Phase Identification from Powder Diffraction*[12]; o enCIFer[13]; Maud[14]; e VESTA[15].

9 versão 4.3.1, programa *open source* disponível em: https://www.profex-xrd.org.
10 versão 2, disponível em: http://www.ba.ic.cnr.it/softwareic/qualx/.
11 *Structures: cod-cifs-mysql/cif.*
12 disponível em: https://www.crystalimpact.com/match/.
13 enCIFer, versão 1.7.2, disponível em: ccdc.cam.ac.uk/encifer.
14 *Maud for materials analysis* versão 2.92, disponível em: nanoair.dii.unit.it.
15 *VESTA – Visualization for Eletronic and STructural Analysis*, versão 3.4.7, disponível em: jp-minerals.org.

Primeiramente foi realizada a busca para as fases segundo o banco de dados COD, no programa QualX. Depois de baixadas as informações cristalográficas, as fichas foram convertidas e ajustadas no programa EnCIFer, e após feita a inserção dos dados no programa Profex BMNG para a realização das iterações matemáticas no método Rietfield.

4.4. FGD

4.4.1. Caracterizações químicas

As caracterizações químicas do FGD em pó foram realizadas conforme elencado a seguir:

4.4.1.1. Determinação de perda ao fogo

Os ensaios de determinação de perda ao fogo foram realizados com apoio do laboratório do IPT de acordo com a norma (NBR NM 18, ABNT, 2012).

4.4.1.2. Análise química quantitativa por fluorescência de raios X

A análise química fluorescência de raios X (FRX) (NBR 14656, ABNT , 2001) foi realizada no laboratório do IPT, utilizando-se um espectrômetro de fluorescência de raios X da marca Panalytical modelo Minipal Cement[16], a partir de pastilhas fundidas em máquina de fusão da marca Claisse modelo M4, empregando-se fundentes à base de mistura de tetraborato de lítio/metaborato de lítio da marca MAXXIFLUX (66,67 % de $Li_2B_4O_7$, 32,83 % de $LiBO_2$ e 0,7 % de LiBr), com proporção de 1,0 g de amostra e 6,75 g de fundente.

Os resultados semiquantitativos foram estimados por padrões internos utilizando a curva denominada "OMNIAN" e foram normalizados a 100 %.

4.4.1.3. Determinação de óxido de cálcio livre (CaO livre)

A determinação de óxido de cálcio livre foi obtida com apoio do laboratório do IPT de acordo com a norma (NBR NM 13, ABNT, 2013).

---

16 O equipamento utilizado não permite detectar os elementos químicos sódio, flúor, lítio, berílio, boro, carbono, prata, rutênio e ródio.

4.4.1.4. Determinação de resíduo insolúvel

A determinação de resíduo insolúvel foi obtida com apoio do laboratório do IPT de acordo com a norma (NBR NM 15, ABNT, 2012).

4.4.1.5. Determinação de anidrido sulfuroso

As determinações de anidrido sulfuroso (SO_2), anidrido sulfúrico (SO_3) total foram obtidas com apoio do laboratório do IPT de acordo com a norma (NBR 6473, ABNT, 2003).

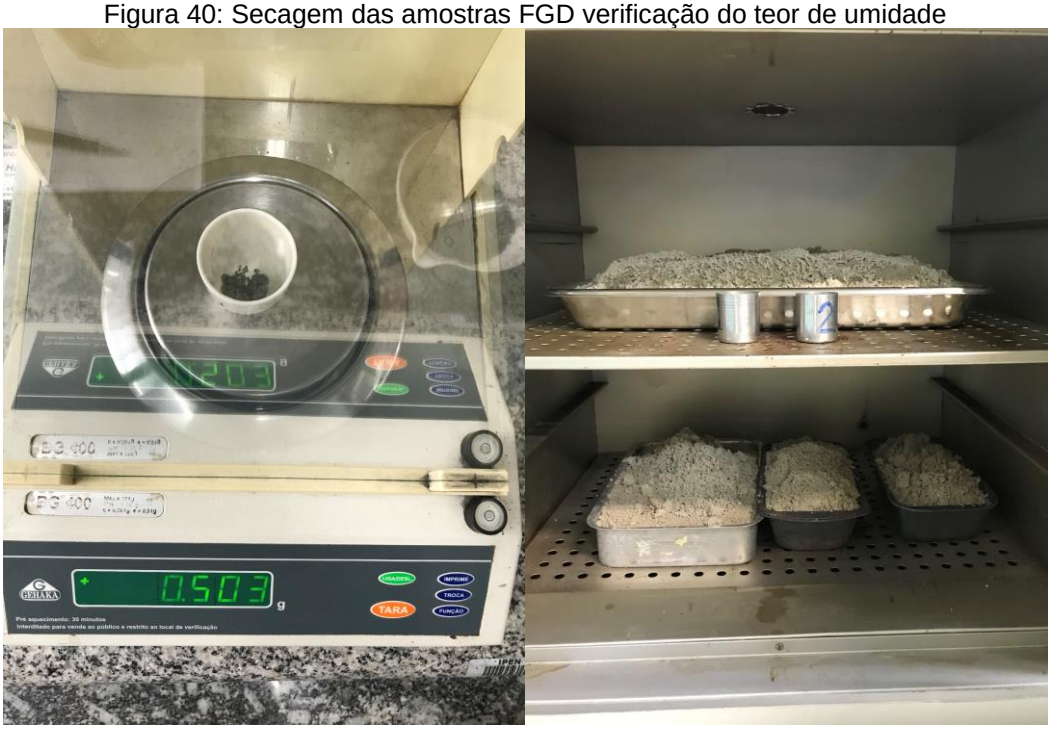
4.4.1.6. Determinação de anidrido carbônico

A determinação de anidrido carbônico (CO_2) foi obtida com apoio do laboratório do IPT de acordo com a norma (NBR 6473, ABNT, 2003).

4.4.1.7. Determinação do teor de umidade

O teor de umidade do FGD foi determinado de acordo com a norma (ABNT, NBR NM 24, 2003) tomando-se uma massa conhecida úmida da amostra, e submetido à secagem em estufa à 110 °C até a constância de massa, conforme apresentado na Figura 40, as amostras foram de 0,5 g, 10 g, e 1,2 kg.

Figura 40: Secagem das amostras FGD verificação do teor de umidade



Fonte: O autor.

O teor de umidade do FGD é obtido dividindo-se a diferença entre a massa do material úmido e do material depois de seco, pela massa do material úmido, multiplicado por 100, conforme apresentado na Equação 11.

Equação 11 – cálculo do teor de umidade do FGD.

$$U = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1)} * 100$$

Na qual:

U é a umidade da amostra, em percentagem;

m_1 é a massa da amostra, antes da secagem, em gramas;

m_2 é a massa da amostra, após a secagem, em gramas.

4.4.2. Caracterizações físicas

Nas caracterizações físicas do FGD em pó foram utilizados os mesmos procedimentos empregados nas amostras de cimento com:

4.4.2.1. Determinação do índice de finura por peneiramento

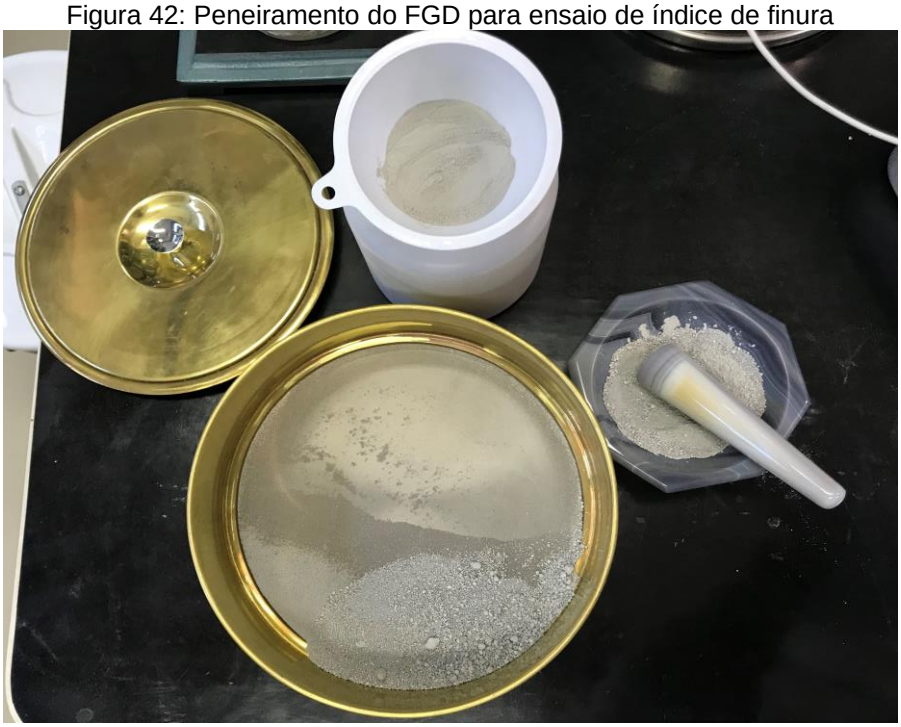
A determinação do índice de finura foi realizada pelo método de peneiramento de acordo com a norma (NBR 11579, ABNT, 2013).

O FGD foi segregado em almofariz após a secagem em estufa. O peneiramento foi realizado com peneira de abertura de malha 75 µm conforme as Figuras 41 e 42. No ensaio para o índice de finura foram utilizados os mesmos procedimentos empregados nas amostras de cimento Portland.

Figura 41: Segregação das amostras FGD

Fonte: O autor.

Figura 42: Peneiramento do FGD para ensaio de índice de finura



Fonte: O autor.

4.4.2.2. Determinação da massa específica

A determinação da massa específica foi realizada de acordo com a norma (NBR 16605, ABNT, 2017).

A massa específica do FGD foi obtida através do método do frasco volumétrico de Le Chatelier, assumindo os mesmos procedimentos realizados com o cimento Portland.

4.4.3. Caracterizações físico-químicas

4.4.3.1. Determinação da atividade pozolânica

O ensaio físico-químico para a determinação da atividade pozolânica do FGD foi realizado de acordo com a norma (NBR 5751, ABNT, 2015).

A atividade pozolânica do FGD foi determinada moldando-se três corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, contendo a amostra de FGD seca na granulometria inferior à 45 μ (preferencialmente entre 10 % e 15 %). Foram utilizadas as seguintes quantidades, em massa dos materiais:

→ 104 g hidróxido de cálcio P.A. $Ca(OH)_2$;

→ 4 frações de 234 g de areia normal;

→ a quantidade de adição do material pozolânico foi calculado conforme apresentado na Equação 12.

Equação 12 – cálculo da quantidade de material pozolânico

$$m_{poz} = \frac{2 * \sigma_{poz}}{\sigma_{cal}} * 104\ g$$

Na qual:

δ_{poz} é o valor da massa específica do material pozolânico em ensaio, determinado pelo método estabelecido na ABNT NBR NM 23;

δ_{cal} é o valor da massa específica do hidróxido de cálcio P.A. utilizado no ensaio, determinado pelo método estabelecido na ABNT NBR NM 23, ou fornecido pelo fabricante.

Como parâmetro, a quantidade de água deve corresponder à consistência de (225 ± 5) mm, obtido no ensaio de abatimento, conforme a ABNT NBR 7215.

4.4.3.2. Determinação do índice de desempenho

Outra característica físico-química observada foi o índice de desempenho do FGD com cimento Portland, de acordo com a norma (NBR 5752, ABNT, 2014).

A determinação do índice de desempenho do FGD com cimento Portland foi realizada preparando-se argamassas com duas dosagens diferentes: argamassa 1 com cimento CP II-F-32, areia normal e água (padrão); e argamassa 2 com 25 % em massa de FGD, em substituição à igual porcentagem de cimento CP II-F-32, areia normal e água.

Os corpos de prova foram colocados em câmaras de cura submersas em água deionizada saturada com hidróxido de cálcio, e rompidos por compressão axial na prensa aos 28 dias.

O índice de desempenho foi calculado conforme a Equação 13:

Equação 13 – cálculo do desempenho do FGD com cimento Portland

$$I_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} * 100$$

Na qual:

I é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, expresso em porcentagem (%), arredondado ao inteiro;

f_{cB} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova com cimento CP II-F-32 e 25 % de FGD (argamassa 2), aproximada ao décimo e expressa em megapascals (MPa);

f_{cB} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova apenas com cimento CP II-F-32 (argamassa 1), aproximada ao décimo e expressa em megapascals (MPa).

4.4.4. Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica foi realizada por difratometria de raios X foi realizada de acordo com as normas (ASTM C1365, 2018 e NBR 14656, ABNT, 2001).

As análises foram obtidas por difratometria de raios X, com o difratômetro de marca/modelo Rigaku MiniFlex-II, e procedimentos executados conforme os realizados com o cimento Portland.

4.5. Agregado Miúdo

4.5.1. Caracterização química

A determinação de teor de umidade da areia foi realizada tomando-se uma massa conhecida da amostra, e submetido à secagem em estufa à 110 °C até a constância de massa, as amostras foram de 30 g, e 1,1 kg.

4.5.2. Caracterizações físicas

A caracterização física da areia comercial foi realizada conforme elencado a seguir:

4.5.2.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica da areia comercial foi realizada de acordo com as normas (NBR 7214, ABNT, 2015; NBR NM248, 2003 e NBR ISO3310-1, 2010);

Para o ensaio de granulometria, após a amostra ser submetida à secagem em estufa, foi realizado o peneiramento mecânico em mesa vibratória do material em uma série de peneiras para a obtenção das frações conforme apresentado nas Figuras 43 e 44.

Figura 43: Peneiramento das amostras de areia comercial

Fonte: O autor.

Figura 44: Frações granulométricas da areia comercial

Fonte: O autor.

Assim, foram classificadas as frações da areia normalizada de acordo com a Tabela 19.

Tabela 19: Frações granulométricas da areia normalizada

Denominação	Material retido (mm)
16	2,4, e 1,2
30	1,2 e 0,6
50	0,6 e 0,3
100	0,3 e 0,15

Fonte: NBR: 7214, NM248, 7211, adaptado.

4.5.2.2. Determinação do módulo de finura (MF)

O módulo de finura da areia comercial foi obtido conforme a Equação 14, após os dados de ensaio de granulometria.

Equação 14 – Cálculo do módulo de finura da areia

$$M_F = \frac{\sum_{\%retida\ acumulada}}{100}$$

4.5.2.3. Determinação do diâmetro máximo da areia comercial

O diâmetro máximo da areia, foi determinado pela fração cuja abertura da peneira possui porcentagem acumulada igual ou imediatamente inferior à 5%.

4.5.2.4. Classificação da areia comercial

A classificação da areia foi obtida confrontando-se o módulo de finura com os dados apresentados na Tabela 20:

Tabela 20: Classificação da areia pelo módulo de finura

Classificação da areia	Diâmetro dos grãos	Módulo de finura
Muito fina	0,15 a 0,6 mm	<1,71
Fina	0,6 a 1,2 mm	1,72<MF<2,11
Média	1,2 a 2,4 mm	2,12<MF<2,71
Grossa	2,4 a 4,8 mm	>2,71

Fonte: NBR: 7214, NM248, 7211, adaptado.

4.5.2.5. Determinação da massa específica

A determinação da massa específica foi realizada pelo método do frasco Chapman de acordo com a norma (NBR NM 52, ABNT, 2009).

A massa específica da areia foi obtida em duplicata através do método do frasco de Chapman, conforme apresentado na Figuras 45.

Colocou-se água deionizada no frasco até marca de 200 cm^3, deixando-o em repouso, em seguida introduziu-se, 500 g da areia seca no frasco e agitado para eliminação das bolhas de ar; feita a leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco indica o volume, em cm^3, ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo; os resultados são calculados através da Equação 15.

Equação 15 – Cálculo da massa específica da areia

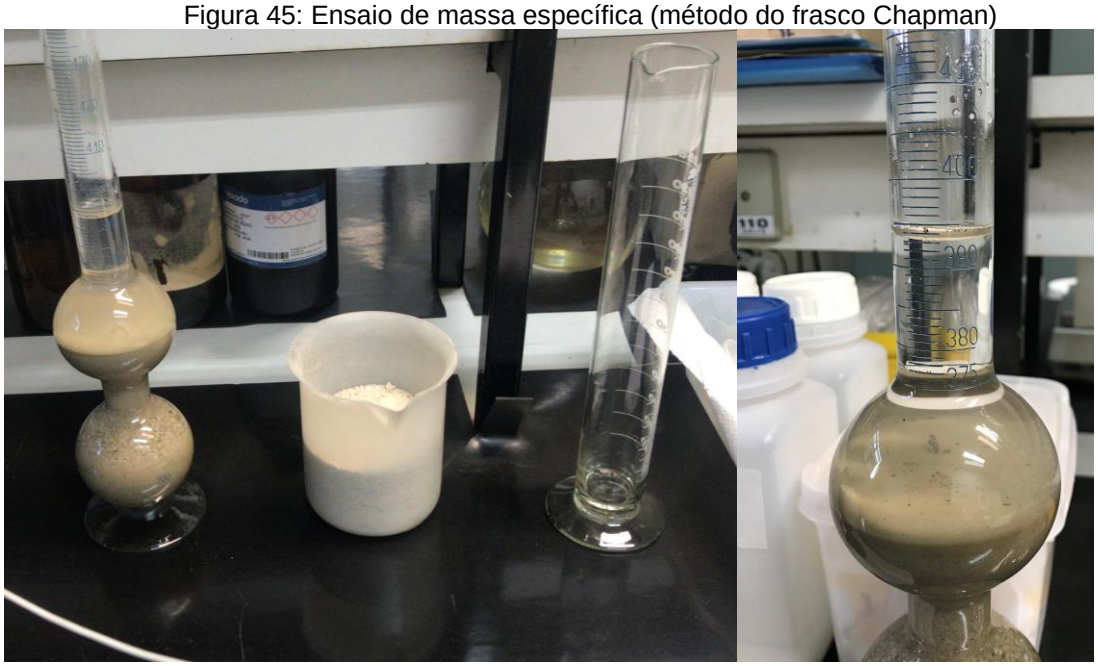
$$\gamma = \frac{500}{L - 200}$$

Na qual:

γ = massa específica do agregado miúdo, expressa em (g/cm^3)[17];

L = leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo).

Figura 45: Ensaio de massa específica (método do frasco Chapman)



Fonte: O autor.

17 Duas determinações consecutivas, feitas com amostras do mesmo agregado, não devem diferir entre si de mais de 0,05g/cm^3.

4.6. Matrizes cimentícias

A parte aglomerante das matrizes foi composta com cimento Portland e proporções do FGD de 0; 25; 50 e 75 % respectivamente.

As análises das matrizes foram realizadas conforme elencado a seguir:

4.6.1. Caracterizações no estado fresco

4.6.1.1. Determinação da pasta de consistência normal

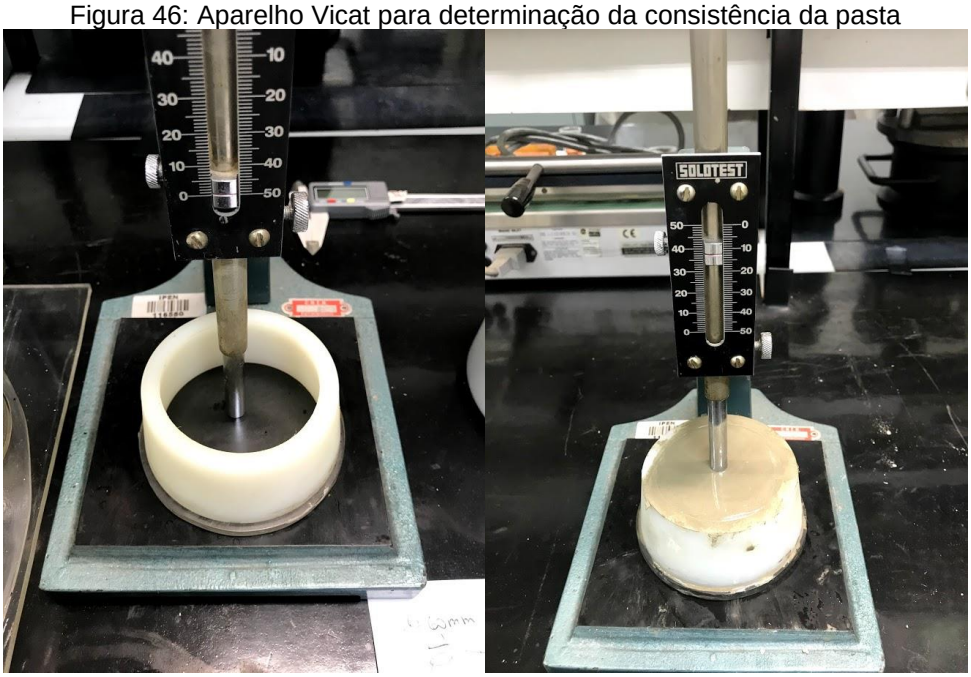
O ensaio para determinação da pasta de consistência normal foi realizado de acordo com a norma (NBR 16606, ABNT, 2018).

Em primeira etapa, a mistura para as pastas seguiu os procedimentos descritos norma (NBR 7215, ABNT, 2019), a massa de inicial de cimento utilizada na preparação da pasta padrão foi de 500,0 ± 0,5 g, sendo a massa de água inicial em fator água/cimento de 0,27 %, quantidade que foi acrescida conforme a necessidade, a fim de se atingir os requisitos do ensaio.

Com o misturador mecânico, a água foi vertida na cuba, em seguida adicionado o cimento e deixado por 30 s em repouso; misturado durante 30 s em velocidade baixa; desligado o misturador por 60 s, neste momento realizado a raspagem das paredes internas da cuba com a espátula de borracha, para que toda pasta aderida fique no fundo da cuba; na sequência, misturado por mais 60 s na velocidade alta.

Em segunda etapa, deu-se início às moldagens das pastas no molde de formato tronco cônico com sua base maior apoiada sobre uma placa-base lisa e limpa, utilizando uma espátula; retirado o excesso de pasta rasando o molde com auxílio de uma régua metálica; colocado o conjunto sob o aparelho de Vicat, centrado o molde sob a haste, que foi ajustada até que a ponta da sonda entrasse em contato com a superfície da pasta, conforme apresentado na Figura 46; fixada a posição por meio do parafuso, e solta a haste permitindo que penetre na pasta.

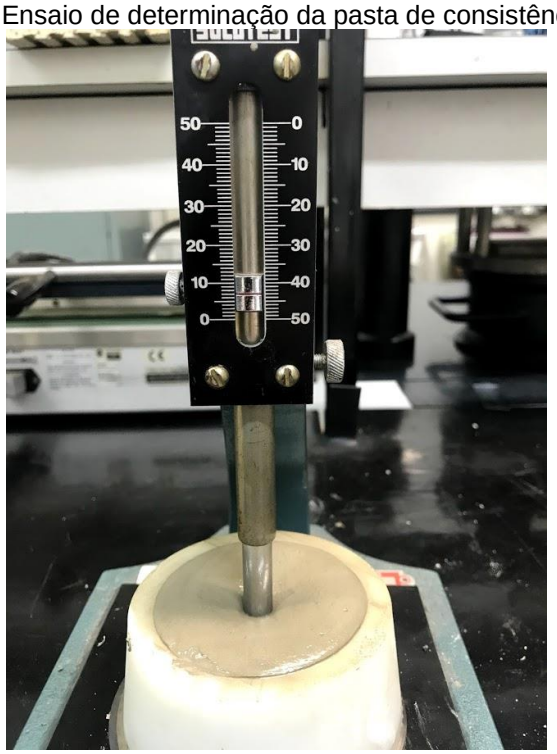
Figura 46: Aparelho Vicat para determinação da consistência da pasta



Fonte: O autor.

A pasta é considerada como tendo consistência normal quando a sonda se situar a uma distância de 6 ± 1 mm da placa-base após 30 s do instante em que foi solta, conforme ilustrado na Figura 47.

Figura 47: Ensaio de determinação da pasta de consistência normal



Fonte: O autor.

Diversa pastas de ensaio foram preparadas, variando a quantidade de água e utilizando uma nova porção de cimento para cada tentativa, até que se atingisse esta condição, desprezando-se a pasta não correspondente aos requisitos do ensaio.

A quantidade de água necessária à obtenção da consistência normal da pasta de cimento foi calculada conforme a Equação 16.

Equação 16 – Cálculo do fator água/cimento para consistência normal da pasta

$$A = \frac{m_a}{m_c} * 100$$

Na qual:

A é a quantidade de água, expressa em porcentagem (%);

m_a é a massa de água utilizada para a obtenção da consistência normal da pasta de cimento, expressa em gramas (g);

m_c é a massa de cimento utilizada no ensaio, expressa em gramas (g).

4.6.1.2. Determinação dos tempos de pega

O ensaio para determinação dos tempos de pega foi realizado de acordo com a norma (NBR 16607, ABNT, 2018), para isso, foram preparadas as pastas padrão (sem a substituição de FGD), além das pastas com substituição de 25, 50 e 75 % de FGD.

A medição foi feita também através do aparelho de Vicat com a sonda agulha de 30 mm, conforme ilustrado na Figura 48. As quantidades de materiais, procedimentos de mistura e a relação água/cimento foram as mesmas do ensaio de consistência normal.

Em primeira etapa, agulha foi calibrada descendo a haste móvel até tocar a placa-base, fora do molde; ajustado o indicador na marca zero da escala e registrado a leitura inicial; após o enchimento do molde, colocado o conjunto no aparelho de Vicat sob a agulha; descido suavemente a agulha até que o contato com a pasta; soltada a haste da agulha, permitindo que a ela penetrasse verticalmente na pasta; feita a leitura da escala após o instante em que a agulha foi solta.

Em segunda etapa, o ensaio de penetração foi repetido no mesmo corpo de prova, em posições de perfuração separadas, no mínimo 10 mm da borda do molde e entre elas, a intervalos de tempo espaçados.

O início de pega ocorre quando o intervalo de tempo transcorrido desde o momento em que o cimento entra em contato com a água até o momento em que a agulha de Vicat penetra na pasta e estaciona a 6 ± 2 mm da placa-base do molde tronco cônico imediatamente após a penetração.

O fim de pega ocorre quando o intervalo de tempo transcorrido desde o momento em que o cimento entra em contato com a água até o momento em que a agulha de Vicat penetra 0,5 mm na pasta.

Figura 48: Ensaio de determinação dos tempos de pega

Fonte: O autor.

4.6.1.3. Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova cilíndricos foi realizada de acordo com a norma (NBR 7215, ABNT, 2019), em moldes de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, conforme ilustrado na Figura 49.

Figura 49: Moldes para ensaio de ruptura

Fonte: O autor.

Em primeira etapa, a mistura para as pastas seguiu os procedimentos descritos em norma (NBR 7215, ABNT, 2019), a massa de cimento utilizada na preparação da argamassa padrão foi de 624,0 ± 0,4 g, sendo composta de uma parte de cimento e três de areia normalizada (quatro frações de 468,0 ± 0,3 g de areia) em massa, e com relação água/cimento de 0,48, conforme mostra a Tabela 21.

Tabela 21: Quantidades para moldagem dos corpos de prova padrão

Material	Massa (g)
Cimento	624 ± 0,4
Água	300 ± 0,2
Frações de areia	
16	468 ± 0,3
30	468 ± 0,3
50	468 ± 0,3
100	468 ± 0,3

Fonte: NBR: 7214, NM248, 7211, adaptado.

A água foi vertida na cuba, em seguida adicionado o cimento, e acionado o cronômetro; misturado durante 30 s em velocidade baixa; em 30 s, acrescentado as quatro frações da areia normalizada, previamente misturadas, e aumentada a velocidade do misturador para alta pelo período de 30 s; desligado o misturador por 90 s, neste momento realizado a raspagem das paredes internas da cuba com a

espátula de borracha, para que toda pasta aderida fique no fundo da cuba; na sequência, misturado por mais 60 s na velocidade alta.

Em segunda etapa, deu-se início às moldagens das argamassas nos moldes de formato cilíndrico previamente untados com desmoldante; a colocação da argamassa na forma foi feita com o auxílio de uma espátula, em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, com cada uma recebendo 30 golpes uniformes e distribuídos com um soquete; rasado os corpos de prova com o auxílio de uma espátula metálica, nivelando a superfície do molde e colocados nas câmaras de cura úmida.

Repetiu-se os procedimentos para as misturas de argamassas contendo 25, 50 e 75 % de substituição em massa do cimento pelo FGD, aumentando-se a quantidade de água conforme a consistência normal das argamassas pelo ensaio de abatimento de tronco cônico.

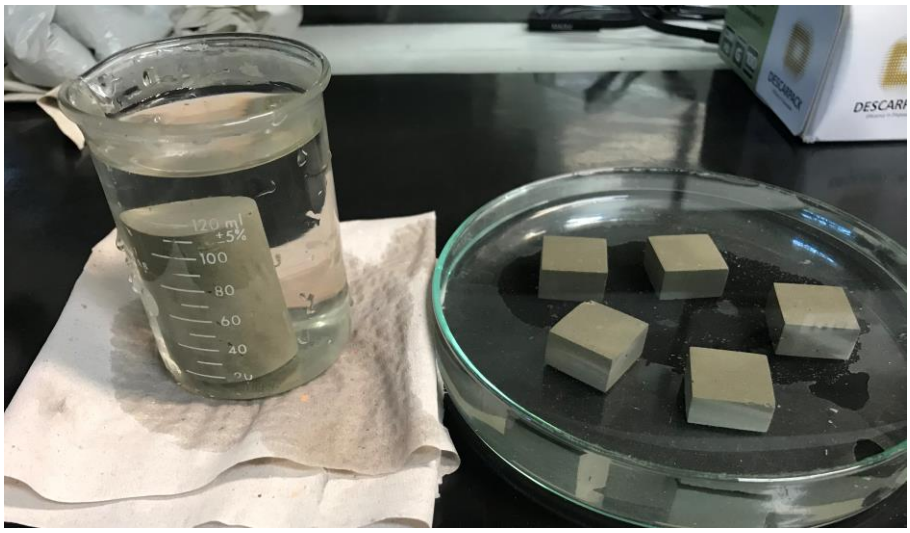
Para cada idade de ruptura, foram moldados quatro cilindros, totalizando cem amostras, incluindo as amostras com substituição por FGD.

Nesta etapa, também foram moldados cubos de 2 cm^3 e cilindros de 2 cm de diâmetro por 4 cm de altura, com as argamassas de mesmas proporções, conforme ilustrado nas Figuras 50 e 51, de maneira a auxiliar as análises de difração de raios X.

Figura 50: Moldes para ensaios complementares

Fonte: O autor.

Figura 51: Cura dos prismas para ensaios complementares



Fonte: O autor.

Para cada proporção de amassamento, foi realizado o ensaio de abatimento de tronco cônico, a fim de se obter a argamassa de consistência normal para os moldes cilíndricos. Neste caso, o ensaio de abatimento foi realizado com a ajuda da mesa para determinação do índice de consistência.

O aparelho é constituído por uma mesa horizontal lisa e plana de metal, com uma haste fixada em seu centro, a qual, por uma guia, recebe de um movimento vertical ascendente e cai. A Figura 52 mostra o aparelho.

Figura 52: Mesa para ensaio de consistência das argamassas

Fonte: O autor.

A moldagem foi realizada imediatamente após a preparação da argamassa. A mesa e o cone foram lubrificados com desmoldante. Para a moldagem, a forma troncocônica foi centrada com sua base maior apoiada na mesa. Com o auxílio de uma espátula, colocada a argamassa na fôrma, em três camadas da mesma altura, e com soquete, aplicados 15, 10 e 5 golpes uniformes e distribuídos respectivamente nas camadas.

Em seguida, a manivela do aparelho é movida, fazendo com que a mesa caia 30 vezes em aproximadamente 30 s, para provocar o abatimento do tronco de cone de argamassa.

A medida do diâmetro da argamassa, após o abatimento, foi feita com auxílio de um paquímetro. Onde o índice de consistência da argamassa é a média aritmética das medidas de dois diâmetros ortogonais. O índice de consistência é considerado normal na medida de 165 ± 5 mm.

4.6.1.4. Preparação das câmaras de controle e cura

A preparação e adaptação das câmaras de controle e cura das diferentes matrizes foi realizada de acordo com a norma (NBR 9479, ABNT, 2009).

Após 24 h, terminado o período inicial de cura, os corpos de prova destinados à determinação da resistência em idades maiores que 24 h foram retirados das fôrmas, identificados e imersos, separados entre si, no tanque de cura com água deionizada saturada com hidróxido de cálcio, conforme ilustrado na Figura 53, ali permanecendo até o momento da ruptura.

Figura 53: Corpos de prova para ensaio de ruptura

Fonte: O autor.

4.6.2. Caracterizações no estado endurecido

4.6.2.1. Ensaios de resistência mecânica

Os ensaios de resistência mecânica à compressão axial foram realizados de acordo com as normas (NBR 5739, ABNT, 2018 e NBR 7215, 2019).

As idades de ruptura das matrizes por ensaio de compressão são apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22: Idades de ruptura das matrizes

Ruptura	Tolerância
24h	± 30min
3d	± 1h
7d	± 2h
28d	468min ± 0,3 min
91d	468min ± 0,3 min

Fonte: NBR: 7214, NM248, 7211, adaptado.

A determinação da resistência à compressão foi realizada em uma prensa mecânica da marca Instron, modelo 4400R, centrado em relação ao eixo de carregamento, conforme ilustrado na Figura 54; os cilindros foram submetidos a uma velocidade de carregamento de 0,25 ± 0,05 MPa/s.

Figura 54: Ensaio de ruptura dos corpos de prova

Fonte: O autor.

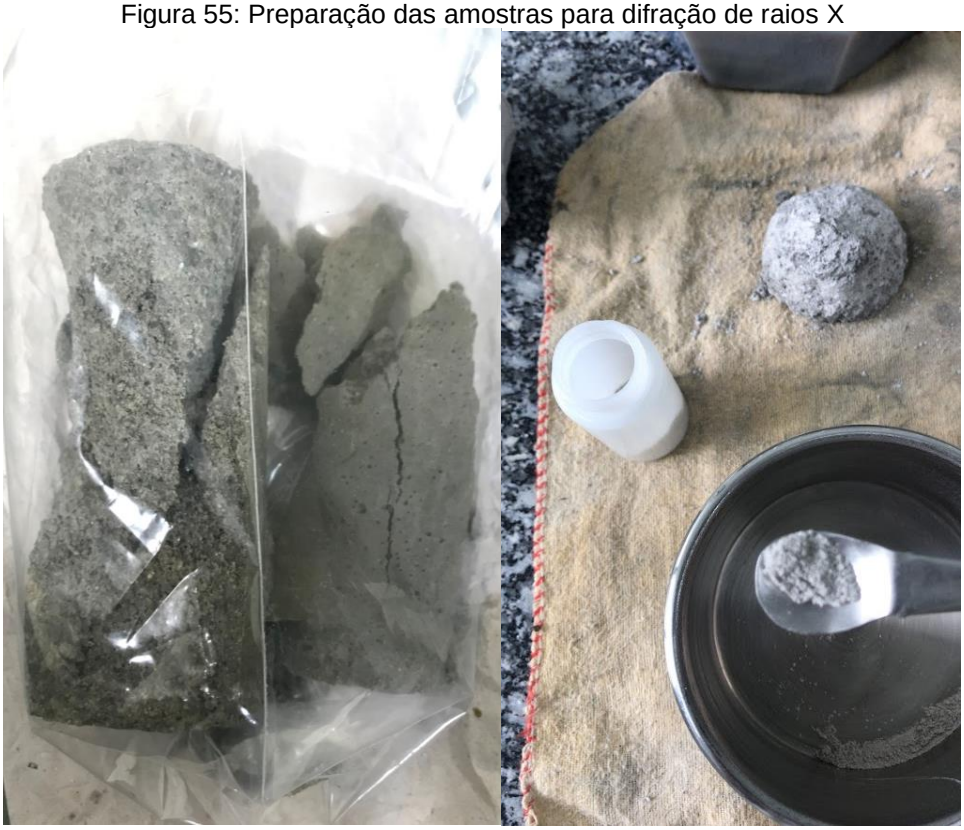
O cálculo da resistência à compressão, para cada corpo de prova, foi realizado dividindo-se a força de ruptura pela área nominal da seção do corpo de prova, expresso em megapascals (MPa).

4.6.2.2. Caracterização mineralógica

O acompanhamento das fases de composição mineralógica por difração de raios X qualitativa e quantitativa foi realizado de acordo com as normas (ASTM C1365, 2018 e NBR 14656, ABNT, 2001);

Após o rompimento, parte dos fragmentos de cada amostra na idade de teste foram recolhidos, moídos em almofariz, secos ao ar e peneirados em peneira de 75μm para serem analisados por difração de raios X, conforme ilustrado nas Figuras 55 e 56.

Figura 55: Preparação das amostras para difração de raios X



Fonte: O autor.

Figura 56: Preparação das amostras para difração de raios X

Fonte: O autor.

A preparação para inserção no equipamento de difração de raios X seguiu-se apenas pelo uso de álcool propílico, servindo de fixador e contribuindo para a finalização da secagem ao ar do pó a ser analisado.

4.6.2.3. Ensaio de lixiviação e solubilização

Os ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados pelo Laboratório de Análises Química e Ambiental (LAQA) do CEQMA/IPEN, de acordo com as normas (NBR 10005, ABNT, 2004 e NBR 10006, ABNT, 2004).

A classificação ambiental do resíduo foi realizada segundo a norma (ABNT, NBR 10004, 2004), assim como a análise dos requisitos estabelecidos para comparação dos parâmetros do cimento com a mistura do resíduo (NBR 16697, ABNT, 2018).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Cimento Portland

5.1.1. Caracterizações químicas

Algumas composições químicas do cimento Portland foram obtidas no boletim de ensaios da cimenteira, utilizado para verificação dos parâmetros de qualidade, a Tabela 23 mostra os teores de perda ao fogo (PF), óxido de magnésio livre (MgO), anidrido sulfúrico (SO_3), resíduo insolúvel (RI).

As médias mostram os ensaios que foram realizados a cada dois dias no mês de janeiro de 2021.

Tabela 23: Características do cimento segundo boletim técnico

	Químicos			% massa
Limites de Norma	PF	MgO	SO_3	RI
	≤ 12,5	N/A	≤ 4,5	≤ 11,5
05/01/2021	11,20	5,11	3,37	3,35
07/01/2021	10,23	4,83	2,70	2,15
09/01/2021	10,73	4,95	3,40	2,34
12/01/2021	10,67	5,14	2,73	1,80
14/01/2021	10,82	5,05	3,01	2,05
16/01/2021	11,11	5,18	3,25	1,97
19/01/2021	11,17	5,13	3,27	1,89
21/01/2021	11,15	4,88	3,88	2,16
26/01/2021	10,74	5,19	3,00	2,43
28/01/2021	11,02	5,15	3,18	2,01
30/01/2021	11,38	5,11	3,33	2,22
Média	10,93	5,07	3,19	2,22
Desvio Padrão	0,33	0,12	0,33	0,42
Mínimo	10,23	4,83	2,70	1,80
Máximo	11,38	5,19	3,88	3,35

Fonte: Boletim VOTORAN, 2021 – adaptado

PF – Perda ao Fogo
RI – Resíduo Insolúvel

Outras composições químicas foram obtidas em ensaios realizados no laboratório do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

A Tabela 24 mostra os teores de perda ao fogo, anidrido silícico (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio livre (MgO), anidrido sulfúrico (SO_3), óxido de potássio (K_2O), óxido de fósforo (P_2O_5) óxido de cromo (Cr_2O_3), óxido de manganês (Mn_2O_3), óxido de zinco (ZnO), óxido de estrôncio (SrO), óxido de titânio (TiO_2), óxido de cálcio livre (CaO), resíduo insolúvel (RI), anidrido carbônico (CO_2), e perda ao fogo.

Tabela 24: Composição química do cimento % massa

Determinações[18]	Amostra CMT[(a)]
	Resultados
Perda ao fogo[(b)]	9,56
Anidrido silícico (SiO_2)	18,10
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	4,32
Óxido férrico (Fe_2O_3)	2,87
Óxido de cálcio (CaO)	55,30
Óxido de magnésio (MgO)	4,89
Anidrido sulfúrico (SO_3)	3,44
Óxido de potássio (K_2O)	0,88
Óxido de fósforo (P_2O_5)	0,14
Óxido de cromo (Cr_2O_3)	0,01
Óxido de manganês (Mn_2O_3)	0,14
Óxido de zinco (ZnO)	0,06
Óxido de estrôncio (SrO)	0,06
Óxido de titânio (TiO2)	0,19
Óxido de cálcio livre (CaO)[(c)]	1,39
Resíduo insolúvel[(b)]	5,07
Anidrido carbônico (CO_2)[(d)]	7,55

Fonte: Boletim IPT, 2021 – adaptado[19]

O teor de perda ao fogo indica o limite de hidratação e carbonatação dos óxidos livres, principalmente os óxidos de cálcio, magnésio e potássio, em

18 (a) análise realizada por FRX quantitativa; (b) determinação realizada por gravimetria; (c) determinação realizada por titulação; (d) determinação realizada por gasometria.

19 O Boletim VOTORAN também apresenta dados para massa específica: 3,13g/cm³; CaO: 61,47%; SiO_2: 14,61%; Al_2O_3: 3,75%; Fe_2O_3: 2,40% para a amostra do cimento escolhido.

decorrência da exposição do cimento ao ar. Quanto maior o teor de perda ao fogo, maior a quantidade de carbono presente no material, para o cimento, o teor limite deve ser igual ou menor do que 12,5 % em massa (ver Tabela 17) (NBR 16697, ABNT, 2018).

Comparando-se a quantidade dos óxidos na amostra de cimento com os dados apresentados na revisão da literatura (Tabela 2) pôde-se observar os teores significativos de anidrido silícico de 18,10 % (17-25 %); óxido de alumínio de 4,32% (3-8 %); óxido férrico de 2,87 % (0,5-6 %); óxido de potássio de 0,88 % (0-1 %); óxido de fósforo de 0,14 % (0-0,2 %); óxido de manganês de 0,14 % (0-0,2 %); óxido de titânio de 0,19 % (0-05 %).

Os teores divergentes dos óxidos encontrados foram de magnésio 4,89 % (0,1-4 %) e o somatório dos óxidos de cálcio 55,30 % e 1,90 % (60-67 %) que ficaram com porcentagens inferiores às encontradas na literatura (MEHMET, 2006; CHANDRA, 2009; NOGUEIRA, 2011; CAILLAHUA, 2017).

O no Boletim VOTORAN (2021) podem ser observados os dados dos óxidos: SiO_2 (14,61 %); Al_2O_3 (3,75 %); Fe_2O_3 (2,40 %) e CaO (61,47 %).

Como pode ser observado nas Tabelas 23 e 24, o teor de perda ao fogo apresentado pela cimenteira foi, em média, de 10,93 %, enquanto que o resultado do ensaio realizado no laboratório do IPT apresentou o valor de 9,56 %, indicando estar dentro dos parâmetros estabelecidos pela norma.

Conforme apresentado anteriormente, o anidrido sulfúrico está presente entre as fases do cimento como composto na forma de sulfato de cálcio, seu teor no cimento deve permanecer igual ou abaixo de 4,5 % em massa (NBR 16697, ABNT, 2018), caso contrário, reações secundárias podem ocorrer após a hidratação do cimento, formando subprodutos que podem contribuir para a diminuição de sua resistência (TEIXEIRA, 2019).

Como pode ser observado na Tabela 23 e 24, o teor de anidrido sulfúrico na cimenteira apresentou o valor médio de 3,19 %, enquanto que o resultado do ensaio realizado no laboratório do IPT apresentou o valor de 3,44 %, indicando estar dentro dos parâmetros estabelecidos pela norma.

A despeito do resíduo insolúvel presente na amostra de cimento, leva-se em consideração a insolubilidade parcial do clínquer, isto é, a parcela não reativa do material, esta deve possuir como parâmetro limite 7,5 % em massa (NBR 16697, ABNT, 2018).

Como pode ser observado na Tabela 23, a cimenteira adota como parâmetro o limite de 11,7 %, o que não condiz com o estipulado por norma, embora os resultados apresentem uma média de 2,22 % em massa, enquanto que no laboratório do IPT apresentou o valor de 5,07 %.

5.1.2. Caracterizações físicas

Algumas composições físicas do cimento Portland foram obtidas através do boletim de ensaios da cimenteira, para verificação dos parâmetros de qualidade.

A Tabela 25 mostra os módulos de finura, superfície específica, água para consistência normal da pasta, os tempos de início e fim de pega e as principais resistências mecânicas.

As médias mostram os ensaios que foram realizados a cada dois dias no mês de janeiro de 2021.

Tabela 25: Ensaios físicos e mecânicos no cimento

Físicos e mecânicos									
	Finura(%)		Blaine(cm^2/g)	Água(%)	Tempo Pega(min)		Resistência(MPa)		
	#200	#325			Início	Fim	3 Dias	7 Dias	28 Dias
Limites	≤ 12,0	N/A	N/A	N/A	≥ 60	≤ 600	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32
05/01/2021	1,78	8,76	4480	25,60	275	320	23,20	27,50	34,10
07/01/2021	1,72	8,55	4090	25,90	320	370	21,80	25,80	32,10
09/01/2021	1,44	8,14	4430	25,90	270	300	23,90	29,10	34,50
12/01/2021	2,28	9,48	4130	25,90	340	390	23,20	28,30	32,90
14/01/2021	2,00	8,55	4290	25,80	325	380	25,00	30,10	34,20
16/01/2021	1,39	7,11	4260	25,90	310	355	25,30	28,60	--
19/01/2021	1,44	7,31	4230	26,00	330	375	24,60	29,80	--
21/01/2021	1,28	7,73	4370	26,00	305	375	23,90	29,00	--
26/01/2021	2,00	8,76	4710	26,00	340	395	24,70	28,70	--
28/01/2021	1,78	8,45	4460	26,20	340	395	23,90	27,60	--
30/01/2021	1,89	8,65	4490	26,10	345	420	22,20	27,00	--
Média	1,73	8,32	4358	25,94	318,2	370,5	23,79	28,32	33,56
Desvio	0,31	0,69	181	0,16	26,0	34,5	1,12	1,26	1,02
Mínimo	1,28	7,11	4090	25,60	270,0	300,0	21,80	25,80	32,10
Máximo	2,28	9,48	4710	26,20	345,0	420,0	25,30	30,10	34,50

Fonte: Boletim VOTORAN, 2021 - adaptado.

Os módulos de finura nas peneiras ASTM#200 (75µm) e ASTM#325 (45µm), indicam a granulometria característica (NBR 11579, ABNT, 2012) para a obtenção da superfície específica padrão obtida pelo método Blaine (NBR 16372,

ABNT, 2015). Estes parâmetros, segundo Tsimas (2010) indicam o nível de hidratação dos grãos de cimento quando em contato com a água.

A porcentagem de água para obtenção da pasta de consistência normal (ABNT, NBR 16606, 2018), implica na quantidade ideal de água para total hidratação das pastas compostas com cimento e água, de cimento com água, de maneira que seja permissível sua trabalhabilidade, ou seja, capacidade de manuseio e moldagem.

O tempo de início de pega, é o tempo total desde o contato do cimento com a água, até o início da fase de endurecimento da pasta, enquanto que o tempo de e fim de pega é o tempo total desde o contato do cimento com a água, até o final da fase de endurecimento da pasta (NBR 16607, ABNT, 2018).

As resistências mecânicas à compressão axial nas principais idades de 3, 7 e 28 dias servem como parâmetro da evolução da hidratação da argamassa composta de cimento, areia normal e água, em consequência, o controle do aumento da resistência das argamassas (NBR 7215, ABNT, 2019).

Os resultados dos ensaios de índice de finura do cimento realizados no laboratório do SEGRR, podem ser observados na Tabela 26.

Tabela 26: Índice de finura no cimento

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
r (g)	1,80	1,46	1,30
m (g)	50,0	50,0	50,0
F_C	1,00	1,00	1,00
I_F (%)[20]	3,60	2,03	2,03

Fonte: O autor.

I_F - índice de finura do cimento (% massa);
r - resíduo de cimento retido na peneira (g);
m - massa da amostra de cimento (g);
F_C - fator de correção da peneira.

Como pode ser observado na Tabela 25, a cimenteira adota para o índice de finura do cimento o parâmetro o limite de 12,0 % em massa, de acordo com o estipulado por norma (NBR 16697, ABNT, 2018), os resultados apresentem

20 A NBR 16697 prevê que este tipo de cimento deve possuir índice de finura menor que 12%. Os resultados não devem divergir em <0,4%, portanto, o primeiro ensaio foi descartado.

uma média de 1,73 %, enquanto que no laboratório do SEGRR, apresentou o valor de 2,03 %, (Tabela 26) ainda de acordo com o limite definido.

Os resultados do ensaio de massa específica do cimento através do frasco Le Chatelier foram realizados no laboratório do SEGRR, e podem ser observados na Tabela 27.

Tabela 27: Massa específica no cimento

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
m (g)	60,0	60,0	60,0
V1 (cm^3)	1,00	0,70	0,90
V2 (cm^3)	20,90	20,60	20,90
ρ (g/cm^3)	3,02	3,02	3,00

Fonte: O autor.

ρ - massa específica da amostra (g/cm^3);
m - massa do material ensaiado, expressa em gramas (g);
V1 - volume do líquido ocupado no frasco (cm^3);
V2- volume deslocado pela massa da amostra no frasco (cm^3).

Nos resultados dos ensaios de massa específica do cimento, realizados no laboratório do SEGRR, pode-se observar o valor médio de 3,02 g/cm^3, sendo o primeiro ensaio desprezado, visto que, de acordo com a norma, o resultado deve ser a média de pelo menos duas determinações que não difiram entre si mais que 0,02 g/cm^3.

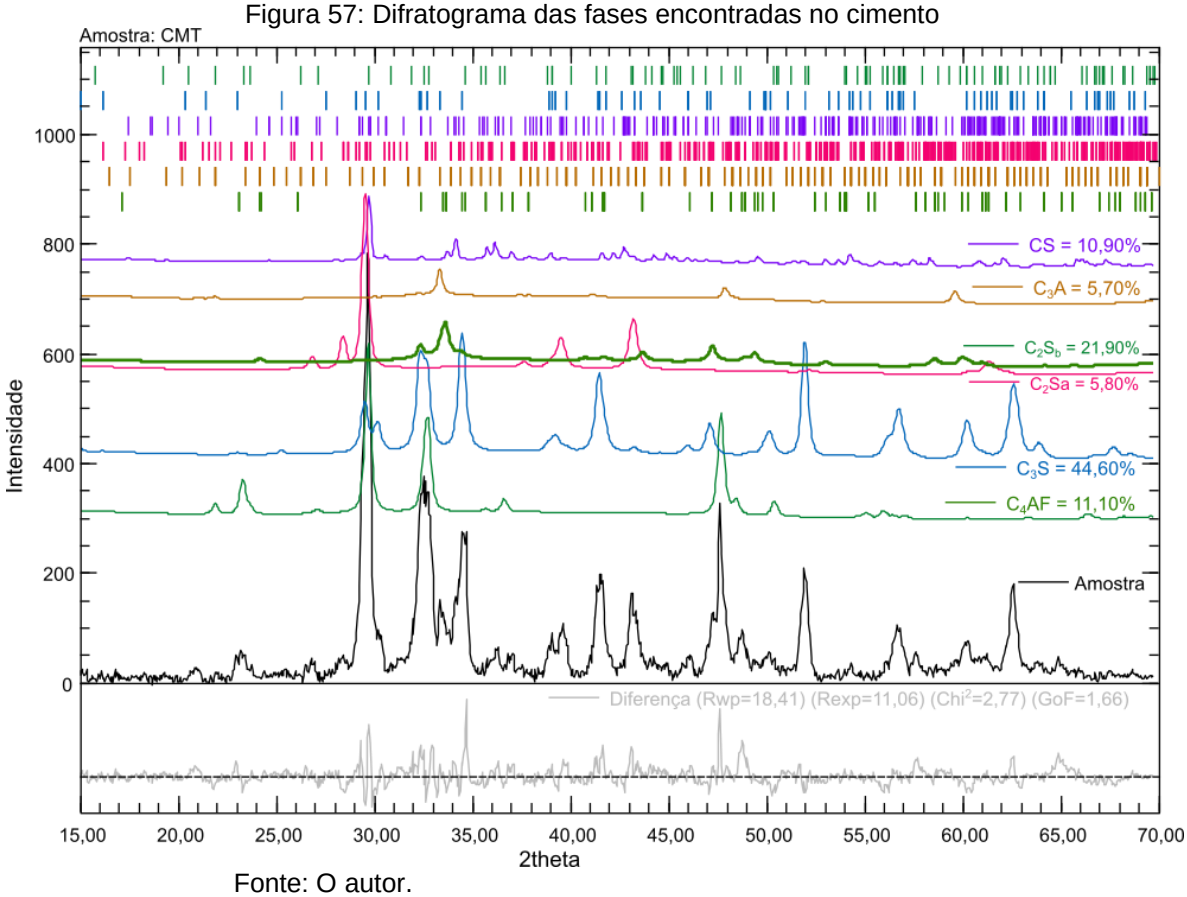
De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2018), a massa específica dos cimentos nacionais fica, em geral, na faixa de 2,98 a 3,12 g/cm^3 (ABCP, 2018).

No Boletim VOTORAN, pode ser encontrado o valor da massa específica de 3,13 g/cm^3 para o tipo de cimento utilizado.

5.1.3. Caracterização mineralógica

A análise por difração de raios X do cimento Portland anidro (em pó) foi realizada de modo a observar suas principais fases cristalográficas qualitativa e quantitativamente, a fim de verificar possíveis reações que podem ocorrer na presença do FGD. Os resultados das fases encontradas são observados na Figura 57.

Figura 57: Difratograma das fases encontradas no cimento



Fonte: O autor.

Como pode ser observado, as fases encontradas a partir do refinamento pelo método Rietveld foram de 27,70 % de silicato dicálcico (C_2S), 44,60 % de silicato tricálcico (C_3S), 5,70 % de aluminato tricálcico (C_3A), e 11,10 % ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), e 10,90 % de sulfato de cálcio (CS).

Comparando-se o quantitativo da amostra de cimento com os dados apresentados na revisão da literatura (Tabela 1), as porcentagens encontradas foram de 10-35 % de silicato dicálcico (C_2S), 42-60 % de silicato tricálcico (C_3S), 6-13 % de aluminato tricálcico (C_3A), e 5-12% de ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) (WITZKE,2018; NOGUEIRA, 2011; SANTANA, 2002; MEHMET, 2006).

5.2. FGD

5.2.1. Caracterizações químicas

A composição química e o teor de perda ao fogo do FGD podem ser observados na Tabela 28. Na Tabela 29, encontram-se os teores de anidrido sulfuroso (SO_2) e anidrido sulfúrico (SO_3) totais.

Tabela 28: Composição química no FGD

Determinações[21]	Amostra FGD[(a)] Resultados (%)
Perda ao fogo[(b)]	21,00
Anidrido silícico (SiO_2)	2,50
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	1,00
Óxido férrico (Fe_2O_3)	0,40
Óxido de cálcio (CaO)	26,30
Óxido de magnésio (MgO)	0,10
Anidrido sulfúrico (SO_3)	47,90
Óxido de potássio (K_2O)	0,20
Óxido de fósforo (P_2O_5)	0,40
Óxido de cromo (Cr_2O_3)	< 0,1
Óxido de manganês (Mn_2O_3)	<0,1
Óxido de zinco (ZnO)	0,10
Óxido de estrôncio (SrO)	< 0,1
Óxido de titânio (TiO2)	0,10
Óxido de cálcio livre (CaO)[(c)]	-
Resíduo insolúvel[(b)]	4,50
Anidrido carbônico (CO_2)[(d)]	1,19

Fonte: Boletim IPT, 2021 - adaptado

Segundo Marinković *et al.* (2005) e Mehmet (2006), o FGD possui, geralmente, uma maior quantidade de partículas de carbono incombusto, na qual um teor de carbono excedente ao limite de 6 %, infere diretamente de maneira negativa na resistência nas propriedades do cimento, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

O FGD possui claramente o índice de perda ao fogo maior do que o cimento, consequente da matéria orgânica incombusta do carvão mineral. A NBR 12653 (ABNT, 2015) estipula para esta classe de material pozolânico o teor limite ≤ 10 %.

Também foi possível observar a grande quantidade de anidrido sulfúrico, composto do sulfato de cálcio, proveniente da captura dos gases SO_X na

21 (a) análise realizada por FRX semiquantitativa; (b) determinação realizada por gravimetria; (c) determinação não realizada; (d) determinação realizada por gasometria.

dessulfurização com 47,90 %, embora apresentar, por outro método (NBR 6473, ABNT, 2003) o teor de 39 %, conforme pode ser observado na Tabela 29.

Tabela 29: Anidridos sulfuroso e carbônico no FGD

Determinações	Amostra FGD
	Resultados (%)
Anidrido sulfuroso (SO_2)	< 0,01
Anidrido sulfúrico (SO_3) total	39,00

Fonte: Boletim IPT, 2021 - adaptado

Na Tabela 30 são apresentados os teores de umidade do FGD para os ensaios realizados no item 4.4.1.7.

Tabela 30: Teores de umidade no FGD

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6
m_1 (g)	0,5	0,5	0,5	1200,0	10,0	10,0
m_2 (g)	0,395	0,397	0,399	989,70	7,80	7,90
U	21,0	20,9	20,7	17,5	22,0	21,0

Fonte: O autor.

U - umidade da amostra (%);
m_1 - massa da amostra úmida (g);
m_2 - massa da amostra seca (g).

O FGD apresentou a média de umidade em 20,5 %, embora não podendo-se obter uma referência do teor fixo na termoelétrica, por se tratar de aterro a céu aberto.

5.2.2. Caracterizações físicas

O índice de finura e massa específica do FGD foi obtido utilizando os mesmos procedimentos realizados com as amostras de cimento Portland. Os resultados podem ser observados nas Tabelas 31 e 32.

Tabela 31: Índice de finura no FGD

	Ensaio 1	Ensaio 2
r (g)	6,10	6,21
m (g)	50,0	50,0
FC	1,00	1,00
I_F (%)[22]	12,193	12,413

Fonte: O autor.

I_F - índice de finura do FGD (% massa);
r - resíduo de FGD retido na peneira (g);
m - massa da amostra de FGD (g);
F_C - é o fator de correção da peneira.

Tabela 32: Massa específica no FGD

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
m (g)	57,4	55,0	55,0
V1 (cm^3)	0,90	1,00	1,00
V2 (cm^3)	23,60	23,50	23,50
ρ (g/cm^3)	2,527	2,444	2,444

Fonte: O autor.

ρ - massa específica da amostra (g/cm^3);
m - massa da amostra (g);
V1 - volume do líquido ocupado no frasco (cm^3);
V2 - volume deslocado pela massa da amostra no frasco (cm^3).

O índice de finura do FGD mostrou-se maior em comparação ao cimento, apesar de apresentar massa específica inferior, o que trouxe maior demanda de água que possibilitasse a trabalhabilidade da argamassa.

Dos três ensaios realizados, no primeiro tomou-se por parâmetro uma amostra de 60 g de FGD, para repetitividade dos procedimentos realizados com o cimento, no qual a massa adotada deve ser suficiente para causar o deslocamento do líquido entre as marcas entre 18 cm^3 e 24 cm^3 do frasco de Le Chatelier, porém, a massa da amostra extrapolou a escala, sendo o ensaio realizado mais duas vezes, adotando-se uma massa menor.

Segundo a norma, os resultados não devem divergir em <0,02 % entre si, portanto, foram adotadas as médias dos últimos dois ensaios. A massa específica do FGD apresentou uma média de 2,45 g/cm^3, o que corresponde em cerca de 20 % menos denso em comparação à massa específica do cimento.

22 Os resultados não devem divergir em <0,4% entre si.

A análise de Marinković *et al* (2005) para o gesso FGD apresentou a massa específica de 2,34 g/cm³, de Santana (2002), uma aproximação entre 2,95 e 3,13 g/cm³; Qiao *et al.* (2005), 2,19 g/cm³; Siddique (2010), entre 2,28 a 2,70 g/cm³; Castro (2016), 2,28 g/cm³, o que apresenta uma amplitude de 2,19 a 3,13 g/cm³ em tais referências, confirmando a existência de variação da densidade de acordo com o tipo de carvão, da região extraída, e pelo tipo de queima realizado.

5.2.3. Caracterizações físico-químicas

O cálculo de material pozolânico (FGD) utilizado foi realizado conforme a Equação 17.

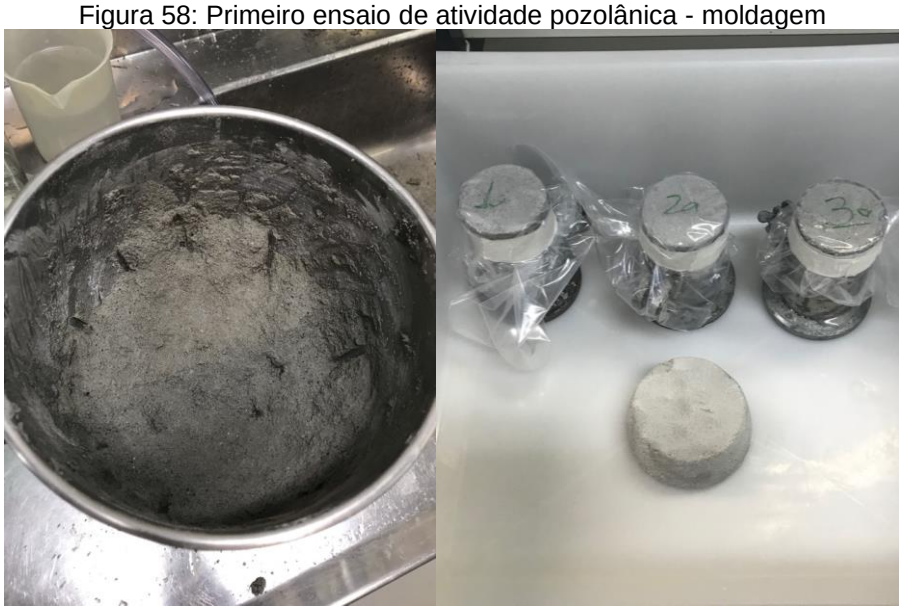
Equação 17 – cálculo da massa de FGD para ensaio de atividade pozolânica

$$m_{poz} = \frac{2 * 2{,}450}{2{,}240} * 104g \therefore m_{poz} = 227{,}5g\ FGD$$

m_{poz} - massa do material pozolânico ensaiado (g).

No ensaio de abatimento para o experimento de atividade pozolânica, a fim de se definir a quantidade de água necessária para a determinação da pasta de consistência normal, a mistura de FGD com cal apresentou comportamento brusco de endurecimento da pasta, com cerca de menos de cinco minutos após o amassamento, conforme mostrado nas Figura 58 e 59.

Figura 58: Primeiro ensaio de atividade pozolânica - moldagem



Fonte: O autor.

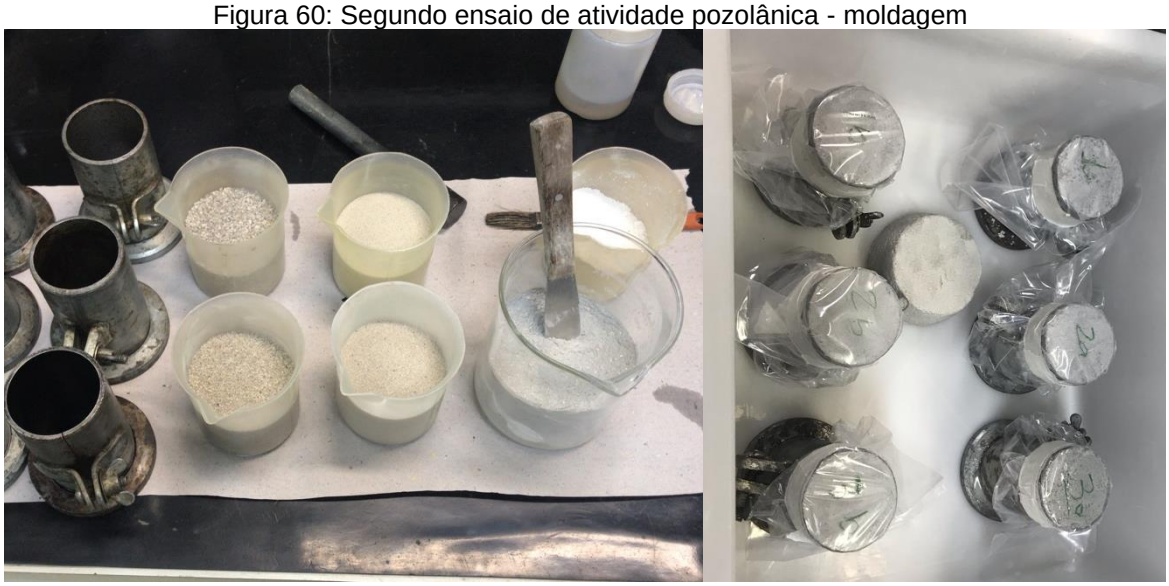
Figura 59: Endurecimento da pasta no ensaio de abatimento

Fonte: O autor.

O material restante foi coletado e compactado em uma série de três moldes. Um novo ensaio foi realizado a fim de se permitir que a mistura fosse moldada nos corpos de prova antes do início do endurecimento, este foi realizado sem a medição do abatimento da pasta para a otimização do tempo de endurecimento.

A segunda série de três corpos de prova moldados foram identificados e separados por ensaio, conforme mostrado na Figura 60.

Figura 60: Segundo ensaio de atividade pozolânica - moldagem



Fonte: O autor.

Os resultados dos ensaios de atividade pozolânica do FGD são apresentados na Tabela 33. O primeiro ensaio de resistência foi descartado devido à impossibilidade de desmoldagem das formas, no segundo ensaio os corpos de prova puderam ser desmoldados com facilidade, como pode ser visto nas Figuras 61 e 62.

Tabela 33: Atividade pozolânica com cal aos 7 dias

Ensaio	Resistência (MPa)	DRM (%)
1	n/a	n/a
2	3,4	4,0

Fonte: O autor.

DRM – Desvio Relativo Máximo

Figura 61: Primeiro ensaio de atividade pozolânica - desmoldagem

Fonte: O autor.

Figura 62: Segundo ensaio de atividade pozolânica - desmoldagem

Fonte: O autor.

A determinação do índice de desempenho do FGD com cimento Portland foi avaliada juntamente com as preparações das matrizes de substituição do cimento por FGD, nas quais os procedimentos foram exatamente os mesmos para moldagem, quantidade de materiais e tempo de cura aos 28 dias.

O resultado final das avaliações do desempenho com cimento Portland é apresentado na Tabela 34.

Tabela 34: Índice de desempenho do FGD com cimento

% FGD	Resistência (MPa)	Desempenho (%)
0	37,12	100
25	10,91	29
50	6,02	16
75	3,01	8

Fonte: O autor.

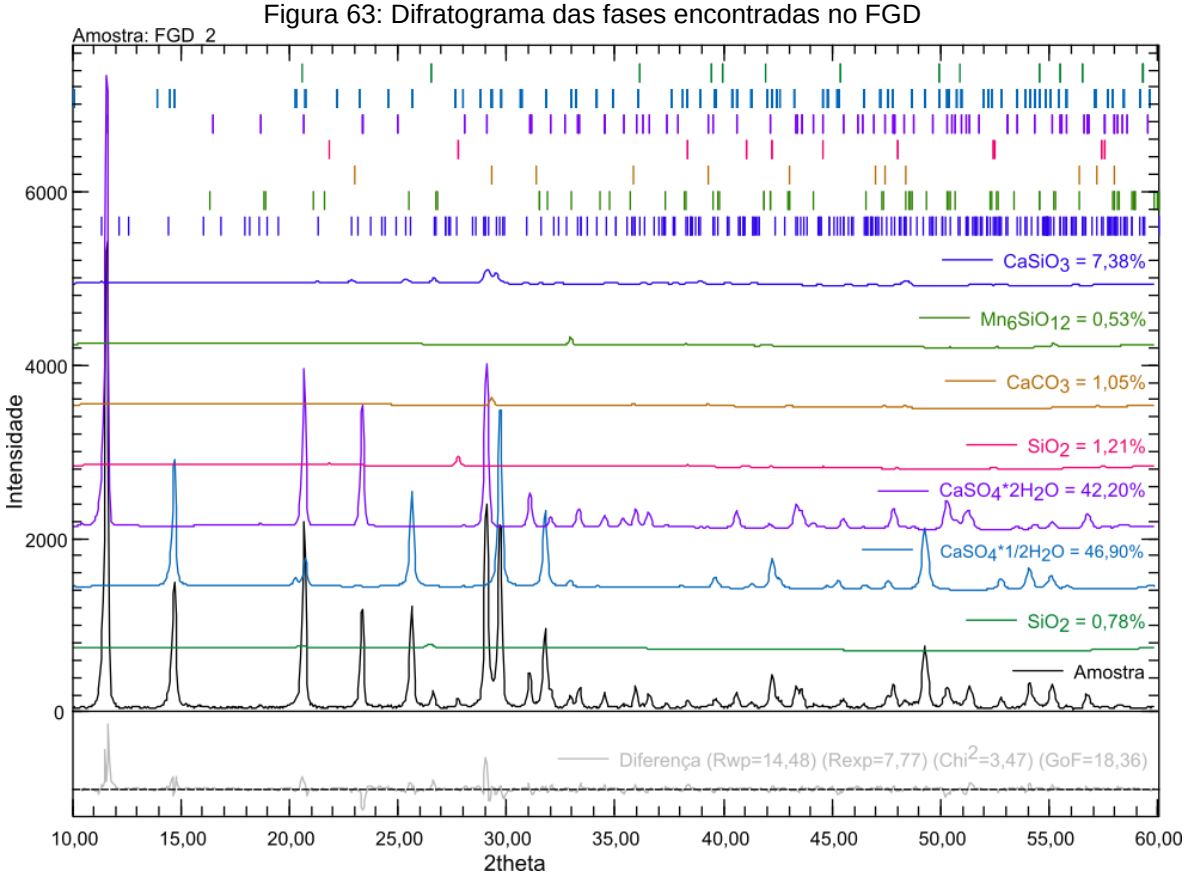
Quanto ao desempenho aos 28 dias, pôde-se notar que, quanto maior a adição em massa, na substituição do cimento, menor o desempenho na resistência mecânica de compressão axial, embora não se possa descartar o fato de que todos os parâmetros foram fixados para um ponto de partida pela norma, sendo necessária a realização de mais ensaios variando-se a massa do cimento, do FGD,

e também da diminuição da massa de areia nas pastas, para um equilíbrio do fator água/cimento, e o aumento da resistência dos CP.

5.2.4. Caracterização mineralógica

A análise por difração de raios X do FGD (em pó) foi igualmente realizada de modo a observar suas principais fases cristalográficas qualitativa e quantitativamente, a fim verificar o potencial de reações que pode ocasionar na hidratação com o cimento Portland. Os resultados das fases encontradas são observados na Figura 63.

Figura 63: Difratograma das fases encontradas no FGD



Fonte: O autor.

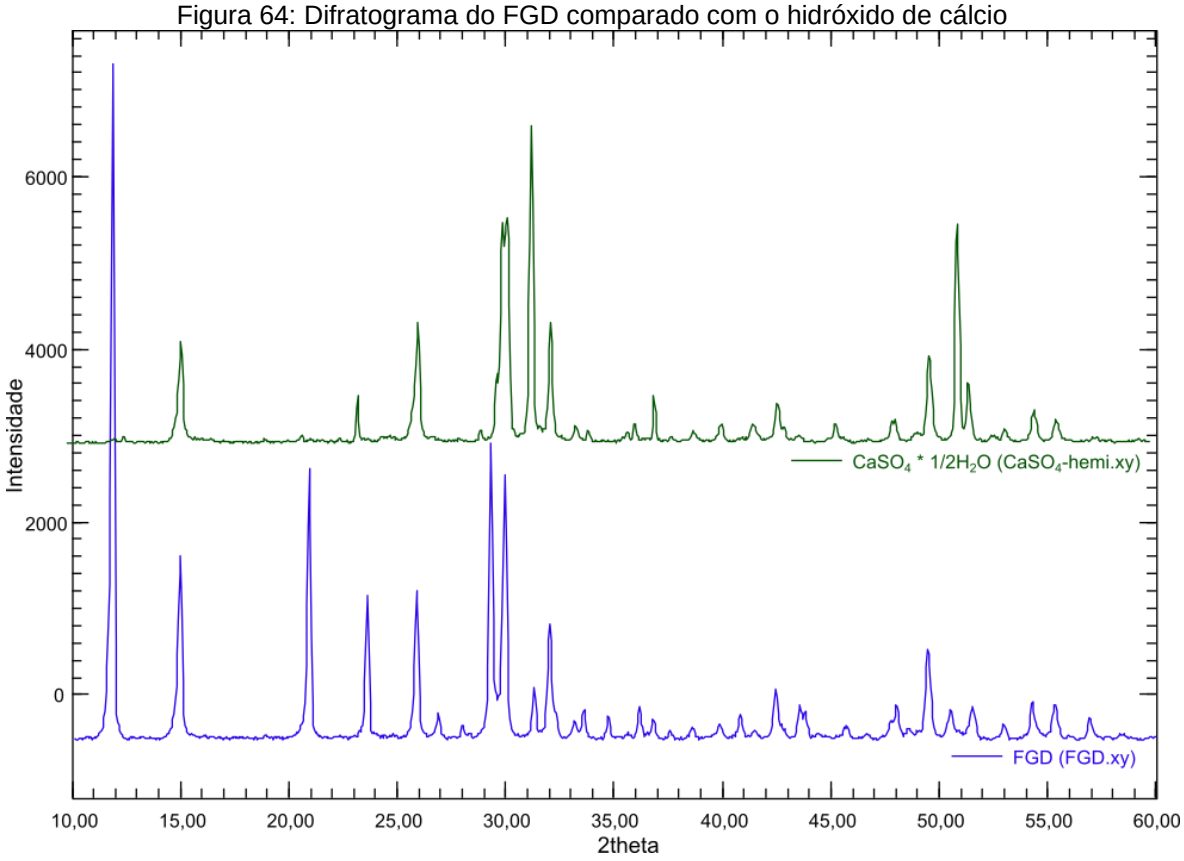
Como pode ser observado, as fases encontradas a partir do refinamento pelo método Rietveld, apresentam as porcentagens de 7,38 % de silicato de cálcio ($CaSiO_3$); 0,53% de silicato de manganês ou *braunita* (Mn_6SiO_{12}); 1,99% de sílica (SiO_2); e 1,05% de carbonato de cálcio ($CaCO_3$).

Observa-se, predominantemente, as quantidades de 46,90% e 42,20% das fases de sulfato de cálcio hemi-hidrato ($CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$) e sulfato de cálcio di-hidrato ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), respectivamente.

Os picos de hemi-hidrato provavelmente ocorreram devido à secagem da amostra em estufa para análise em DRX, ocorrendo perda da umidade e consequentemente a perda dos hidratos nas ligações moleculares.

Nesta fase, também foi realizada a DRX do sulfato de cálcio com 99 % de pureza, a fim de se comparar possíveis traços secundários nas análises de refinamento pelo método Rietveld no FGD, os resultados podem ser observados na Figura 64.

Figura 64: Difratograma do FGD comparado com o hidróxido de cálcio



Fonte: O autor.

Pôde-se notar, comparando-se os difratogramas apresentados na Figura 64, que as reações dos gases sulfurosos na termoelétrica Pampa Sul com a cal, em meio aquoso no dessulfurizador, produziu maioritariamente sulfato de cálcio di-hidratado.

5.3. Agregado miúdo

5.3.1. Caracterização química

A análise do teor de umidade da areia comercial foi realizada para verificar a possibilidade de se utilizar materiais comumente encontrados no

mercado, e uma posterior propositura de que também este seja substituído nas matrizes.

Os teores de umidade foram obtidos conforme a Tabela 35, a média dos ensaios foi de 8,2%.

Tabela 35: Teores de umidade na areia comercial

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
m1 (g)	30	30	30	30	1100
m2 (g)	27,50	27,60	27,70	27,60	1009,20
U	8,3	8,0	8,0	8,3	8,3

Fonte: O autor.

U - umidade da amostra (%);
m_1 - massa da amostra úmida (g);
m_2 - massa da amostra seca (g).

5.3.2. Caracterizações físicas

As análises de granulometria da areia comercial foram realizadas também para verificar a possibilidade de se utilizar materiais comuns de mercado, e uma posterior substituição nas matrizes por outros materiais de preenchimento.

Os resultados da análise granulométrica em duplicata da areia média comercial podem ser observados nas tabelas 36 e 37.

Tabela 36 - Granulometria da areia comercial

Peneira n°	Peneira MESH	Abertura Ømm	Massa retida (g)	% Fração acumulada	% Retida	% Retida acumulada	% Passante
	8,00	2,40	3,00	3,00	1,00	1,00	99,00
16	14,00	1,20	44,30	47,30	14,76	15,76	84,24
30	28,00	0,60	71,30	118,60	23,76	39,52	60,48
50	48,00	0,30	78,90	197,50	26,30	65,82	34,18
100		0,15	60,70	258,20	20,56	86,38	13,62
	Fundo		41,70	299,90	13,90		
	Total		299,90		100,00		

Fonte: O autor.

O módulo de finura da areia é apresentado conforme a Equação 18.

Equação 18 – Cálculo do módulo de finura da areia

$$M_F = \frac{\sum_{\%retida\ acumulada}}{100} \therefore M_F = 2{,}0848$$

M_F – módulo de finura da areia

O diâmetro máximo do agregado da amostra apresentou diâmetro máximo de 2,4mm (1%, peneira 8), conforme mostra a Tabela 35.

Tabela 37: Granulometria na areia comercial - duplicata

Peneira n°	Peneira MESH	Abertura Ømm	Massa retida (g)	% Fração acumulada	% Retida	% Retida acumulada	% Passante
	8,00	2,40	1,10	1,10	0,37	0,37	99,67
16	14,00	1,20	44,80	45,90	14,93	15,30	84,74
30	28,00	0,60	76,10	122,00	25,37	40,67	59,37
50	48,00	0,30	70,70	192,70	23,57	64,24	35,80
100		0,15	58,00	250,70	19,33	83,57	16,47
	Fundo		49,40	300,10	16,47		
	Total		300,10		100,04		

Fonte: O autor.

O módulo de finura do segundo ensaio apresentou-se com M_F=2,0415, e o diâmetro máximo do agregado também em 2,4mm (1,1%, peneira 8).

Pôde-se verificar que em ambos os ensaios, as areias se classificam como média, dentro das especificações do fornecedor.

A massa específica da areia através do método do frasco de Chapman foi obtida em duplicata, e calculada através da Equação 19.

Equação 19 – cálculo da massa específica da areia

$$\gamma_1 = \frac{500}{393 - 200} \therefore \gamma_1 = 2{,}59 g/cm^3$$

$$\gamma_2 = \frac{500}{394 - 200} \therefore \gamma_2 = 2{,}58 g/cm^3$$

γ = massa específica da areia (g/cm³).

A importância fundamental da determinação da massa específica dos agregados é a utilização desses valores nos cálculos de consumo de materiais que farão parte da composição da argamassa.

A areia comercial foi utilizada apenas para a verificação dos parâmetros utilizados comumente nos sistemas construtivos, são dados que fornecerão maiores resultados ao se substituir seu volume em massa pelo FGD, além de misturas de solo-FGD, e ativações alcalinas que futuramente serão observadas.

A areia normalizada tem função de padronizar a granulometria para a distribuição dos esforços solicitantes nos corpos de prova grão a grão, o que pôde

ser observado na ruptura com o formato de “ampulheta” comprovando que as misturas foram satisfatórias, tendo a distribuição homogênea e as cargas aplicadas distribuídas de maneira igual.

O padrão para areia normalizada serve para manter um desvio estipulado (conhecido) aproximado no resultado de resistência dos corpos de prova.

O ensaio para utilização de areia normalizada tratada a partir da areia média comercial mostra como é possível obter uma granulometria padronizada, a partir de um material fornecido comercialmente, a fim de se atingir a homogeneidade na mistura da argamassa.

O estado homogêneo da pasta de cimento contribui para a distribuição interna das cargas solicitantes, partícula a partícula, que, em estado sólido prismático, atribui a resistência mecânica das matrizes de teste.

5.4. Matrizes cimentícias

5.4.1. Caracterizações no estado fresco

As pastas de consistência normal foram obtidas por meio do aparelho de Vicat com a sonda de êmbolo. As quantidades de materiais e a relação água/cimento ou água/cimento+FGD, para que as pastas atingissem o estado de consistência requerido por norma estão elencados na Tabela 38.

A sigla CP00 representa o corpo de prova com 100% de cimento e água, enquanto que CP25, CP50, e CP75 representam as proporções de substituição de 25 %, 50 %, e 75 % em massa do cimento pelo FGD.

Tabela 38: Quantidade de materiais para pasta de consistência normal

	CP00	CP25	CP50	CP75
Cimento (g)	500	375	250	125
FGD (g)	0	125	250	375
Água (g)	135	215	275	325
Fator a/c	0,27	0,43	0,55	0,65

Fonte: O autor.

Nos ensaios de consistência normal, as pastas CP00 e CP25 tiveram comportamentos iguais, sendo moldadas normalmente. Para as pastas com 50 %, foi utilizada a adição do padrão anterior na quantidade de água como referência,

ou seja, utilizou-se a relação 0,43 no fator água/cimento+FGD, apresentando uma consistência do tipo “farofa”, como pode ser observado na Figura 65.

Figura 65: Pasta do ensaio de consistência com 50 % de FGD

Fonte: O autor.

a) consistência aparente com relação de água/cimento+FGD 0,43;
b) consistência aparente com relação de água/cimento+FGD 0,55.

Para as pastas com 75 %, ocorreu o mesmo comportamento visto nas pastas com 50 %, porém, mesmo elevando a adição de água para um fator de 0,65, a pasta apresentou resistência aparente ao embolo de Vicat, como pode ser observado na Figura 66, não atingindo, mesmo após o ensaio ser repetido, a consistência padrão conforme prevê a norma (NBR 16606, ABNT, 2018), endurecendo logo em seguida.

Figura 66: Pasta do ensaio de consistência com 75 % de FGD

Fonte: O autor.

a) consistência aparente com relação de água/cimento+FGD 0,65;
b) material descartado;
c) pasta endurecida.

Para a determinação dos tempos de pega, foram preparadas as pastas com mistura de cimento + FGD + água. Os resultados são mostrados na Tabela 39 e Figuras 67 e 68.

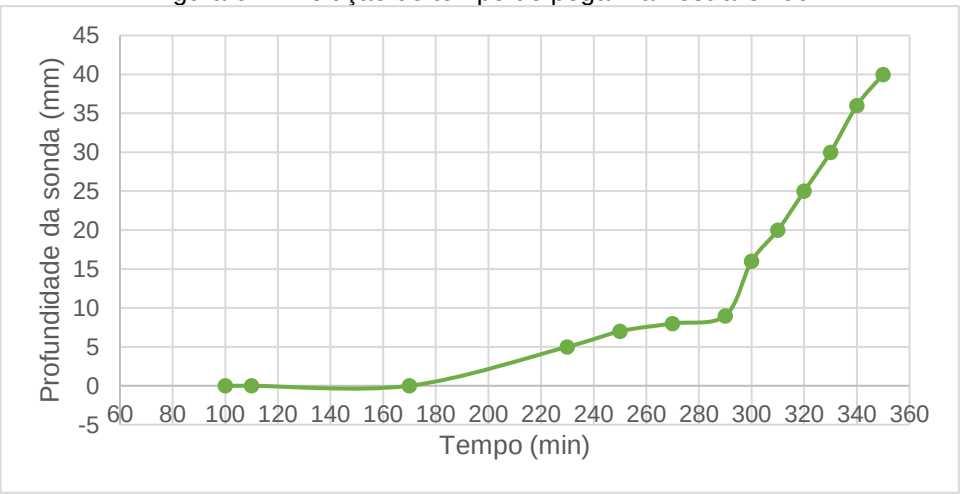
Nos ensaios CP25 e CP50, os tempos de pega para as pastas ultrapassaram o limite de pega do cimento, ou seja, com mais de 350 minutos, as pastas com esses índices de substituição em massa não apresentaram atividade de início para o estado endurecido, não sendo possível determinar resultados de pega em um único dia.

Tabela 39: Tempos de início e fim de pega

Pega	CP00	CP25	CP50	CP75
Início (min)	330	n/a	n/a	3
Fim (min)	350	n/a	n/a	5

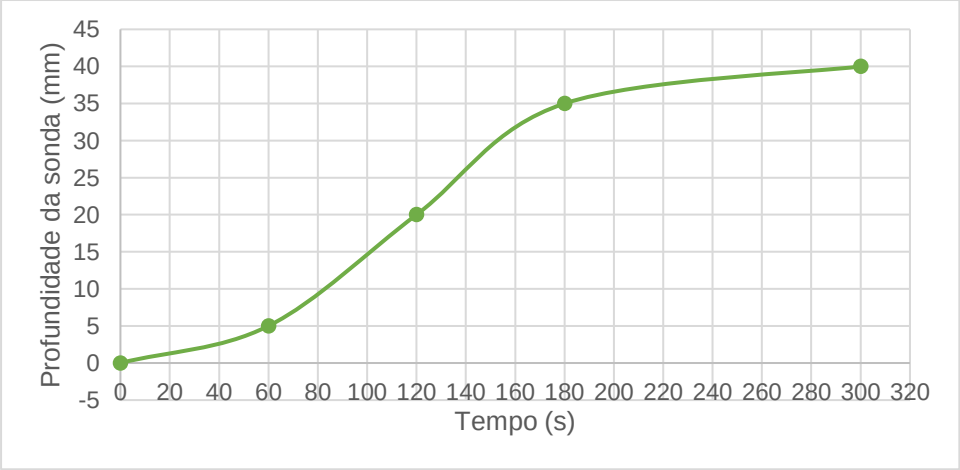
Fonte: O autor.

Figura 67: Evolução do tempo de pega – amostra CP00



Fonte: O autor.

Figura 68: Evolução do tempo de pega – amostra CP75

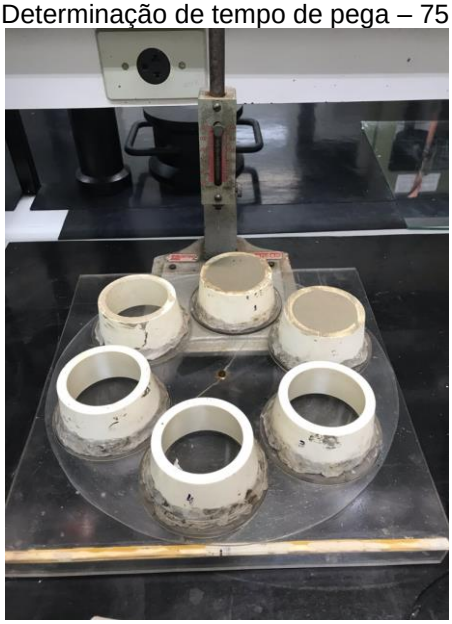


Fonte: O autor.

A demanda maior de água que permitisse a trabalhabilidade da argamassa trouxe a consequente elevação do tempo de hidratação das pastas de 25 % e 50 %, no entanto, para as pastas de 75 % de FGD, ocorreu um notável aumento no tempo de início e fim de pega, assim como no ensaio de consistência.

Conhecido como *flash set* da pasta, o material passou para o estado endurecido passados 3 minutos do contato da água com a mistura de FGD com cimento, e logo após 5 minutos, a agulha do aparelho não mais penetrava na pasta, como pode ser visto na Figura 69.

Figura 69: Determinação de tempo de pega – 75 % de FGD



Fonte: O autor.

As moldagens dos corpos de prova foram realizadas com formas cilíndricas de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura. Os volumes e materiais calculados podem ser observados nas Tabelas 40 e 41.

Tabela 40: Volume de materiais para moldagem dos corpos de prova

	CP00	**CP25**	**CP50**	**CP75**
Cimento (cm³)	208	156	104	52
FGD (cm³)	0	64	127	191
Areia (cm³)	749	749	749	749
Água (cm³)	300	300	330	385
Qtde CP por traço	6,40	6,46	6,67	7,01
M_e Cimento (g/cm³)	M_e FGD (g/cm³)	M_e Areia (g/cm³)	M_e Água (g/cm³)	Vol. Cilindro (cm³)
3,00	2,45	2,50	1,00	196,35

Fonte: O autor.

M_e – massa específica;
CP – corpo de prova.

Tabela 41: Quantidade de materiais para moldagem dos corpos de prova

	CP00	CP25	CP50	CP75
Cimento (g)	624	468	312	156
FGD (g)	0	156	312	468
Areia (g)	4x(468)	4x(468)	4x(468)	4x(468)
Água (g)	300	300	330	385
Qtde CP por traço	6,40	6,46	6,67	7,01

Fonte: O autor.

Através do ensaio de abatimento para determinação do índice de consistência da argamassa, por meio do tronco cônico em mesa, foi possível observar o aumento da consistência das argamassas em função do aumento da quantidade de FGD acrescentado em substituição ao cimento, assim, foi possível se determinar a curva de correção do fator água/cimento+FGD (em massa), para que fosse possível a moldagem nas formas cilíndricas.

Nos dados da cimenteira (Tabela 25) é apresentada a porcentagem de água no padrão de 25,94 %, estando dentro dos parâmetros dos ensaios de laboratório, com 27 ± 1 % (CP00, Tabela 40).

Na Figura 70 pode ser observado um ensaio de abatimento da amostra CP00, os respectivos valores de abatimento para as relações de água/cimento+FGD podem ser observados nas Tabelas 41 a 44.

Figura 70: Mesa para ensaio de abatimento com o ensaio CP00

Fonte: O autor.

Após vinte e quatro horas, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e imersos em solução com hidróxido de cálcio em caixas plásticas para controle e cura.

5.4.2. Caracterizações no estado endurecido

Os corpos de prova foram rompidos por compressão axial às idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias, os resultados podem ser observados nas Tabelas 42 a 45.

Tabela 42: Resistência à compressão - CP de referência

Amostra	Resistência Média (MPa)	DRM (%)	Abatimento	A/C (%)
CP01D00	16,36	1,54	169	0,48
CP03D00	27,21	5,07	169	0,48
CP07D00	29,43	5,68	168	0,48
CP28D00	37,12	2,70	168	0,48
CP91D00	41,63	4,00	168	0,48

Fonte: O autor.

DRM – Desvio Relativo Máximo;
A/C – relação água/cimentio

Tabela 43: Resistência à compressão – 25% de FGD

Amostra	Resistência Média (MPa)	DRM (%)	Abatimento	A/C (%)
CP01D25	6,02	0,00	160	0,48
CP03D25	6,90	5,45	160	0,48
CP07D25	7,86	4,26	160	0,48
CP28D25	10,91	3,45	160	0,48
CP91D25	14,71	2,27	160	0,48

Fonte: O autor.

Tabela 44: Resistência à compressão – 50% de FGD

Amostra	Resistência Média (MPa)	DRM (%)	Abatimento	A/C (%)
CP01D50	1,00	0,00	160	0,53
CP03D50	3,51	0,00	160	0,53
CP07D50	4,51	0,00	160	0,53
CP28D50	6,02	0,00	160	0,53
CP91D50	6,90	5,00	160	0,53

Fonte: O autor.

Para que fosse possível a moldagem dos corpos de prova com 75 % de substituição, foi necessária a correção da relação água/cimento+FGD como visto na Tabela 44, para um valor acima dos limites da norma, garantindo assim, o

abatimento da pasta e consequentemente o aumento do tempo útil no processo de moldagem na forma.

Para esta porcentagem de substituição, e por motivo da alteração do comportamento da pasta que apresentou rápido endurecimento, foram moldados os corpos de prova de 75 % apenas para a idade de 28 dias, a fim de se obter a medição do índice de desempenho com o material pozolânico, além disso, mais dois CP com 75 % foram armazenados para o acompanhamento nos demais ensaios.

Tabela 45: Resistência à compressão – 75% de FGD

Amostra	Resistência Média (MPa)	DRM (%)	Abatimento (mm)	A/C (%)
CP28D75	3,01	0,00	160	0,62

Fonte: O autor.

Os CP de referência foram rompidos por compressão axial às idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias, e apresentaram resultados de evolução na resistência padrão em comparação com as médias obtidas no relatório laboratorial da cimenteira (Tabela 25), cujos dados de resistências são apresentados nas idades de ruptura de 3, 7 e 28 dias, com as resistências médias de 23,79 MPa, 28,32 MPa e 33,56 MPa respectivamente.

Também foi possível observar que houve um decréscimo de resistência para todas as amostras com substituição, não podendo se descartar, que também houve o prolongamento no tempo de hidratação, o que retardou os tempos de pega das argamassas de todas as idades.

O prolongamento do tempo de hidratação fez com que a hidratação dos grãos de cimento ocorresse com mais homogeneidade, o que pode ser observado nos cálculos de desvio relativo máximo nascimento resistências das amostras para cada idade de ruptura, as quais foram de 4 CP por ensaio.

Também pôde-se observar esta homogeneidade na distribuição do carregamento axial no ensaio de resistência mecânica, conforme observado na Figura 71.

Figura 71: Distribuição de carga no cilindro

Fonte: O autor.

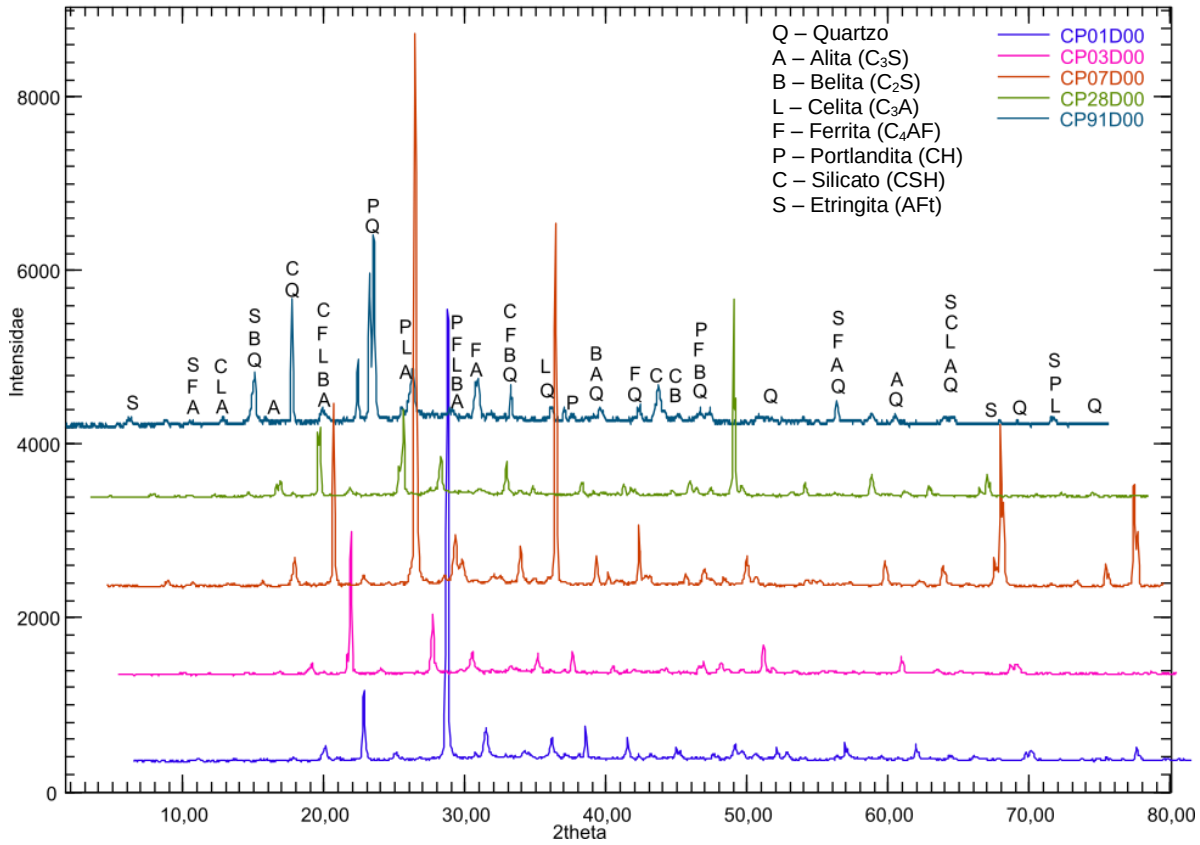
Os desvios de resistência entre cada CP com substituição por FGD foram muito menores, ou quase zero, em comparação com os CP de referência.

Após as amostras serem rompidas, foram submetidas ao DRX para comparação da evolução qualitativa das fases em cada idade de ruptura seguindo as proporções de substituição.

As idades estabelecidas para o método de identificação quantitativa de fases (método Rietveld) foram de 28 dias, visto que é nesta idade que a argamassa referência com 100 % de cimento alcança sua resistência relativa máxima. Para este motivo, adotou-se como referência a idade de 28 dias para as argamassas com 25, 50 e 75 % de substituição por FGD, a fim de se observar as possíveis variações na quantidade de material formado.

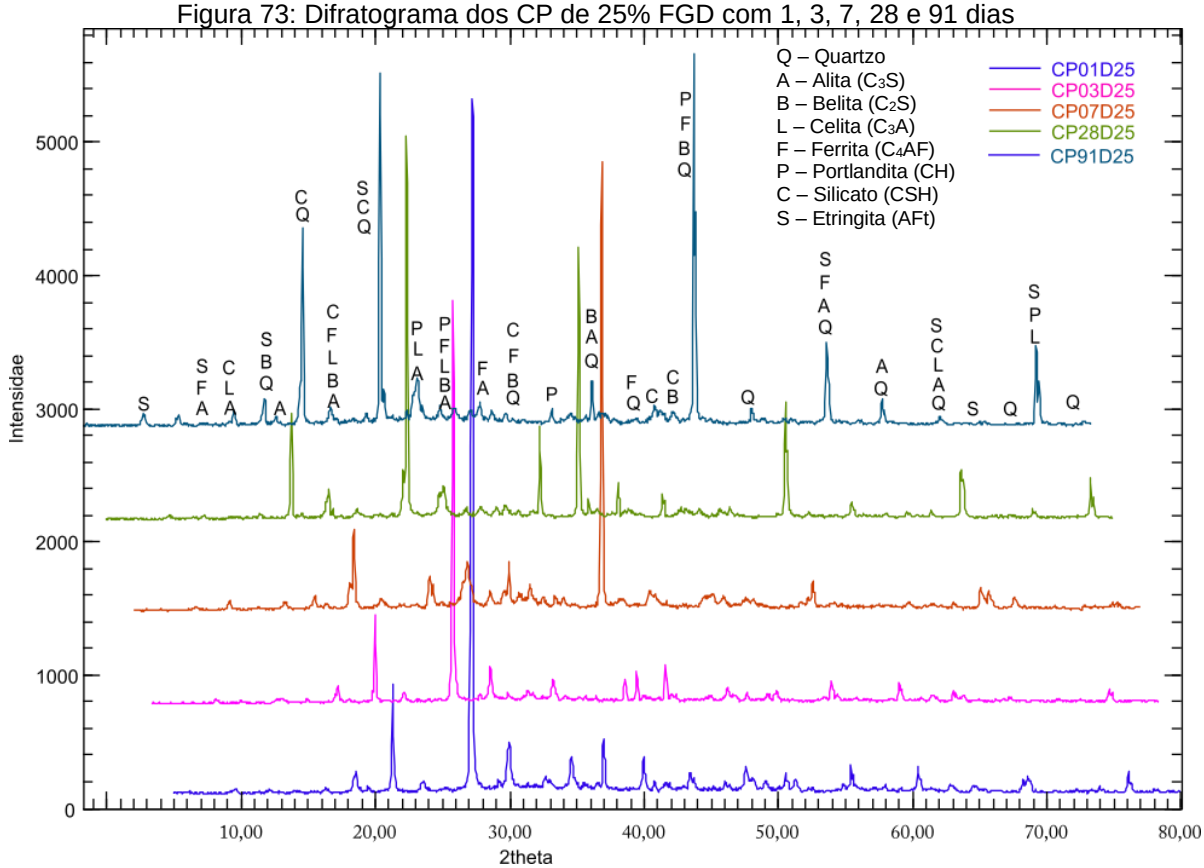
O acompanhamento qualitativo das fases de composição mineralógica de cada amostra nas idades e substituições diferentes foi realizado de forma qualitativa e quantitativa, conforme as Figuras 72 a 75.

Figura 72: Difratograma dos CP de referência com 1, 3, 7, 28 e 91 dias



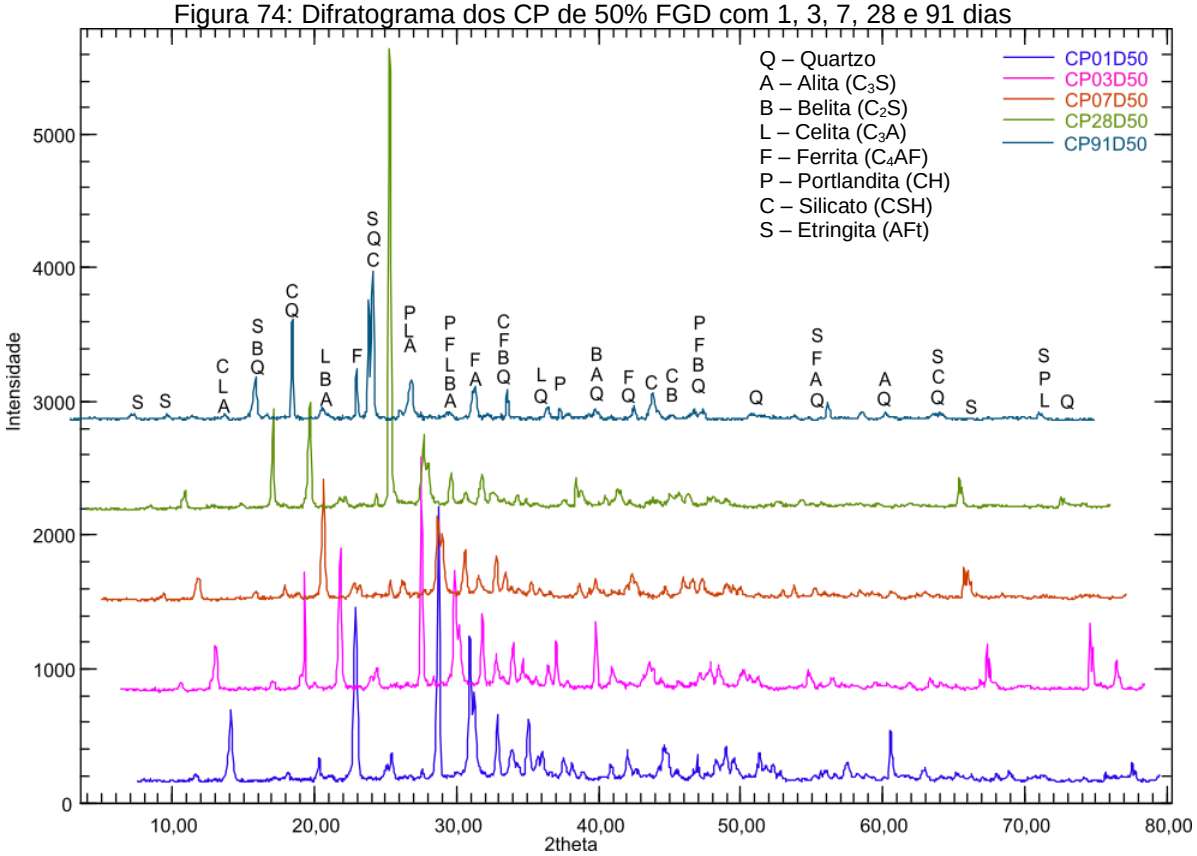
Fonte: O autor.

Figura 73: Difratograma dos CP de 25% FGD com 1, 3, 7, 28 e 91 dias



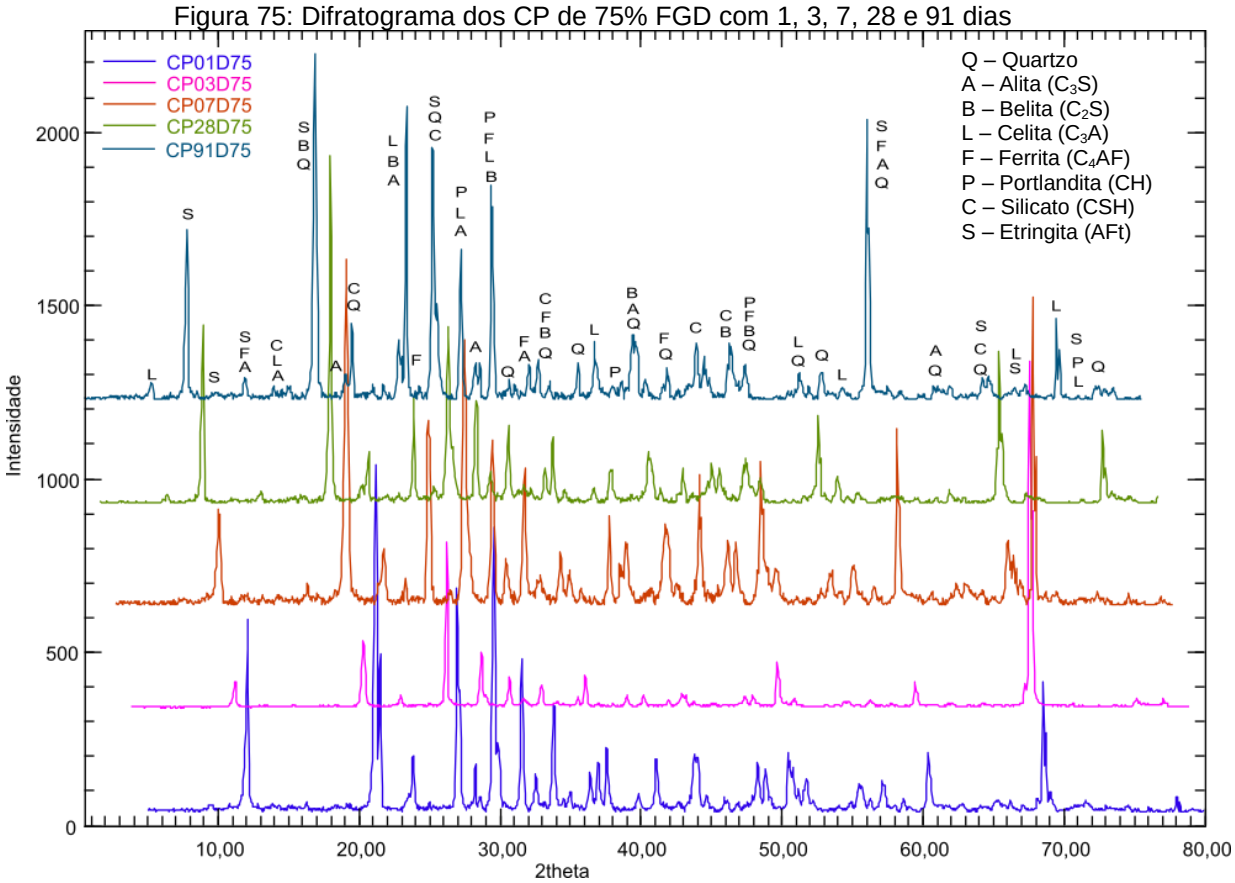
Fonte: O autor.

Figura 74: Difratograma dos CP de 50% FGD com 1, 3, 7, 28 e 91 dias



Fonte: O autor.

Figura 75: Difratograma dos CP de 75% FGD com 1, 3, 7, 28 e 91 dias



Fonte: O autor

Comparando-se os difratogramas das Figuras 74 a 77, nota-se primeiramente que, quanto maior a adição de FGD, mais material amorfo é formado, o que pode ser observado na quantidade de picos secundários de menor intensidade que se tornaram gradativamente visíveis.

Na Figura 72, pode ser observado o aumento da cristalinidade na formação das fases de silicato de cálcio hidratado (CSH), do sulfato AFt (etringita), que se define em maior quantidade a partir dos 7 dias de hidratação, e a fixação da portlandita (CH). Observa-se também a diminuição dos picos de alita (C_3S) e celita (C_3A), responsáveis pelas reações iniciais do cimento nas primeiras idades.

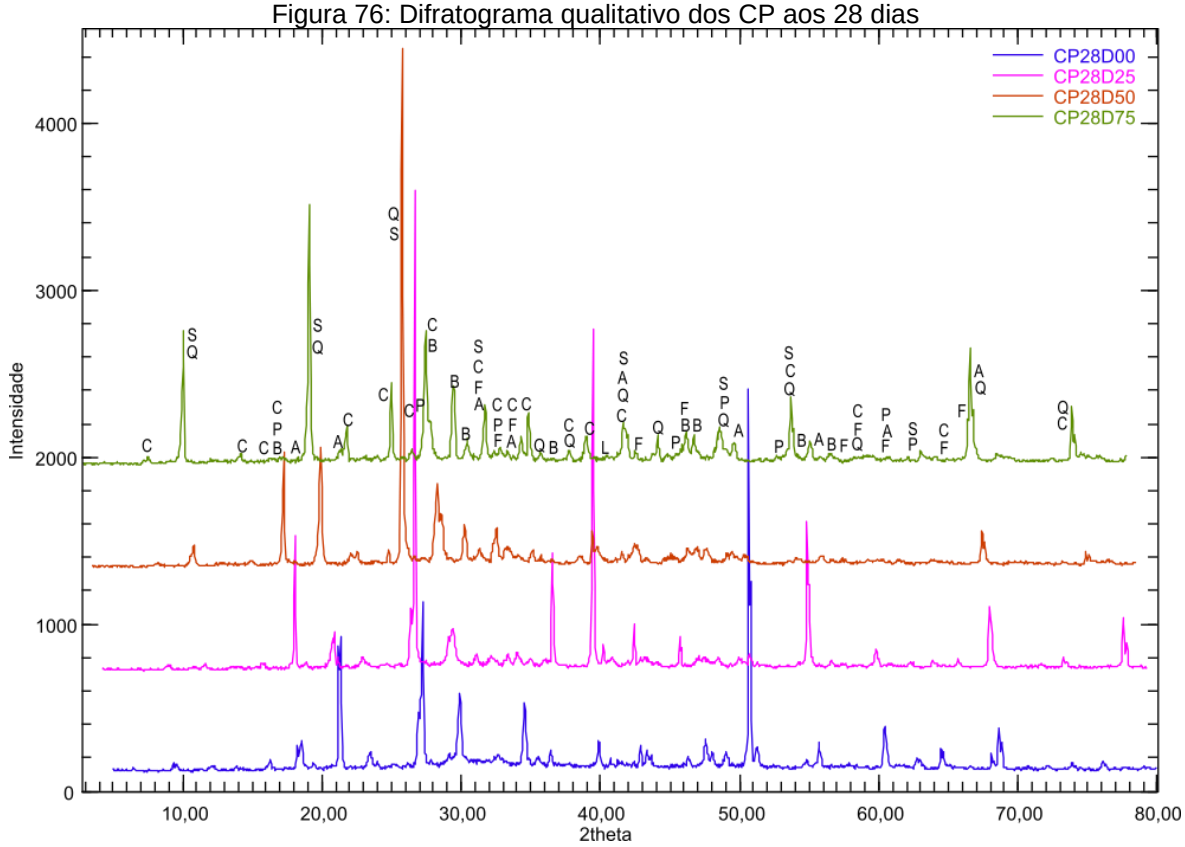
Nas Figura 73 e 74, pode ser observado o aumento dos picos correspondentes à formação de sulfatos AFt (etringita) e de portlandita (CH), proveniente da dissolução do gesso FGD. Nestas quantidades, notam-se o aumento gradativo das fases secundárias amorfas, observadas pelo aumento de picos de menor intensidade.

Na Figura 75, observa-se picos mais proeminentes correspondentes à formação de sulfatos AFt, confirmando a presença das fases responsáveis pela diminuição brusca da resistência dos CP com a substituição de 75 % de FGD, os picos de AFm (monosulfato) são sobrepostos ao AFt.

Na Figura 76, são apresentados os difratogramas de acompanhamento qualitativo das fases de composição mineralógica de cada amostra retirada dos corpos de prova, que foram rompidos aos 28 dias com 00, 25, 50 e 75 % de substituição por FGD.

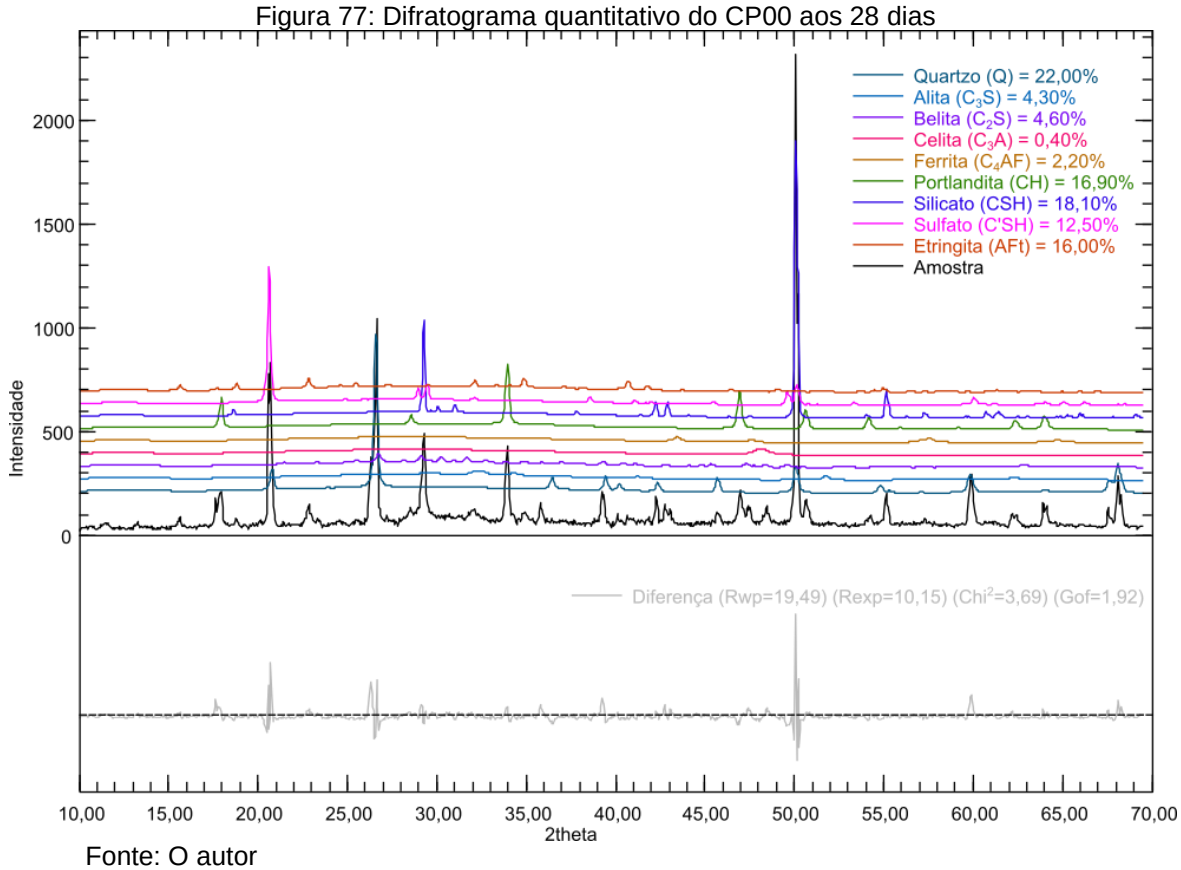
Nas figuras 77 a 80 podem ser observados os quantitativos das fases de composição mineralógica encontradas através do refinamento pelo método Rietveld.

Figura 76: Difratograma qualitativo dos CP aos 28 dias



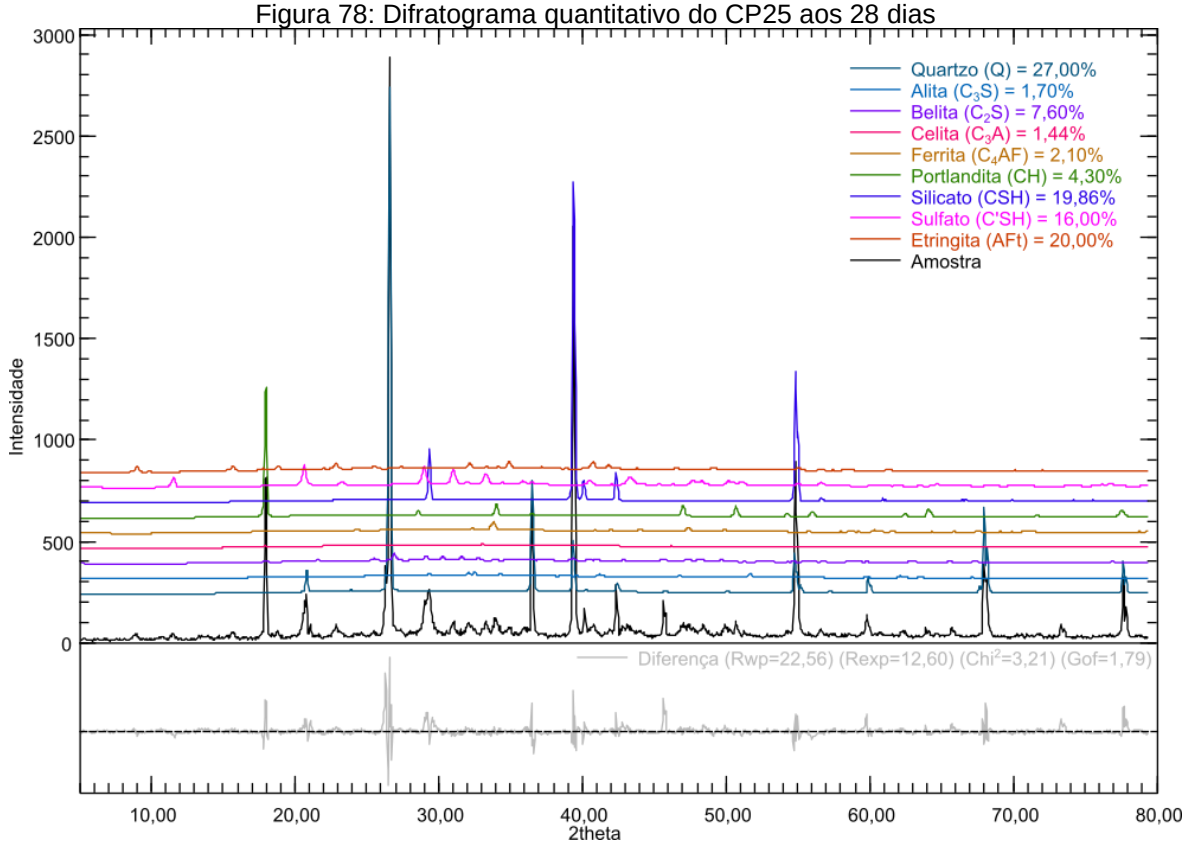
Fonte: O autor

Figura 77: Difratograma quantitativo do CP00 aos 28 dias



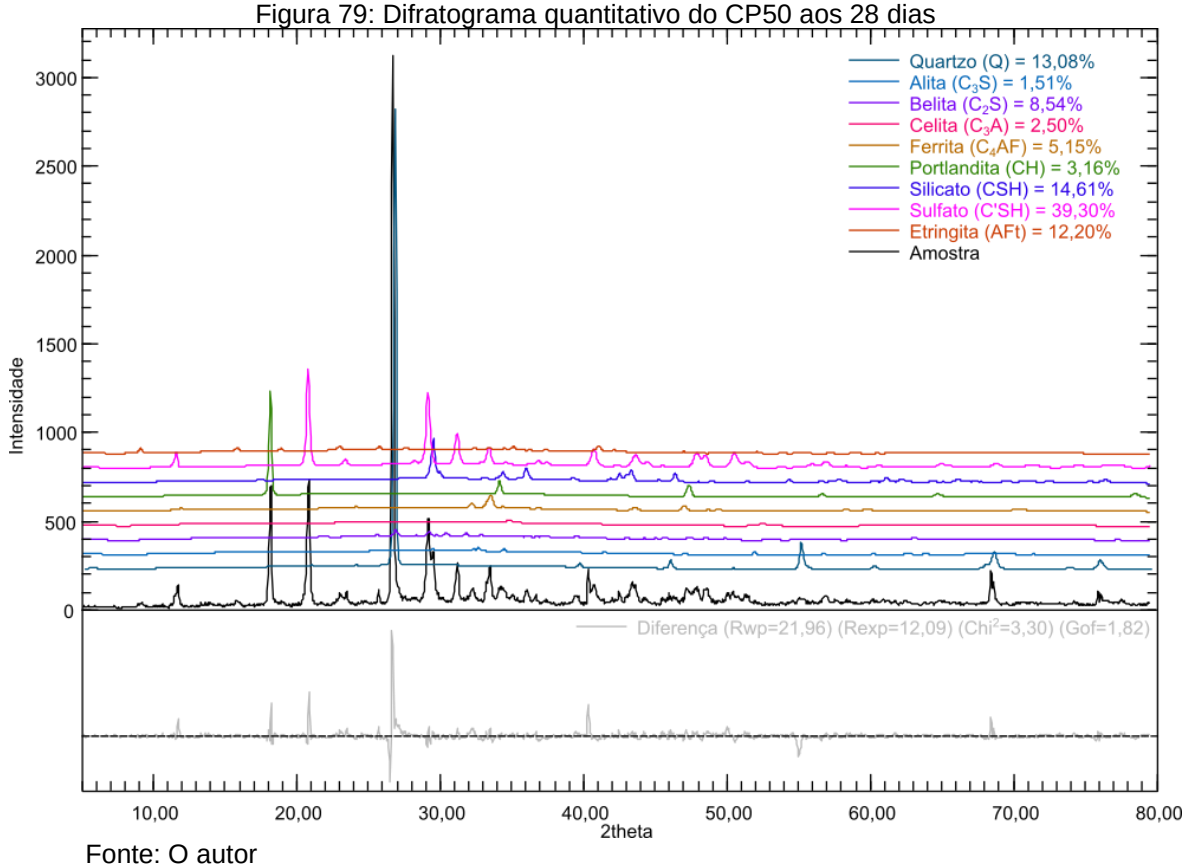
Fonte: O autor

Figura 78: Difratograma quantitativo do CP25 aos 28 dias



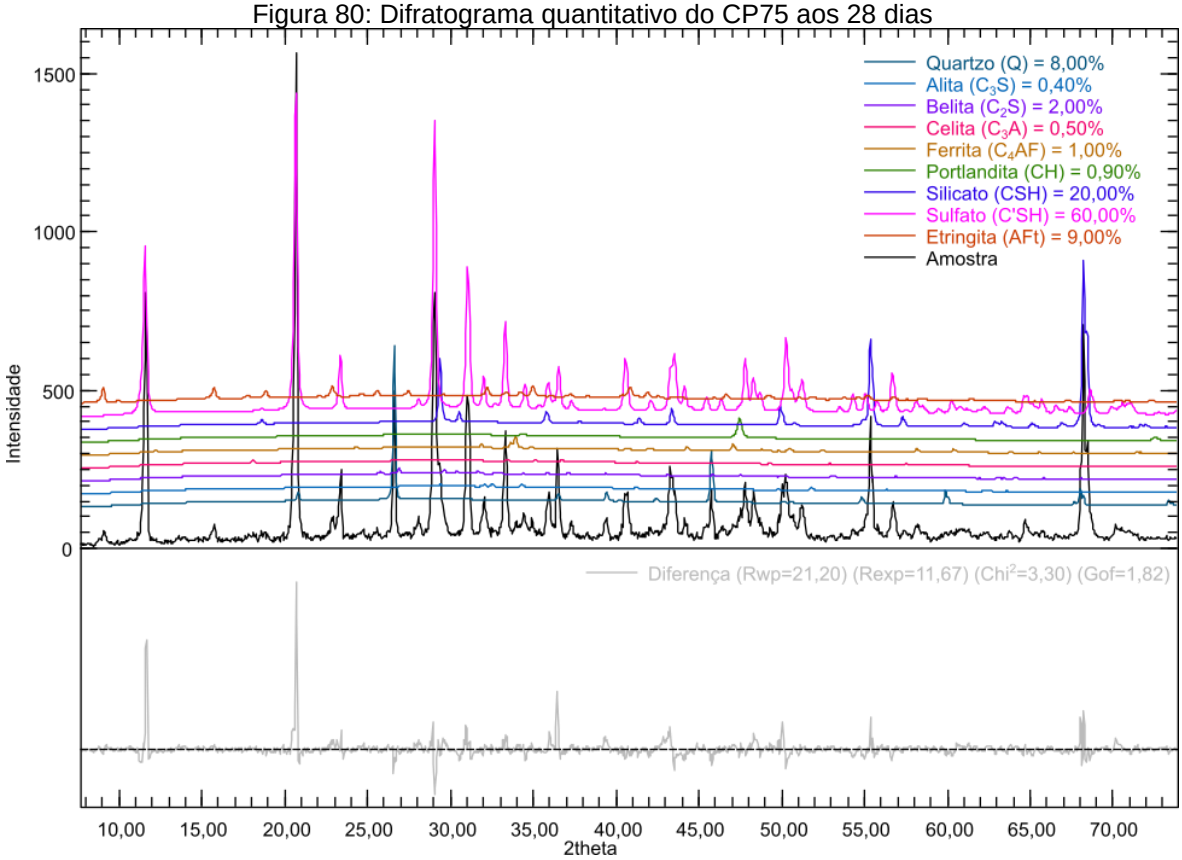
Fonte: O autor

Figura 79: Difratograma quantitativo do CP50 aos 28 dias



Fonte: O autor

Figura 80: Difratograma quantitativo do CP75 aos 28 dias



Fonte: O autor

O resultado quantitativo no refinamento dos dados obtidos no ensaio de difração de raios X pode confirmar o comportamento químico que gerou a diminuição da resistência mecânica dos corpos de prova, foi possível verificar o decréscimo da cristalinidade da fase quartzo (Q) em função do aumento na quantidade de sulfato de cálcio (CS'H).

Pode-se observar a diminuição da fase alita (C_3S), responsável pela resistência das argamassas nas primeiras idades, ao contrário do que foi visto com a fase belita (C_2S).

A fase belita possui menor velocidade de reação, e é responsável pela resistência em maiores idades, neste caso, observou-se a quantidade de belita acumulada, proporcional ao acréscimo do gesso FGD, apontando a causa da diminuição na resistência dos corpos de prova, exceto pelo CP75, que passou para o estado endurecido em poucos minutos após a moldagem.

Pode-se observar também o atraso nas reações da fase celita (C_3A), responsável pela formação dos cristais de aluminatos e ferroaluminatos, e na resistência final do estado sólido.

A diminuição da fase portlandita (CH) pelo consumo dos íons de sulfatos dissolvidos colaborou para a formação de mais fases de sulfato de cálcio.

A etringita (AFt) pode reagir em fases secundárias, formando arranjos na forma de monosulfatos (AFm), que não puderam ser separados pelo programa de refinamento devido à indisponibilidade de fichas cristalográficas atualizadas, podendo explicar a oscilação na quantidade das fases de etringita.

Na Tabela 46 é possível observar o resumo dos dados quantitativos das fases encontradas nas amostras.

Tabela 46: Fases cristalográficas dos CP00, 25, 50 e 75

Fase	CP00	CP25	CP50	CP75
Quartzo	22,00	27,00	13,08	8,00
Alita	4,00	1,70	1,51	0,40
Belita	4,60	7,60	8,54	2,00
Celita	0,40	1,44	2,50	0,50
Ferrita	2,20	2,10	5,15	1,00
Portlandita	16,90	4,30	3,16	0,90
Silicato	18,10	19,86	14,61	20,00
Sulfato	12,50	16,00	39,30	60,00
Etringita	16,00	20,00	12,20	9,00

Fonte: O autor % massa

Os resultados dos ensaios lixiviação e solubilização, realizados pelo laboratório do CEQMA nos cubos de cimento com traços de 00, 25, 50 e 75 % de substituição por FGD, são apresentados nas Tabela 45 e 46.

Tabela 47: Concentração dos íons metálicos no extrato lixiviado

Substância	[C] mg/L CP00	[C] mg/L CP25	[C] mg/L CP50	[C] mg/L CP75	LML (mg/L)
Ag	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	5,00
As	0,13 ± 0,01	0,112 ± 0,008	0,12 ± 0,007	0,12 ± 0,01	1,00
Ba	0,2149 ± 0,0008	0,1628 ± 0,0006	0,1097 ± 0,0004	0,066 ± 0,0005	70,00
Cd	0,1937 ± 0,0009	0,212 ± 0,001	< 0,1	< 0,1	0,50
Cr	< 0,05	< 0,05	0,052 ± 0,008	0,0575 ± 0,003	5,00
Hg	n/d	n/d	n/d	n/d	0,10
Pb	0,140 ± 0,009	0,16 ± 0,01	0,188 ± 0,005	0,2 ± 0,008	1,00
Se	0,076 ± 0,005	0,067 ± 0,002	0,07 ± 0,002	0,07 ± 0,003	1,00

Fonte: O autor.

LML – limite máximo lixiviado segundo NBR10004 - anexo F;
CP – corpo de prova;
n/d – não detectado.

Tabela 48: Concentração dos íons metálicos no extrato solubilizado

Substância	[C] mg/L CP00	[C] mg/L CP25	[C] mg/L CP50	[C] mg/L CP75	LMS (mg/L)
Ag	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,050
Al	0,1016 ± 0,0005	0,10 ± 0,01	0,101 ± 0,006	0,101 ± 0,008	0,200
As	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,010
Ba	0,176 ± 0,0008	0,149 ± 0,001	0,116 ± 0,002	0,1193 ± 0,0005	0,700
Cd	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,005
Cr	0,062 ± 0,001	0,0671 ± 0,0004	0,0551 ± 0,0002	0,0604 ± 0,0004	0,050
Cu	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	2,000
Fe	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,300
Hg	n/d	n/d	n/d	n/d	0,001
Mn	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,100
Na	8,8 ± 0,2	7,1 ± 0,1	80 ± 6	67 ± 5	200,000
Pb	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,010
Se	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,010
Zn	0,0636 ± 0,0007	< 0,05	< 0,05	< 0,05	5,000

Fonte: O autor.

LMS – limite máximo solubilizado segundo NBR10004 - anexo G;
n/d – não detectado.

Os dados do extrato lixiviado do material analisado aguarda liberação do LAQA, por motivos de redução de efetivo.

A classificação prévia do material para o extrato solubilizado indica que o FGD possui características que se enquadram como II-A não perigoso, não inerte, indicando que necessita de tratamento para os limites de cromo.

No laboratório do CEQMA foi possível a obtenção de dados adicionais por realizados ensaios de identificação da concentração de sulfatos, os resultados são apresentados na Tabela 49.

Tabela 49: Concentração de sulfatos no extrato solubilizado

Amostra	Sulfato mg/L
[C] mg/L CP00	666,8 ± 0,07
[C] mg/L CP25	818,5 ± 0,1
[C] mg/L CP50	1137,5 ± 0,3
[C] mg/L CP75	1241,0 ± 0,1

Fonte: O autor.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho, a aplicação do gesso FGD como substituição do cimento Portland comercial em argamassas foi cimento avaliada.

O cimento apresentou características físicas e químicas dentro dos parâmetros requeridos pelas normas em vigor.

As fases encontradas no refinamento pelo método Rietveld, por meio dos dados obtidos em DRX e FRX, apresentaram porcentagens em massa padrões dos cimentos da categoria, encontrados na literatura.

O FGD apresentou índice de perda ao fogo maior que o do cimento, em consequência da matéria orgânica incombusta no carvão mineral, a normativa estipula um valor ≤ 10% em massa, sendo que o FGD apresentou 21%.

O FGD apresentou finura maior em comparação com o cimento. Esta característica justifica o maior tempo de precipitação de outros íons transferidos do FGD para os grãos de cimento contribuindo para o retardamento do tempo de pega das argamassas.

Em contrapartida, o aumento da quantidade de FGD na substituição do cimento em 75% de sua massa, aumentou significativamente o calor de hidratação. Embora não tenha sido quantificado, o aquecimento foi notório quando da execução do amassamento para moldagem, o que possivelmente pode ter contribuído para o endurecimento rápido da argamassa.

O FGD apresentou massa específica relativamente menor, em comparação com a massa específica do cimento. O fator água/cimento requerido para a consistência normal das pastas aumentou com o acréscimo do teor de FGD usado na substituição, em consequência da finura do grão e do aumento da superfície específica do material. Este fato também contribuiu para a elevação do tempo de endurecimento das argamassas.

O ensaio de atividade pozolânica mostrou que o FGD possui alta reatividade com cal. Este fato indicou que o resíduo pode ser utilizado em aplicações como por exemplo, em pré-adensamento de solos, e na utilização em materiais compostos de gesso comercial.

Pôde-se observar no ensaio de reatividade pozolânica do FGD com a cal, que o resultado do desempenho na resistência mecânica ficou próximo à resistência obtida dos corpos de prova com substituição de 50 % e apresentou desempenho na resistência mecânica superior aos corpos de prova substituição de 75 %, na mesma idade de ruptura.

De acordo com a resistência mecânica obtida no ensaio de reatividade com cal, em comparação a substituição de cimento, pode-se concluir que o FGD poderá ser utilizado também em substituição de agregados, a fim de aumentar a resistência mecânica.

Na determinação do índice de desempenho com cimento Portland, observou-se que quanto maior foi a substituição, menor a foi resistência mecânica. Esse fato pode ser atribuído ao aumento do teor de sulfato, o qual colabora na formação de etringita e monosulfato, e fases com maior volume e menor resistência (portlandita), mesmo após o endurecimento da argamassa.

O FGD apresentou propriedades semelhantes aos aditivos retardadores, quando foi utilizado substituindo o cimento o cimento nos corpos de prova com traços de 25 % e 50 % em massa.

Observou-se o aumento dos tempos de início e fim de pega e elevando o tempo de hidratação, atingindo o objetivo proposto, no qual pode-se estabelecer um processo para a utilização do resíduo de FGD em materiais de construção civil não estruturais que requerem maior tempo de trabalhabilidade nas argamassas, e em substituição ao gesso comercial nos processos de produção de artefatos construtivos, como por exemplo, na fabricação de placas de gesso acartonado.

No caso de 75 % em massa de substituição, o FGD apresentou comportamento de aditivo acelerador de pega, ou seja, aumentando o tempo de hidratação e diminuindo o tempo de início e fim de pega das argamassas preparadas com cimento, FGD, areia e água.

Quando o FGD foi adicionado, houve uma distribuição homogênea da hidratação dos grãos de cimento quanto adicionado o FGD para todas as argamassas, sendo possível observar o formato de “ampulheta” na ruptura dos corpos de prova, mostrando que o FGD possui propriedades de hidratação satisfatórias no cimento.

Em todas as substituições de FGD nos corpos de prova, um menor consumo de cimento foi requerido, o que é desejável sob o ponto de vista do

desenvolvimento sustentável e mitigação da poluição ambiental causadora de mudanças climáticas, para as atividades construtivas não estruturais.

Observou-se que o gesso de FGD é similar à gipsita minada em sua composição, e também pode substituir o gesso natural nos processos de fabricação de vários produtos nos quais o gesso natural é utilizado.

Antes de ser utilizado como o gesso comum, o gesso de FGD foi submetido à secagem em estufa, removendo-se sua hidratação, resultando no sulfato hemi-hidrato de cálcio ($CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$), que após a adição de água, foi reidratado, recristalizado e se solidificado.

Pode-se concluir que o FGD pode ser utilizado em substituição ao cimento, os traços ensaiados, como retardador de pega em quantidade de até de 25 %, e como acelerador, na quantidade de 75 %, sendo necessário dosagem dos traços específicos dos materiais dependendo do objetivo de seu emprego.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

No desenvolvimento dos ensaios, passaram a existir aspectos que devem ser melhores estudados e que, devido às limitações do programa experimental, da indisponibilidade de equipamentos e do tempo disponível, não puderam ser avaliados. Assim, são apresentadas sugestões para a acréscimo e continuidade do estudo da utilização do resíduo FGD como adição e/ou substituição em cimentos, são elas:

Como este trabalho visou o cumprimento das normas vigentes, para servir de parâmetro em alterações futuras, poderão ser realizados ensaios com possíveis alterações nos procedimentos previstos.

Assim, se faz necessária a realização de ensaios variando-se a massa do cimento, a massa do FGD, e da areia nas argamassas, equilibrando o fator água/cimento para um estado otimizado, garantindo o aumento da resistência dos corpos de prova, e neutralizando a formação de fases indesejáveis após a cura da argamassa.

Um controle de quantidade entre cimento e FGD deverá ser mais refinado, acrescentando-se aditivos aceleradores para equilibrar as reações ou utilizando-se os cimentos de alto teor de resistência a sulfatos, por não terem maiores adições, assim como o CP-V, o CP-IV e o CP-ARI.

Também é necessário ensaio de outras formas de cura para os corpos de prova, como cura térmica, cura ao ar, além de curas avançadas, como autoclave.

Indica-se a realização de microscopia eletrônica de varredura, para a verificação e medição dos contornos e tamanhos de grãos das fases geradas.

Ensaios de calor de hidratação para o controle e monitoramento da temperatura são importantes para a determinação do volume limite de blocagem para moldagem de grandes volumes com argamassa.

A medição da porosidade dos corpos de prova pode contribuir, junto à microscopia eletrônica de varredura, para a avaliação do índice de permeabilidade em meio aquoso e permeabilidade ao ar das amostras. Esta avaliação demonstraria a capacidade de se aumentar a resistência (direcionando-se as fases desejadas, ou acrescentando aditivos) diminuindo a porosidade dos cilindros.

O uso de aditivos pode equilibrar a reatividade do cimento com a massa de FGD, permitindo que o tempo de cura seja melhor manejado conforme a necessidade, visto que em até 50 % de adição, houve retardamento do tempo de pega, e que a adição de mais de 50 % de FGD aumentou o período de início de pega do cimento.

Poderão ser realizados testes de perda de hidratação diretamente com solos, substituindo os agregados em massa por tipos de solos diferenciados.

Os traços de materiais para as argamassas poderão ser reestudados, e os métodos de cura variados a fim de se atingir o melhor tratamento possível dos materiais, para que seja possível a obtenção de resultados com maior exatidão, e de se obter as quantidades ideais de substituição, de acordo com a utilização final desejada.

Avaliar a utilização do FGD em ativações alcalinas, com traços de solo-silicato, solo-cimento, ou dosagens com clínquer. A adição de gesso nas cimenteiras para o cimento é de 5% de gipsita (TEIXEIRA, 2013), o FGD pode ser utilizado em substituição do material natural, diminuindo-se a degradação na extração, e majorando a eficiência da produção do material cimentício, e por consequência da termoelétrica, além da redução do CO_2.

Utilizar a cinza como agregado, e na utilização em tijolos de solo-cimento, a NBR 8491 (ABNT, 2012) estabelece resistência média precisa ser maior do que 2 MPa, sendo que os resultados para os corpos de prova deste trabalho superaram os resultados estipulados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-NAGEI, H. ***A comparative study for improving the mechanical properties of cold bituminous emulsion mixtures with cement and waste materials***. Construction and Building Materials. No 36. p. 743-748. November 2012. Disponível em: <doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.032>. Acessado em 1 de junho, 2021.

AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION – ACAA. ***Coal Combustion Product Production and Use Survey***; Aurora, CO. August 24. 2007. Disponível em: <https://ccgpjournal.org/>. Acessado em: 28 de março, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ***Standard Test Method for Determination of the Proportion of Phases in Portland Cement and Portland-Cement Clinker Using X-Ray Powder Diffraction Analysis***. International, West Conshohocken, PA: ASTM, 2018. (ASTM C1365).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente***. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. (NBR NM 52).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Agregados para concreto - Especificação***. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. (NBR 7211).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Agregados, determinação da composição granulométrica***. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. (NBR NM 248).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Areia normal ensaio cimento – Especificação***. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. (NBR 7214).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Argamassa e Concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova***. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. (NBR 9479).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Cal virgem e cal hidratada - Análise química***. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. (NBR NM 6473).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo***. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. (NBR NM 18).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol***. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. (NBR NM 13).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Cimento Portland – Análise química - Determinação de resíduo insolúvel***. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. (NBR NM 15).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)***. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. (NBR 11579).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Cimento Portland - Determinação da massa específica***. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. (NBR 16605).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal***. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. (NBR 16606).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega***. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. (NBR 16607).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão***. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. (NBR 7215).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Cimento Portland - Requisitos***. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. (NBR 16697).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Cimento Portland e matérias-primas – Análise química por espectrometria de raios X – Método de ensaio***. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. (NBR 14656).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Concreto - Ensaio compressão corpos de prova cilíndricos***. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. (NBR 5739).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade***. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. (NBR NM 24).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias***. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. (NBR 5751).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias***. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. (NBR 5752).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade***. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. (NBR NM 24).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação. Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico***. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. (NBR NM ISO 3310-1).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido***. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. (NBR 10005).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos***. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. (NBR 10006).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Resíduos sólidos – Classificação***. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. (NBR 10004).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Tijolo de solo-cimento — Requisitos***. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. (NBR 8491).

BENGTSSON S. ***Semi-Dry FGD End Product Utilization – European Experiences***. Presented at the Mega Symposium. Chicago, IL. August 20–23. Paper 219. 2001. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=0D7SBQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR>. Acessado em 20 de março, 2020.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. ***Atlas de energia elétrica do Brasil***. 3ª edição. Brasília, 2008. 236 p. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acessado em: 17 de setembro de, 2018.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. ***Censo demográfico 2010 - 2060***. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>. Acessado em: 4 de outubro, 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia - MME. Energia no Mundo. ***Relatório de indicadores de matrizes energéticas e matrizes elétricas***. Edição de 13 de dezembro, 2017. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acessado em: 4 de outubro, 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia - MME. ***Plano nacional de energia 2030***. Balanço Energético Nacional – BEN. 2007. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br>. Acessado em: 6 de outubro, 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia - MME. ***Síntese do Relatório Final***. Balanço Energético Nacional – BEN. 2017. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br>. Acessado em: 6 de outubro, 2017.

CAILLAHUA, M.C.; MOURA, F. J. ***Technical feasibility for use of FGD gypsum as an additive setting time retarder for Portland cement***. Journal of Materials Ressearch and Technology. 2017; n.297 p 1-8. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.08.005>. Acessado em 9 de setembro, 2018.

CARVALHO, W. C. ***Gerenciamento sustentável das cinzas da combustão de carvão mineral: um estudo de caso de uma termoelétrica em São Luís – MA.*** 2017. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ambiente) – Universidade Federal do Maranhão (UFMA), São Luís.

CASTRO, R. P. V. ***Caracterização de sólidos e desenvolvimento de metodologia analítica para monitoramento de tratamento oxidativo de resíduos sólidos de dessulfurização de fases exaustos de termelétrica a carvão***. 2016. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químico e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CHANDRA, C.; AZIZLI, K. A. M.; AHMAD, Z. A.; SAKAI, E. ***Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in Portland cement***. International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.014>. Acessado em: 7 de maio, 2019.

CIRINO, M. A. G. ***Estudo de pastas de cimento Portland com adições de cinzas de carvão mineral para uso na cimentação de poços de petróleo.*** 2016. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de engenharia estrutural e construção civil, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.

CORÁ, R. ***Aspectos técnicos e ambientais do uso do carvão mineral em caldeiras.*** 2006. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Minas Gerais.

ELECTRIC POWER INSTITUTE – EPRI. ***A review of literature related to the use of spray dryer absorber material - Production, characterization, utilization applications, barriers, and recommendations.*** 2007. EPRI, Palo Alto, CA.

FRANÇA. International Energy Agency. **World Energy Statistics 2018**. Disponível em :<https://www.iea.org>. Acessado em: 23 de outubro, 2018.

FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J.C.; SANTOS, F.S.; WANG, S. ***Coal fly ashes from brazilian power plants: chemical and physical properties and leaching characteristics***. Fly Ash: Chemical Composition, Sources and Potential Environmental Impacts. Chap. 5. Nova Science Publishers, Inc. 2013.

GOBBO, L. ***Os compostos do clínquer Portland: Sua caracterização por difração de raio X e quantificação por refinamento de Rietveld***. 2003. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. ***Determinações químicas e mineralógicas de materiais - FGD, Clínquer e Cimento Portland***. Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC. São Paulo, 2020.

JEWELL R. B.; RATHBONE R. F.; ROBL T. L. ***The fabrication of value added cement products from circulating fluidized bed combustion ash.*** Waste Management International Journal of Integrated World of CoalA sh (WOCA). Northern Kentucky, USA.2007. Disponível em: <http://www.flyash.info>. Acessado em: 13 de setembro, 2018.

KAEFER, Luis Fernando, ***A Evolução do Concreto Armado***. São Paulo, 1998. Disponível em: <http://wwwp.feb.unesp.br/lutt/Concreto%20Protendido/HistoriadoConcreto.pdf > Acesso em 26/06/2016.

KANG, S.; LEE, J.; PARK, S. M.; ALESSI, D. S.; BAEK, K. ***Adsorption characteristics of cesium onto calcium-silicate-hydrate in concrete powder and block***. Journal Chemosphere, Global Change Science. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127494>. Acessado em 31 ago 2020.

KARIM, M. R.; KHANDAKER, M. U.; ASADUZZAMAN, K. H; RAZAK, H. A.; YUSOFF, S. B. ***Radiological risks assessment of building materials ingredients: Palm oil clinker and fuel ash***. Indoor and Built Environment. vol 28 479-491. 2019. Disponível em: < https://doi.org/10.1177%2F1420326X18776705>. Acessado em: 22 de junho, 2019.

KELLER, G.; PUCH, K. H.; NICKELS, R.M. ***Radioactivity of coal ash used in building materials***. Institute for Biophysics, Saar University, Homburg, Germany. VGP Technical Association of Large Power Plant Operators, Essen, Germany. IL9806344.

KNIESS, C. T. ***Utilização do resíduo resultante da combustão de carvão mineral em usinas termelétricas na produção de novos materiais: uma análise a partir de artigos científicos e de patentes***. 2019. Revista de Gestão Social e Ambiental – RGSA. 18 p. Disponível em: <https://rgsa.emnuvens.com.br/rgsa/article/view/1786>. Acessado em: 11 de outubro, 2019.

KORNA, A. H.; FARES, S. S.; EL-RAHMAN, M. A. ***Natural radioactivity levels and radiation hazards for gypsum materials used in Egypt***. Natural Science 6, 5-13. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/ns.2014.61002>. Acessado em: 24 de junho, 2019.

LISNIC, R.; JINGA, S. I. ***Study on current state and future trends of flue gas desulphurization tehnologies: a review***. Romanian Journal of Materials, vol.48, p.83-90. 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/324442137>. Acessado em: 8 de maio, 2019.

MANFROI, E. P. ***Desenvolvimento de aglomerantes ecoeficientes com encapsulamento de metais pesados***. 2014. 303 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MARGON, P. V. ***Influência das cinzas de carvão mineral de termelétricas em argamassas de revestimento: dosagem por curvas granulométricas***. 2002. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Santa Catarina.

MARINKOVIĆ. S.; KOSTIĆ-PULEK, A.; LOGAR, V.; TRIFUNOVIĆ, P. ***Recycling of waste fgd gypsum***. 32nd International Conference of SSCHE. May 23–27, 2005, Tatransk´e Matliare, Slovakia. Disponível em: < doi: 10.13140/2.1.2481.7609>. Acessado em 7 de março, 2021.

MEHMET, K. ***Utilization on fly ash from fluidized combustion of a turkish lignite in production of blended cements.*** 2006. 78 p. Thesis (Master of Science Degree in Chemical Engineering) - The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University. Turkey.

NOGUEIRA, J R. ***Reciclando cinzas: estudo de viabilidade para produção de blocos para a construção civil a partir da cinza volante residual de um reator de leito fluidizado***. 2011. 169 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

MOHAUPT, A. F.; SAGRILLO, V. P. D.; DOS REIS, A S. ***Potencialidades do resíduo do sistema FGD utilizado na dessulfurização de gases de uma coqueira.*** Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração – ABM, 2018. [Trabalho apresentado no IV Congresso Anual da ABM – ABM Week em São Paulo, SP – 02-04 de outubro de 2018)].

PCZIECZEK, A. ***Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneu inservíveis.*** 2017. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville.

PEDROSO, F. ***Concreto: As origens e a evolução do material construtivo Mais usado pelo homem***, Revista Concreto e Construções, IBRACON, n. 53, 2009.

PEREIRA, L. F. S. ***Estudo da reciclagem de cinza volante para produção de agregado sintético utilizando reator de leito fixo.*** 2016. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Belém.

PHOUNGTHONG, K.; HE, P-J.; SHAO, L-M.; ZHANG, H. ***Leachate phytotoxicity of flue gas desulfurization residues from coal-fired power plant***. Environmental Science and Pollution Research. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2207-8>. Acessado em: 5 de maio, 2019.

QIAO X. C.; POON, C. S.; CHEESEMAN C. ***Use of flue gas desulphurisation (FGD) waste and rejected fly ash in waste stabilization/solidification systems.*** Waste Management International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology. 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X05001091?via%3Dihub>. Acessado em: 11 de setembro, 2018.

QINGFA S; YABING J.; MAOYUAN L.; YONGRUI C.; MUH-CHENG M. Wu. ***Development of Dry FGD By-Product Utilization as Building Materials in China***. Lonjing Environment Technology Co. Ltd, Longking Square, No.399, Linhou Road, Xiamen, Fujian, China. 2015 World of Coal Ash (WOCA) Conference in Nasvhille, TN. 2015. Disponível em: <http://www.flyash.info/>. Acessado em: 8 de setembro, 2018.

RAMME, B. W.; THARANIYIL, M. P. ***Coal Combustion Products Utilization Handbook***. We Energies Publication, Wisconsin Electric Power Company. Third Edition, 2013. Milwaukee, Wisconsin, EUA. Disponível em: <www.we-energies.com>. Acessado em 19 de dezembro, 2018.

RATHBONE, R.; RUST, D.; PETERSON, A.; MAHBOUB, K; ROBL, T.***Fluidized Bed Combustion Ash Utilization: CFBC Bottom Ash as a Cementitious Material***. Conventry University and The University of Wisconsin Milwaukee Centre for by-products utilization. Second International Conference on Sustaintable Construction Materials and Technologies. Università Politecnica delle Marche. June 28 - 30. 2010. Ancona, Italy. Disponível em: <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>. Acessado em: 17 de setembro, 2018.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). Secretaria da ciência, inovação de desenvolvimento tecnológico. Fundação de ciência e tecnologia - CIENTEC. ***Quantificação das cinzas de carvão fóssil produzidas no Brasil.*** ROHDE G. M.; MACHADO C. de S. Porto Alegre. Boletim técnico 36 de julho de 2016. Disponível em: <http://www.cientec.rs.gov.br/upload/20160708140547boletim_tecnico_36.pdf>. Acessado em 17 de setembro, 2018.

ROADMAP tecnológico do cimento. ***Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050***. coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. Disponível em: < https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Roadmap_Tecnologico_Cimento_Brasil_Book-1.pdf>. Acessado em 21 de janeiro, 2020.

ROBL, T.; MAHBOUB, K.; STEVENS, W.; RATHBONE, R. ***Fluidized bed combustion ash utilization: CFBC fly ash as a pozzolanic additive to Portland Cement concrete.*** Conventry University and The University of Wisconsin Milwaukee Centre for by-products utilization. Second International Conference on Sustaintable Construction Materials and Technologies. Università Politecnica delle Marche. June 28 - 30. 2010. Ancona, Italy. Disponível em: <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>. Acessado em: 15 de setembro, 2018.

SANTANA de, E. R. R.; SAMPAIO, C. H.; TEIXEIRA, E. C.; ANDRÉANI, P. A.; BENEZET, J. C.; ADAMIEC, P.; BENHASSAINE, A.; SCHUTZ, R. ***Caracterização de cinzas sulfatadas de carvão visando utilização na indústria de cimento - reconstrução mineralógica do carvão de Candiota***. Revista Brasileira de Geociências. p. 220-227. 24 de junho, 2011. Disponível em: <www.sbgeo.org.br>. Acessado em: 19 de setembro, 2018.

SANTANA, R. R. de. ***Caracterização e reconstrução mineralógica de carvão, caulim, calcários e de cinzas sulfatadas geradas à temperatura de um leito fluidizado visando sua aplicação na indústria cimenteira***. 2002. 219 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais – PPGEM. Universiade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SANTOS, B. F. S. ***Dissolução do calcário no processo de dessulfurização de gases de combustão – abordagem experimental e numérica***. 2007. 149 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

SCRIVENER, K. L. ***Backscattered Electron Imaging of Cementitious Microstructures: understanding and quantification***. Cement and Concrete Composites. No 26. p. 935-945. February 2004. Disponível em: <doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.029>. Acessado em 1 de junho, 2021.

SCHMALZ, R. ***Durabilidade de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos: efeito da adição da nanosílica***. 2018. 150 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR.

SIDDIQUE, RAFAT; ***Utilization of coal combustion by-products in sustainable construction materials***. Department of Civil Engineering, Thapar University, Patiala, Punjab, India. Published on Journal Homepage. Resources, Conservation and Recycling. 2010. Disponível em: <dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.06.011>. Acessado em: 20 de setembro, 2018.

SILVA, M.V. da. ***Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água.*** 2011. 132 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

SOUZA, K. de; LÉPY, M.C. ***Determination of the activity of radionuclides contained in volume samples***. LABORATOIRE NATIONAL HENRI BECQUEREL Note technique LNHB/04-33. 2004. Disponível em: <http://www.nucleide.org/Gamma_spectro/NT_04-33_Rapport_LNHB.pdf>. Acessado em: 18 de junho, 2019.

TEIXEIRA, J. M de C. ***Utilização dos produtos da combustão do carvão mineral como aditivos na produção de argamassa para material de revestimento***. 2013. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais) – Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Ceará.

TELESCA, A.; MARROCCOLI, M.; CALABRESE, D.; VALENTI, G. L.; MONTAGNARO, F. ***Flue gas desulfurization gypsum and coal fly ash as basic components of prefabricated building materials***. Waste Management International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.022>. Acessado em: 19 de setembro, 2018.

TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação da substituição parcial de clínquer por cinza de bagaço de cana: redução de emissão de CO_2 e potencial de créditos de carbono. ***Revista IBRACON de Estruturas e Materiais***. v. 5, nº 2 (Abril, 2012). p. 229-251. Instituto Brasileiro do Concreto.

TOLKALIC, R.; MARINKOVIC, S.; TRIFUNOVIC, P.; DEVIC, G.; ZILDZOVIC, S. ***Preliminary Examination of the System Fly Ash-Bottom Ash-Flue Gas Desulphurization Gypsum-Portland Cement-Water for Road Construction.*** Hindawi Publishing Corporation. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/421480>. Acessado em 01 mar 2019.

VENTURINI, L.; NISTI, M. B. ***A natural radioactivity of some brazilian building materials***. Radiation Protection Dosimetry. vol. 71, nº 2, pp. 227-229. Nuclear Technology Publishing. 1997. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/1997/04734.pdf>. Acessado em: 27 de junho, 2019.

VOTORANTIM CIMENTOS S.A. ***Boletim de ensaios de cimento – CP II-F-32 Todas as Obras***. Salto de Pirapora – SP. Acessado em 12 de fevereiro, 2021.

WARD, C. R.; FRENCH, D. ***Determination of glass content and estimation of glass composition in fly ash using quantitative X-ray diffractometry***. Science Direct and Fuel Journal. Vol. 85. 2006. Disponível em: < doi:10.1016/j.fuel.2005.12.026>. Acessado em: 28 de março, 2021.

WEI, J.; CEN, K. ***Empirical assessing cement CO_2 emissions based on China's economic and social development during 2001–2030***. Science of the Total Environment. p. 200-211. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.371>. Acessado em: 1 de maio, 2019.

WITZKE, F. B. ***Propriedades de concretos estruturais contendo cinza volante em substituição parcial ao cimento Portland.*** 2018. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Centro de Ciências Tecnológicas. Joinville.

XU, L.; Wu, K.; Li, N.; Zhou, X.; Wang, P. ***Utilization of flue gas desulfurization gypsum for producing calcium sulfoaluminate cement***. Journal of Cleaner Production, vol.161, p.803-811. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.055>. Acessado em: 20 de maio, 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax (11) 2218-5971
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
http://www.ipen.br

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.