

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Igor Araújo da Silva

Marina Fadel



**AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS DE GESSO HIDRATADO
EM SUBSTITUIÇÃO À GIPSITA NA PRODUÇÃO DE CIMENTO
PORTLAND**

RIO DE JANEIRO

2023

Igor Araújo da Silva

Marina Fadel

AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS DE GESSO HIDRATADO EM SUBSTITUIÇÃO
À GIPSITA NA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientador(es): Carlos Alberto Chagas Jr.
Sara de Carvalho Zago

Rio de Janeiro

2023

CIP - Catalogação na Publicação

S144a Silva, Igor Araújo da
Avaliação do uso de resíduos de gesso hidratado em substituição à gipsita na produção de cimento Portland / Igor Araújo da Silva. -- Rio de Janeiro, 2023.
80 f.

Orientador: Carlos Alberto Chagas Júnior.
Coorientadora: Sara de Carvalho Zago.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Bacharel em Engenharia Química, 2023.

1. Cimento Portland. 2. Gesso. 3. Gipsita. 4. Resíduo. I. Júnior, Carlos Alberto Chagas, orient.
II. Zago, Sara de Carvalho, coorient. III. Título.

Igor Araújo da Silva

Marina Fadel

AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS DE GESSO HIDRATADO EM SUBSTITUIÇÃO
À GIPSITA NA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Química da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Engenheiro
Químico

Aprovado em ____ de _____ de 2023.

Carlos Alberto Chagas Jr., D.Sc., UFRJ

Sara de Carvalho Zago, D.Sc., UFRJ

Marcelo Mendes Viana, D.Sc., UFRJ

Marcel Demarco Oliveira, M.Sc., CSN Cimentos S.A

Rio de Janeiro
2023

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossos sinceros agradecimentos a todas as pessoas e instituições que tornaram este trabalho possível. Em primeiro lugar, expressar nossa gratidão aos nossos orientadores, Carlos Alberto Chagas Jr. e Sara de Carvalho Zago, pela orientação, paciência e apoio constantes ao longo deste processo. Seus conhecimentos e dedicação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Além disso, é com grande apreço que expressamos nossa profunda gratidão à CSN Cimentos e ao Marcel Demarco por seu apoio inestimável durante todo este processo de pesquisa. À CSN Cimentos, agradecemos por fornecer análises cruciais, que enriqueceram significativamente nosso estudo. À orientação e conhecimento valiosos do Marcel, nossa mais sincera gratidão. Sua colaboração foi fundamental para o sucesso deste trabalho, e estamos profundamente agradecidos por sua generosidade e apoio contínuo.

Aos responsáveis pelo Laboratório de Tecnologia do Hidrogênio e ao Laboratório de Análises Térmicas do Departamento de Processos Inorgânicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, agradecemos a disponibilização de equipamentos e recursos para que as análises necessárias neste trabalho fossem realizadas com a devida qualidade.

Aos nossos colegas de curso e amigos, que nos apoiaram nos momentos difíceis e celebraram conosco as conquistas, muito obrigado. Cada palavra de incentivo foi fundamental para nossa motivação.

Nossas famílias merecem um agradecimento especial. A paciência, o amor e o apoio incondicional que nos deram foram essenciais para enfrentar os desafios deste trabalho. Cada palavra de encorajamento nos deu forças para continuar.

Por fim, agradecemos a Universidade Federal do Rio de Janeiro e a todos que a compõem e dedicam seus esforços para manter o ensino superior público de qualidade. Todos os participantes que contribuíram com suas experiências e conhecimentos para nossa pesquisa. Suas informações foram inestimáveis para enriquecer nosso estudo. A todos vocês, nosso mais profundo obrigado. Este trabalho não teria sido possível sem cada um dos contribuidores mencionados.

RESUMO

SILVA, Igor; FADEL, Marina. **AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS DE GESSO HIDRATADO EM SUBSTITUIÇÃO À GIPSITA NA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

O aumento dos resíduos gerados, como consequência do fluxo crescente de produção que caracteriza a nova configuração da sociedade, torna cada vez mais necessária a busca pela sua destinação correta, evitando o aumento de aterros sanitários e deposições irregulares. No que tange a construção civil, a Resolução Nº 307 de 2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente classifica seus resíduos em grupos distintos de acordo com seu potencial de reciclagem e reutilização. Em 2011, a Resolução foi revisada e o resíduo de gesso passou a ser classificado como reciclável, voltando atenção para os esforços que visam diminuir seu descarte. Desta forma, o presente trabalho estudou a viabilidade do uso de resíduos de gesso hidratado em substituição à gipsita na produção de cimento Portland CPIII, um dos principais produtos da própria construção civil. Para isso, foi utilizado um resíduo de gesso em sua forma diidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), obtido ao longo das aulas práticas da disciplina de Processos Inorgânicos Experimental (EQI-472), na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Foram realizadas caracterizações do resíduo por Fluorescência de Raios X, Difratomia de Raios X e Análise Termogravimétrica. Bem como, foram avaliadas comparativamente as propriedades físico-químicas dos cimentos CPIII produzidos com o resíduo de gesso e com gipsita, as quais apresentaram composição química idêntica nas análises de FRX, bem como finura de 2,2% em peneira de 325#. Além disso, a amostra de cimento produzida com o resíduo apresentou uma resistência mecânica média de 10,5MPa na idade de 3 dias, 20,4MPa em 7 dias e 41,3MPa em 28 dias. Dessa forma, verificou-se que o resíduo de gesso hidratado pode ser utilizado como matéria-prima alternativa na produção do cimento Portland tipo CPIII, mantendo suas principais características e atendendo às especificações normativas vigentes.

Palavras-chave: resíduo de gesso;cimento Portland;reutilização.

ABSTRACT

SILVA, Igor; FADEL, Marina. **AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS DE GESSO HIDRATADO EM SUBSTITUIÇÃO A GIPSITA NA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND** . Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

The increase in waste generated as a result of the growing flow of production that characterizes the new configuration of society makes it even more necessary to find a correct destination for the residues, avoiding the increase in landfills and irregular deposits. Regarding civil construction, National Environment Council's Resolution No. 307 of 2002 classifies its waste into different groups according to its potential for recycling and reuse. In 2011, the Resolution was revised and plaster waste was classified as recyclable, focusing attention on efforts to reduce its disposal. This work therefore studied the feasibility of using hydrated plaster waste to replace gypsum in the production of CPIII Portland cement, one of the main products in the construction industry. For this purpose, it was used plaster waste in its dihydrated form ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), obtained during practical classes in the Experimental Inorganic Processes course (EQI-472) at the Federal University of Rio de Janeiro. The residue was characterized by X-ray fluorescence, X-ray diffractometry and thermogravimetric analysis. The physicochemical properties of CPIII cement produced with plaster waste and with gypsum were also comparatively assessed, which showed identical chemical composition in X-ray fluorescence analyses, as well as a fineness of 2.2% on a 325# sieve. Furthermore, the cement sample produced with the plaster waste showed an average mechanical strength of 10.5MPa at 3 days, 20.4MPa at 7 days and 41.3MPa at 28 days. Thus, it was found that hydrated plaster waste can be used as an alternative raw material in the production of CPIII type Portland cement, maintaining its main characteristics and complying with current regulatory specifications.

Keywords: plaster waste;Portland cement;reuse.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Despacho brasileiro de cimento Portland por região.
- Figura 2 – Variações do mineral gipsita.
- Figura 3 – Breve resumo das aplicações da gipsita e do gesso.
- Figura 4 – Representação da estrutura cristalina da gipsita.
- Figura 5 – Principais países produtores de gesso.
- Figura 6 – Importação e exportação brasileira de gesso.
- Figura 7 – Etapas que compreendem a produção de gesso beta.
- Figura 8 – Processo de desidratação da gipsita.
- Figura 9 – Fontes de resíduos de gesso na construção civil.
- Figura 10 – Fluxograma de reciclagem de gesso.
- Figura 11 – Transformações ocorridas durante a queima da farinha crua para produção de clínquer em função do tempo de residência e temperatura.
- Figura 12 – Diagrama do processo de produção do cimento Portland.
- Figura 13 – Formação dos produtos de hidratação na pasta de cimento Portland ao longo do tempo.
- Figura 14 – Resíduo de gesso hidratado cedido pela UFRJ.
- Figura 15 – Britador de rolos.
- Figura 16 – Diminuição da granulometria ao longo de britagens consecutivas.
- Figura 17 – Peneiras com retidos da amostra.
- Figura 18 – Distribuição granulométrica das amostras de resíduos de gesso
- Figura 19 – Resultado do DRX da amostra de resíduo de gesso hidratado.
- Figura 20 – TG realizado em amostra seca de resíduo de gesso reciclado.
- Figura 21 – Gipsita utilizada pela CSN.
- Figura 22 – Clínquer utilizado pela CSN.
- Figura 23 – Resultado da caracterização química das amostras de cimento CPIII 32 RS produzidas.
- Figura 24 – Resultados da determinação da (A) da área específica Blaine e (B) finura em peneira 325#
- Figura 25 – Tempo de início de fim de pega das amostras de cimento CPIII 32 RS produzidas.
- Figura 26 – Resultados de análise de resistência à compressão axial das amostras de cimento CPIII 32 RS produzidas.
- Figura 27 – Planta 3D: Processo produtivo do cimento.

Figura 28 – Custo das matérias-primas do cimento Portland por tonelada adquirida e para suprir a produção diária na unidade CSN em Volta Redonda.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Terminologia e características das fases mineralógicas dos materiais derivados de sulfato de cálcio.
- Tabela 2 – Composição teórica dos minerais de sulfato de cálcio.
- Tabela 3 – Principais características físico-químicas da gipsita.
- Tabela 4 – Especificações do tempo de pega do gesso de fundição e de revestimento.
- Tabela 5 – Unidades de ATTs no Brasil.
- Tabela 6 – Designação normalizada segundo a NBR 16697.
- Tabela 7 – Componentes mineralógicos do clínquer de cimento Portland.
- Tabela 8 – Parâmetros típicos utilizados na indústria de cimento para controle da composição da farinha de clínquer.
- Tabela 9 – Receitas Base Seca.
- Tabela 10 – Condições de processo para a dosagem do cimento.
- Tabela 11 – Composição química da amostra de resíduo de gesso hidratado obtida por FRX.
- Tabela 12 – Composição química da gipsita utilizada pela CSN.
- Tabela 13 – Composição Química do Clínquer e da Escória de Alto Forno Utilizados.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDRYWALL	Associação Brasileira do Drywall
AFm	Monossulfoaluminato de Cálcio
AFt	Etringita
APL	Arranjo Produtivo Local
ATT	Áreas de Transbordo e Triagem
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
DPI	Departamento de Processos Inorgânicos
DRX	Difratometria de Raios-X
EQ	Escola de Química
FRX	Fluorescência de Raios-X
FSC	Fator de Saturação da Cal
ICDD	Internacional Center for Diffraction Data
ICMS	Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias
IEA	Agência Internacional de Energia
MA	Módulo de Alumina
MME	Ministério de Minas e Energia
MS	Módulo de Sílica
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RSCC	Resíduos Sólidos da Construção Civil
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
TG	Análise Termogravimétrica
UPV	Usina Presidente Vargas

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	14
1.1.JUSTIFICATIVA	16
1.2.OBJETIVOS.....	18
1.2.1. Objetivos específicos.....	18
1.3.ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1.GIPSITA.....	20
2.1.1.Mineralogia	23
2.1.2.As reservas no Brasil	25
2.2.GESSO	26
2.2.1.O mercado de gesso	27
2.2.2.Gesso beta.....	29
2.2.3.A Produção de gesso tipo beta	30
2.2.4.Gesso reciclado.....	34
2.2.4.1.A utilização do gesso reciclado	36
2.3.CIMENTO PORTLAND.....	40
2.3.1.Processo produtivo do cimento.....	42
2.3.2.Hidratação do cimento	46
2.3.2.1.Hidratação dos aluminatos	46
2.3.2.2.Hidratação dos silicatos	48
3.METODOLOGIA.....	50
3.1.BENEFICIAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE GESSO HIDRATADO.....	50
3.1.1.O Resíduo de gesso hidratado	50
3.1.2.Preparo das amostras de resíduo de gesso hidratado	51
3.1.3.Análise granulométrica	52
3.1.4.Caracterização físico-química das amostras de resíduo de gesso hidratado	53
3.1.4.1. Composição Química – fluorescência de raios-X	53
3.1.4.2. Composição Mineralógica – difratometria de raios-X	54
3.1.4.3. Análise Termogravimétrica	54
3.2.PREPARO DAS FORMULAÇÕES DE CIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E MECÂNICA.....	54

3.2.1.Preparo das formulações de cimento Portland CPIII.....	54
3.2.2.Caracterizações das formulações de cimento Portland CPIII	55
3.2.2.1.Análise química	55
3.2.2.2.Finura.....	56
3.2.2.3.Pasta de consistência normal e tempos de pega	56
3.2.2.4.Expansibilidade	56
3.2.2.5.Resistência à compressão axial.....	56
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1.CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO RESÍDUO DE GESSO HIDRATADO	57
4.1.1.Análise do tamanho de partícula.....	57
4.1.2. Composição química – fluorescência de raios-x	58
4.1.3. Composição mineralógica – difratometria de raios-x	58
4.1.4. Análise termogravimétrica	59
4.2.CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DO CIMENTO CPIII.....	60
4.2.1. Gipsita.....	60
4.2.2. Clínquer portland	61
4.2.3. Escória de alto forno	62
4.3.CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	62
4.3.1. Análise química.....	63
4.3.2. Finura e superfície específica.....	64
4.3.3. Tempo de pega	64
4.3.4.Expansibilidade.....	65
4.3.5. Resistência à compressão axial.....	65
4.4.DADOS DA VISITA TÉCNICA	66
4.4.1. A CSN Cimentos	67
4.4.2. O processo produtivo	68
4.4.3. Experiência na utilização de resíduos de gesso hidratado	71
5.CONCLUSÕES	73
6.SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	75
7.REFERÊNCIAS	76

1. INTRODUÇÃO

O avanço técnico-científico observado, principalmente, a partir do século XX promoveu uma nova configuração da sociedade. Para isto ocorrer de forma dinâmica, desencadeou um fluxo crescente de produção em que os produtos possuem vida útil definida e que irão tornar-se resíduos ao final, junto com os demais rejeitos acumulados durante seu processo de criação e utilização (VANDERLEY, 2017). Dessa forma, a busca por desenvolver uma destinação apropriada para os resíduos gerados torna-se imprescindível, uma vez que os aterros sanitários ocupam cada vez mais espaços, assim como as disposições não-regulamentadas, principalmente nos grandes centros urbanos (AIRES, 2015).

A indústria cimenteira promove uma alta movimentação de recursos, materiais e, conseqüentemente, resíduos devido a sua grande proporção de mercadoria produzida e importância no mercado nacional. A solidez deste mercado fica evidente uma vez que, mesmo com a economia brasileira em decaimento, este setor manteve seus resultados positivos (SNIC, 2021).

Corroborando o exposto, pode-se citar o fato de que em 2020, durante a pandemia de Covid-19, a atividade da construção civil foi considerada essencial, mantendo-se as lojas de materiais de construção abertas durante o *lockdown*. Além disso, em 2021, um ano após o início deste cenário, a economia brasileira caracterizava-se por um elevado nível de desemprego, pela lenta retomada do mercado de trabalho, pelo endividamento das famílias, juros elevados e pressão inflacionária. Somado a isso, o interesse dos brasileiros estava voltado para serviços que haviam sido suspensos em 2020, visando compensar a ausência que deixaram durante o período de isolamento social, como restaurantes, viagens e entretenimento no geral, e a construção não era um destes. Por conseguinte, a aquisição de cimento pela autoconstrução diminuiu. No entanto, mesmo neste momento, seu consumo total apresentou crescimento, devido a sua participação no mercado imobiliário. Dessa forma, apesar da economia do país abalada, as vendas de cimento em 2021 somaram 64,9 milhões de toneladas, uma alta de 6,8% concretizando o terceiro ano seguido de crescimento (SNIC, 2021).

Vale ressaltar que a produção do cimento na construção civil está intimamente atrelada ao desenvolvimento socio-urbano de um país, especialmente no que tange o desenvolvimento da infraestrutura urbana, como construção de pontes, edifícios, barragens e vias. Este fator pode ser tanto resultado do crescimento econômico de uma nação, quanto em função do quão

populosa a nação se mostra, como observado entre os maiores produtores mundiais de cimento, China e Índia (IEA, 2022).

Destacada a importância e forte relevância da produção de cimento na sociedade em termos econômicos, é importante salientar o grande impacto que a indústria de cimento exerce em termos ambientais. Isto pois, estima-se que o setor da construção civil e suas atividades sejam alguns dos principais responsáveis pela extração de recursos no planeta (VANDERLEY, 2017).

A produção de cimento Portland é responsável pelo consumo de altos teores de minerais, principalmente de calcário e minerais argilosos usados na produção do clínquer, seu principal componente. Por outro lado, este processo também se destaca pela capacidade de incorporar variedades de resíduos e coprodutos oriundos de outros setores da indústria na sua composição, tais como as escórias de alto-forno, que consistem em agregados siderúrgicos; cinzas volantes, geradas durante a queima do carvão mineral em centrais termoelétricas; e os materiais carbonáticos, resíduos oriundos da extração de rochas calcárias (ROADMAP, 2019).

Há diferentes formulações possíveis dependendo da finalidade para qual o cimento está sendo produzido. No entanto, há uma matéria-prima comum a todos cimentos normalizados, ou seja, seu uso é obrigatório em todos os tipos produzidos. Esta matéria-prima consiste no sulfato de cálcio, que pode ser empregado nas formas diidratada e hemidratada, conferindo ao cimento tempo hábil para sua conformação quando misturado a água (ABNT, 2018; ABCP, 2002; ROADMAP, 2019).

O sulfato de cálcio, usado na manufatura do cimento, costuma ser de origem natural, na forma de gipsita. No entanto, também podem ser empregados resíduos oriundos da indústria da construção civil, denominado resíduo de gesso hidratado, e da indústria de fertilizantes fosfatados, o fosfogesso, o que pode auxiliar na redução da quantidade de resíduos enviados para aterros e impulsionar a criação de novas tecnologias para o seu uso. Além disso, quando descartado indevidamente, os resíduos de gesso hidratados podem gerar gás sulfídrico, uma substância tóxica e inflamável, dentre outros efeitos nocivos ao meio ambiente (ROADMAP, 2019; ANTUNES *et al.*, 2019).

Neste sentido, verifica-se que algumas iniciativas vêm sendo realizadas para impulsionar a reutilização dos resíduos de gesso hidratados, tais como a alteração da Resolução Nº 307 de 2002 do Conselho Nacional do Meio ambiente (CONAMA), na qual são definidos critérios e a classificação dos resíduos sólidos da construção civil (RSCC) em 4

classes de acordo com seu potencial de reciclagem e reutilização. Em 2011, o gesso passou a ser classificado por este documento como reciclável, deixando sua categorização anterior a qual sugeria não haver tecnologias e aplicações para a reciclagem e reutilização de seus resíduos. Tal medida pode reduzir o volume de resíduos de gesso enviados para os aterros, mesmo para aterros de resíduos inertes, de modo que técnicas de reciclagem vêm sendo incentivadas, permitindo o reaproveitamento do material.

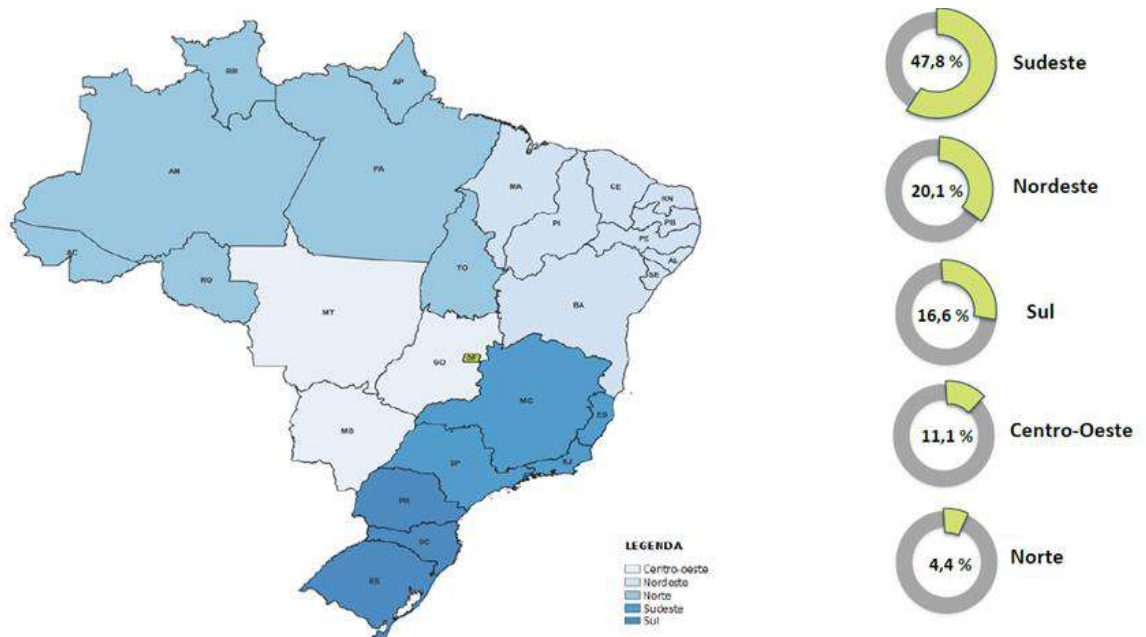
Frente a sua importância tecnológica e às questões ambientais envolvidas, destaca-se que gerir, reduzir e reaproveitar os resíduos de gesso devem ser preocupações relevantes, desde a fase de planejamento na construção civil até o momento posterior à demolição, através da busca por técnicas de reutilização do resíduo. Consequentemente, estudos que transformem esta preocupação em soluções economicamente atrativas para empresas são indispensáveis.

1.1. JUSTIFICATIVA

Dentre os principais empecilhos ao desempenho financeiro da indústria cimenteira estão os custos produtivos, como a majoração de preços dos principais insumos, por exemplo a energia térmica e elétrica, refratários, embalagens e fretes (SNIC, 2021).

Segundo dados de 2021 do Ministério de Minas e Energia (MME), as maiores quantidades de cimento Portland são despachadas a partir da região Sudeste, ou seja, esta é a principal região produtora de cimento do Brasil. Por outro lado, mais de 90% da produção nacional de uma das matérias-primas fundamentais neste processo, a gipsita, encontra-se no polo gesseiro do Araripe, em Pernambuco, seguido pelos estados do Maranhão, Ceará e Tocantins, todos localizados nas regiões Nordeste ou Norte do país (MME, 2020). A Figura 1 ilustra a proporção do despacho de cimento Portland por região.

Figura 1 – Despacho brasileiro de cimento Portland por região.



Fonte: MME (2021).

Apesar de já consolidada, esta configuração nacional no que diz respeito ao produto cimento e sua respectiva matéria-prima não é vantajosa nem produtiva. Isto porque, mesmo pagando um Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias (ICMS) diferenciado sobre o frete, o custo do transporte da gipsita chega a ser mais caro que a própria matéria-prima para as indústrias na região Sudeste (RAMOS, 2021). O principal motivo é o fato de que, principalmente, o polo gesseiro do Araripe – maior produtor do insumo no Brasil – é dependente do modal rodoviário para escoar sua produção (DANTAS, 2023).

Além do viés econômico relacionado aos altos custos de frete para levar essa matéria-prima do Nordeste à região Sudeste, existe uma questão ambiental motivadora para o uso de resíduos de gesso na indústria do cimento. Os resíduos de gesso hidratado contêm enxofre na sua composição química e, por serem ligeiramente solúveis em água, seus resíduos são nocivos se lançados diretamente na natureza, sendo necessários cuidados especiais em caso de descarte (RIBEIRO, 2006).

Por estas razões, o presente trabalho estudou a reutilização de um resíduo de gesso hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) gerado em aulas experimentais realizadas na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), na produção de cimento Portland tipo CPIII. Assim, com a possibilidade de reutilizar resíduos de gesso de localidades mais próximas às regiões produtoras de cimento, seriam reduzidos tanto custos concernentes ao transporte da gipsita, à

disposição final em aterros, como impactos ambientais vinculados à extração mineral, ao descarte inadequado e à geração de energia térmica para calcinação.

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a reutilização de resíduos de gesso hidratado, gerados nas aulas práticas da disciplina de Processos Inorgânicos Experimental (EQI-472), substituindo em sua totalidade o uso da gipsita natural, oriunda do Polo gesseiro de Araripe, na produção do cimento Portland do tipo CPIII, produzido pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN).

1.2.1. Objetivos específicos

- Coletar e preparar amostras de resíduos de gesso hidratado segundo exigência para a produção de cimento;
- Analisar as características físico-químicas do resíduo de gesso;
- Produzir duas formulações de cimento Portland CPIII, uma com gipsita e uma com o resíduo de gesso hidratado como substituto integral do mineral;
- Avaliar as propriedades físico-químicas das pastas dos cimentos produzidos;
- Avaliar as propriedades mecânicas das argamassas produzidas com as diferentes formulações de cimento.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado a fim de apresentar uma ampla revisão da literatura concernente a geração e reutilização de resíduos de gesso hidratado pela indústria, bem como expor informações obtidas por uma visita técnica a uma das mais importantes indústrias nacionais de cimento; seguida da apresentação do estudo experimental de reutilização do resíduo de gesso na produção do cimento Portland.

Para tal, o trabalho foi estruturado da seguinte forma:

Item 1 – INTRODUÇÃO do tema com a apresentação dos objetivos do trabalho;

Item 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, onde é feita a contextualização sobre a produção do cimento, focada nas principais propriedades e participação da gipsita neste processo, bem como as características e possibilidades de reutilização de resíduos de gesso hidratado;

Item 3 – METODOLOGIA, onde é apresentada a forma como os dados foram coletados para a discussão e as premissas consideradas;

Item 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES, onde são abordados os principais pontos obtidos na pesquisa, e no qual é feita a análise argumentativa dos dados apresentados, expondo as limitações encontradas;

Item 5 – CONCLUSÕES, nesse item são apresentadas as reflexões a partir do entendimento de todas as informações apresentadas ao longo do presente trabalho;

Item 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS, apresenta recomendações para pesquisas adicionais que podem ser exploradas com base nos resultados e limitações do estudo atual, direcionando o desenvolvimento de trabalhos acadêmicos subsequentes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. GIPSITA

O gesso é um importante aglomerante obtido por meio do mineral denominado gipsita. A gipsita é um sulfato de cálcio diidratado, com fórmula química $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ obtida a partir da extração da rocha sedimentar gipso (AGUIAR, 2004). Em sua composição, é possível encontrar outros minerais em menor quantidade, na forma de impureza, como anidrita, dolomita, calcita, halita, quartzo e argila, que influenciarão suas características e propriedades (BARBOSA *et al.*, 2014; GAMA, 2015). Algumas das variações da gipsita são apresentadas na Figura 2.

Figura 2 – Variações do mineral gipsita.



Fonte: IGC-USP (2023).

A gipsita apresenta notada capacidade de desidratar e reidratar facilmente à temperatura relativamente baixa. Esta característica torna interessante a reciclagem do resíduo oriundo do beneficiamento mineral e da produção do aglomerante que também apresenta aplicabilidade industrial (GAMA, 2015).

A forma natural da gipsita é usada na indústria cimenteira na fabricação de cimento Portland, bem como na agricultura – na forma de gesso agrícola (gipsita moída) – que além de atuar como dessalinizador e condicionador de solos, tornando-os mais permeáveis e aerados, consiste em um fertilizante, como fonte de cálcio e enxofre. Já a forma calcinada é utilizada predominantemente na construção civil, pois dá origem ao gesso (GAMA, 2015).

A gipsita, juntamente com o gesso obtido a partir da mesma, possuem evidências que revelam mais de 9.000 anos de utilização, e remontam 8.000 anos A.C. com o emprego do

mineral para a produção de argamassas. Na Figura 3 são apresentadas algumas destas principais aplicações (GAMA, 2015).

Figura 3 – Breve resumo das aplicações da gipsita e do gesso.



Fonte: elaboração própria.

Será observado que muitas terminologias estão vinculadas a gipsita ou aos produtos obtidos a partir dela. Por esta razão, na Tabela 1 são exibidas diferentes nomenclaturas que serão utilizadas neste trabalho, isto pois há muitos registros na literatura que utilizam algumas dessas nomenclaturas como sinônimos quando não o são.

Tabela 1 – Terminologia e características das fases mineralógicas dos materiais derivados de sulfato de cálcio.

Designação das fases mineralógicas	Fórmula química teórica	Estrutura cristalina	Nome mineralógico, formas e simbologia	Temperatura de produção industrial (°C)	Estabilidade termodinâmica (°C)	Água combinada (%)	Massa específica (kg/dm ³)	Massa molecular (g/mol)	Solubilidade (g/L de água à 20°C)
Sulfato de cálcio diidratado; diidrato; diidrato sintético residual ou industrial; DH alfa ou beta; “gesso natural”	CaSO ₄ .2H ₂ O	Monocíclica	Gipsita	< 40	< 40	20,9	2,31	172,17	2,1
Sulfato de cálcio hemidratado; hemidrato; hemidrato beta; gesso beta; gesso comum; sintético residual ou industrial; HH – beta	CaSO ₄ .1/2H ₂ O	Romboédrica	Bassanita	120 – 180, em atmosfera seca	Metaestável em ar saturado com vapor	6,21	2,61 – 2,63	145,15	8,8
Gesso odontológico; gesso alfa; sulfato de cálcio hemidratado alfa; hemidrato alfa; gesso autoclavado; HH – alfa	CaSO ₄ .1/2H ₂ O	Romboédrica	Bassanita	80 – 180, em atmosfera úmida sob pressão	Metaestável em ar saturado com vapor	6,21	2,57	145,15	6,7
Anidrita III; anidrita solúvel; ANIII – beta; ANIII - alfa	0,06 – 0,11CaSO ₄	Hexagonal	ANIII – beta; ANIII ⁺ – beta; ANIII – alfa; γ CaSO ₄	290 (v. seca) 110 (v. úmida)	Metaestável em ar saturado com vapor	0,06 – 0,11	2,58	136,14	6,7 – 8,8
Anidrita II; anidrita; anidrita natural; anidrita sintética; anidrita calcinada; ANII – beta; ANII – alfa	CaSO ₄	Rômbica	ANII – s lentamente solúvel; ANII – insolúvel; ANII – <i>Estrichgips</i> ; β CaSO ₄	< 500 500 – 700 >700	40 – 1180	0	2,93 – 2,97	136,14	2,7
Anidrita I; anidrita de alta temperatura; ANI – beta; ANI	CaSO ₄	Cúbica	ANI; α CaSO ₄	Não é comercial	1180	0	-	136,14	-

Fonte: adaptado de Aguiar (2004).

2.1.1. Mineralogia

A gipsita possui sua origem em depósitos de rochas sedimentares do tipo evaporito, que por sua vez são formados a partir da precipitação do sulfato de cálcio contido nas águas marinhas após processo de evaporação, conseqüentemente, concentrando os sais e formando o mineral. Tal processo é favorecido em ambiente quente e seco (BALTAR *et al.*, 2005; PINHEIRO, 2011).

Conforme visto, a rocha sedimentar que contém a gipsita é o gipso. Junto a rocha, pode-se encontrar anidrita e impurezas, a maior parte sendo argilominerais, calcita, dolomita e material orgânico (BARBOSA *et al.*, 2014; GAMA, 2015). Assim como a gipsita é o sulfato de cálcio diidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), a anidrita é a ocorrência do sulfato de cálcio na forma anidra (CaSO_4), enquanto a forma hemidratada, que raramente ocorre na natureza, é denominada bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). Já a calcita (CaCO_3) e a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) são minerais carbonáticos (BALTAR *et al.*, 2005).

Dessa forma, é comum as jazidas apresentarem camadas que intercalam a presença de argila, carbonatos, sílex e outros materiais evaporíticos, como halita e anidrita. Em Pernambuco – onde concentram-se as minas exploradoras da gipsita – as jazidas estão inseridas em domínios da Formação Santana, do Cretáceo Inferior, formada por siltitos, margas, calcários, folhelhos e intercalações de gipsita (BALTAR *et al.*, 2005).

Como a gipsita é instável e pode desidratar e reidratar-se facilmente, a partir da sua formação inicial é possível que ocorram transformações naturais em sua composição e textura caso a pressão ou temperatura mudem. Por exemplo, a gipsita acumulada na superfície terrestre pode desidratar caso seja levada a uma determinada profundidade, transformando-se em anidrita. Da mesma forma, caso a anidrita seja levada mais próximo a superfície, devido a fenômenos geológicos, como movimento tectônico ou erosão, ela pode reidratar-se e retornar à forma de gipsita, que será denominada gipsita secundária e possuirá formas cristalinas distintas da original, porém com a mesma composição química (BALTAR *et al.*, 2005).

Em relação à composição química, a gipsita é formada majoritariamente por óxido sulfúrico, seguido de óxido de cálcio e água, conforme a proporção teórica apresentada na Tabela 2 para os minerais de sulfato de cálcio.

Tabela 2 – Composição teórica dos minerais de sulfato de cálcio.

Mineral	Fórmula química	Composição		
		SO ₃	CaO	H ₂ O
Gipsita	CaSO ₄ .2H ₂ O	46,6	32,5	20,9
Bassanita	CaSO ₄ .1/2H ₂ O	55,2	38,6	6,2
Anidrita	CaSO ₄	58,81	41,2	0,0

Fonte: Baltar *et al.* (2005).

Quanto às suas propriedades físicas, a cor depende das impurezas presentes nos cristais, sendo no geral incolor, branca, cinza ou amarronzada. Apresenta brilho vítreo, nacarado ou sedoso, baixa dureza (índice 2 na Escala Mohs), densidade relativa ao redor de 2,3 g/L, a 25 °C; hábito prismático, clivagem em quatro direções, e a morfologia e tamanho dos cristais dependente das condições e ambientes de formação (Baltar *et al.*, 2005). Estas propriedades foram resumidas na Tabela 3.

Tabela 3 – Principais características físico-químicas da gipsita.

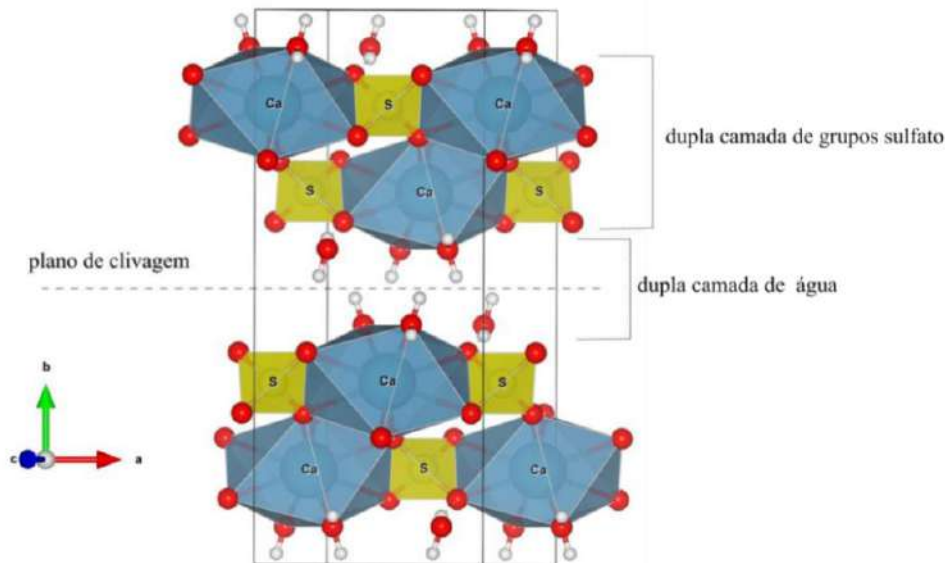
Classificação	Sulfato	Fórmula Química	CaSO ₄ .2H ₂ O
Dureza	2 Mohs	Brilho	Vítreo, nacarado, sedoso
Cor	Vítreo, nacarado, sedoso	Composição	CaO: 32,6%; SO ₃ : 46,5%; H ₂ O: 20,9%
Cristalografia	Monocíclico	Classe	2/m
Hábito	Maciça, laminada (selenita), maciça granular (alabastro), fibroso (espato setinado), as geminações são relativamente comuns	Clivagem	Perfeita em {010}, laminar em {100}, com superfície concóide {011}
Fratura	Fibrosa	Densidade Relativa	2,32 g/cm ³
Propriedades Ópticas	Biaxial	Propriedades Diagnósticas	Na amostra de mão, dureza e clivagem
Associação	Halita, anidrita, dolomita, calcita, enxofre, pirita e quartzo	Ocorrência	Frequentemente interestratificado com calcários e folhelhos, como camada subjacente à sal-gema. Também em corpos lenticulares ou cristais disseminados. Formado pela alteração de anidrita. Encontrado também em regiões vulcânicas ou recristalizada em veios hidrotermais

Fonte: IGC – USP (2023).

Em relação à sua estrutura, a gipsita consiste em um mineral de cristais bem formados, que cristaliza no sistema monocíclico. A Figura 4 ilustra o arranjo estrutural, onde os átomos de cálcio são representados na cor azul, os de enxofre na cor amarela, hidrogênio em branco e

oxigênio em vermelho. Dessa forma, é possível observar que sua estrutura consiste em camadas alternadas de grupos de sulfato de cálcio separados por uma camada dupla de moléculas de água, ligadas aos sulfatos por ligações de hidrogênio, o que resulta na facilidade com que as moléculas de água são removidas da estrutura do mineral durante a calcinação (SANTOS, 2017).

Figura 4 – Representação da estrutura cristalina da gipsita.



Fonte: Santos (2017).

2.1.2. As reservas no Brasil

No Brasil, há uma abundância de jazidas de gipsita, tornando-o o maior produtor do mineral na América do Sul com uma produção que representa 2,2% da proporção mundial (MME, 2021).

Quantitativamente, a maior parte das reservas brasileiras está nas regiões Nordeste e Norte, sendo 44% na Bahia, 31% no Pará, 18% no Pernambuco e o restante no Maranhão, Ceará, Piauí, Tocantins e Amazonas (SOBRINHO *et al.*, 2012). Já qualitativamente, as melhores reservas – ou seja, as que apresentam melhor aproveitamento econômico devido a boas condições de mineração, qualidade e pureza do minério – estão situadas na Bacia do Araripe, uma bacia sedimentar que abrange os estados de Pernambuco, Piauí e Ceará. Por mais que existam maiores quantidades de reservas de gipsita em outros estados do país, o polo gesso do Araripe é responsável por mais de 90% da produção de gesso brasileira, por este apresentar o melhor aproveitamento (BARBOSA *et al.*, 2014; MME, 2021).

O Polo Gesseiro de Araripe, em Pernambuco, reúne em um só *cluster* aproximadamente 800 empresas, sendo 140 indústrias de calcinação, 49 mineradoras e cerca de 600 empresas fabricantes de produtos pré-moldados de gesso (MME, 2021). A cadeia produtiva de gesso é formada por empresas de mineração da gipsita, indústrias de beneficiamento, empresas de transformação, comercialização e distribuição do gesso e produtos derivados, empresas de construção civil, indústrias de máquinas e ferramentas, fabricantes de explosivos, transportadoras, oficinas mecânicas, hotéis, indústria química e fabricantes de embalagens. Esta cadeia chamada de Arranjo Produtivo Local do Gesso (APL) gera cerca de 13,2 mil empregos diretos e 66 mil empregos indiretos (URBANO, 2013; MME, 2021).

Em relação à gipsita do Polo Gesseiro do Araripe, é possível encontrá-la em variações mineralógicas distintas, conhecidas na região como alabastro, cocadinha, estrelinha, Johnson, rapadura, selenita. Estas variedades são usadas para os diferentes destinos de produção e são capazes de gerar diferentes tipos de gesso em função de suas características e pureza. As variedades cocadinha, rapadura, estrelinha e Johnson são utilizadas na produção do gesso, a selenita é usada em polarizadores, e o alabastro é usada na fabricação de cimento ou na agricultura (BALTAR *et al.*, 2004).

2.2. GESSO

O gesso consiste em um ligante mineral que ao ser misturado com a água forma uma pasta homogênea, consistente e trabalhável, mas que após poucos minutos ganha resistência, sendo assim considerado um ligante de rápido endurecimento. Entretanto, diferentemente do cimento, os produtos de hidratação do gesso não apresentam resistência à ação da água, desse modo estes produtos são facilmente lixiviados quando em contato com a água, o que classifica o gesso como um ligante aéreo (JOHN; CINCOTTO, 2007).

Quimicamente, o gesso corresponde ao $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$, o sulfato de cálcio hemidratado, um produto branco de elevada finura, obtido a partir da desidratação térmica parcial da gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Este fenômeno ocorre durante a calcinação, quando o mineral é submetido a temperaturas que variam entre 140 e 160 °C, sendo assim desidratado e perdendo 75% de sua água de cristalização, gerando o produto sulfato de cálcio hemidratado. As condições de calcinação permitem definir o tipo de gesso a ser produzido, bem como, a qualidade do produto (ALMEIDA *et al.*, 2020; CAVALCANTI, 2006).

O gesso pode ser classificado inicialmente como beta ou alfa, e a primeira característica do processo produtivo que os diferenciara é a escolha da variação de gipsita

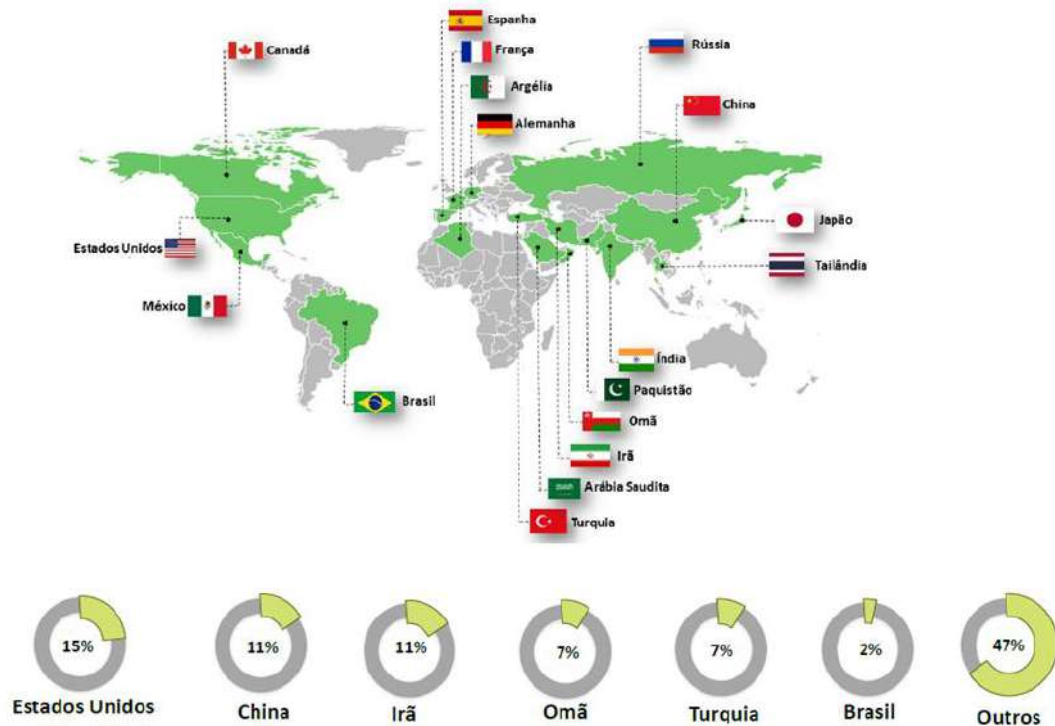
usada, conforme visto anteriormente. Para obtenção do gesso alfa, utiliza-se a gipsita Johnson, a variação mais pura do mineral, enquanto para a obtenção do gesso beta, utiliza-se a gipsita cocadinha, rapadura ou estrelinha. Outro fator que será determinante para formação do hemidrato alfa ou beta serão as condições de calcinação. Se a calcinação ocorrer em fornos industriais sob pressão atmosférica, ou baixa pressão, e temperatura entre 140 e 160 °C, será obtido o hemidrato beta. Por outro lado, caso a calcinação ocorra em autoclaves sob pressão de vapor de água saturante, ou seja, equipamentos fechados com pressão mais alta que a atmosférica, será obtido o hemidrato alfa (BALTAR *et al.*, 2004).

O gesso alfa consiste em um produto mais homogêneo, com maior resistência mecânica e menor consistência, dessa forma, possui maior valor comercial e aplicações mais nobres, como na área médico-odontológica (BALTAR *et al.*, 2005). Contudo, devido às condições de operação, os cristais formados do gesso beta são porosos e irregulares pois a água de cristalização é desprendida rapidamente, sendo este utilizado principalmente na indústria da construção civil (GAMA, 2015).

2.2.1. O mercado de gesso

Conforme apresentado na Figura 5, os Estados Unidos foram classificados como o maior produtor de gesso no mundo, tendo produzido cerca de 22 milhões de toneladas de gesso em 2020. A China e o Irã representam cada um 11% da produção mundial, correspondentes a 16 milhões de toneladas no mesmo ano. Em relação ao Brasil, a quantidade produzida é de cerca de 3,2 milhões de toneladas, isto é, 2% da produção mundial e a maior dentre os países da América Latina (MME, 2021).

Figura 5 – Principais países produtores de gesso.



Fonte: MME (2021).

Em termos de relação com o mercado internacional, verifica-se que as exportações de gesso e seus derivados no Brasil são bem menos expressivas que as importações, conforme evidencia a Figura 6. O principal contribuinte para o alto volume de importação corresponde à aquisição de chapas/painéis de gesso revestidas com papel/cartão não ornamentadas, conhecidas como *drywall*, que desde 1995 vem ganhando mercado na construção civil nacional (MME, 2020; MME, 2021). Segundo o MME (2020), o suprimento nacional de gesso é comprometido, principalmente, por restrições ambientais devido ao uso da lenha nativa para geração de energia na calcinação, e pelo alto custo logístico de transporte do material do Polo gesso do Ararape.

Figura 6 – Importação e exportação brasileira de gesso.



Fonte: MME (2021).

2.2.2. Gesso beta

O hemidrato beta pode ser subdividido em dois seguimentos: de fundição – tipo A, e de revestimento manual – tipo B. O que diferencia esses dois tipos é o tempo de pega. O gesso de revestimento é aplicado manualmente em paredes e tetos, normalmente em toda sua extensão, em substituição de rebocos ou massas de acabamento. Devido a isto, o tempo de pega precisa ser mais longo, pois, se o material endurecer rapidamente, não será possível concluir a aplicação. Enquanto o gesso de fundição é utilizado na produção de peças artesanais ou industriais, como placas de forro, sancas, molduras e outras peças de acabamento (BALTAR *et al.*, 2004; NOGUEIRA, 2015).

A Norma NBR 13207: Gesso para construção civil traz as especificações que diferenciam ambos os materiais em função do tempo de pega, como exemplificado na Tabela 4. A indústria é capaz de produzir gesso com maior tempo de pega, por exemplo, através do aumento da temperatura de calcinação ou da granulometria, além da adição de retardadores como o bórax. Caso o interesse seja diminuir o tempo de pega, durante a fabricação, podem ser utilizados aceleradores como sulfato de potássio e cloreto de sódio.

Tabela 4 – Especificações do tempo de pega do gesso de fundição e de revestimento.

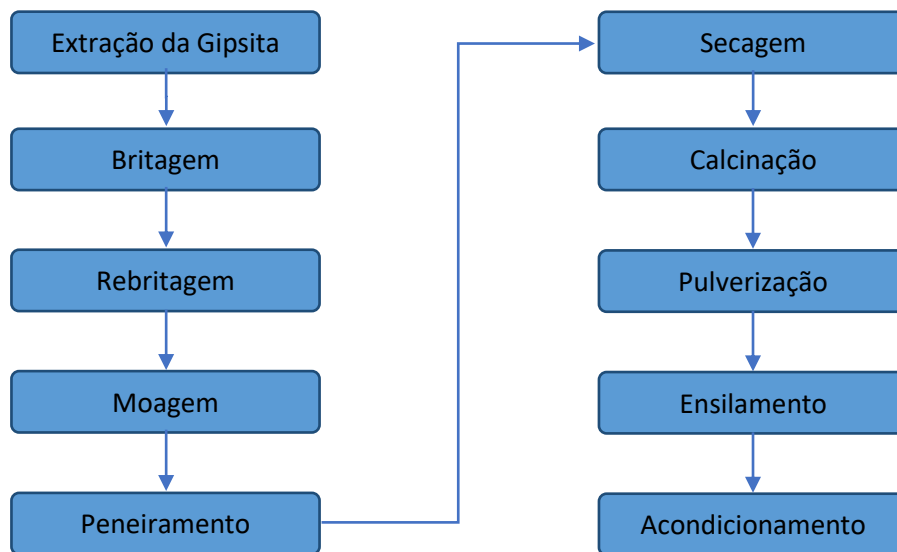
Tipo de Gesso	Início de pega (min)	Fim de pega (min)
Gesso de Fundição	4 a 10	20 a 45
Gesso de Revestimento	Acima de 10	Acima de 45

Fonte: ABNT NBR 13207 (2017).

2.2.3. A produção de gesso tipo beta

A produção de gesso beta em larga escala partindo da gipsita ocorre, normalmente, em dez etapas: extração da gipsita, britagem, rebritagem, moagem, peneiramento, secagem, calcinação, pulverização, ensilamento e acondicionamento, como exemplificado no diagrama exibido na Figura 7 (PINHEIRO, 2011).

Figura 7 – Etapas que compreendem a produção de gesso beta.



Fonte: Pinheiro (2011).

Em alguns polos de extração, como o do Araripe, por exemplo, a gipsita está disponível próximo a superfície. Neste caso, a extração ocorre por lavra a céu aberto, com equipamentos convencionais de mineração, tais como: tratores, britadeiras, escavadeiras e explosivos, gerando blocos de minério de uma grande variedade de tamanhos (RIBEIRO, 2006). Ainda nesta primeira etapa, os blocos de gipsita são fragmentados a um tamanho de 45 a 50 cm a fim de facilitar o transporte para a etapa seguinte (GAMA, 2015).

Na britagem primária, segunda etapa do processo, os blocos são submetidos à fragmentação normalmente em britadores de mandíbulas. Em seguida, o material segue para

as usinas onde passa por uma rebitagem até que os fragmentos possuam diâmetros inferiores a 100 mm. Posteriormente, o material é submetido à moagem, quarta etapa, quando é diminuído o diâmetro dos fragmentos para 25 mm, tamanho necessário para possibilitar a calcinação. Esta etapa também pode ser chamada de moagem grossa (PINHEIRO, 2011).

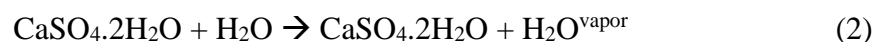
Na quinta etapa, é realizado um peneiramento a fim de garantir que a dimensão desejada tenha sido obtida. A homogeneidade do tamanho das partículas do minério garante maior qualidade do processo de fabricação, pois possibilita uma desidratação por igual do material (RIBEIRO, 2006; PINHEIRO, 2011, BARBOSA *et al.*, 2014).

Buscando garantir o preparo do material para uma das etapas mais importantes do processo – a calcinação – pode-se realizar a secagem como sexta etapa uma vez que os fragmentos podem ainda apresentar certa umidade, em torno de 10%, que deve ser minimizada (PINHEIRO, 2011).

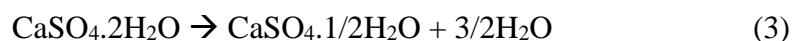
A etapa de calcinação consiste na desidratação por aquecimento da gipsita a uma temperatura na ordem de 140 a 160 °C. Abaixo desta faixa de temperatura, a velocidade de reação é lenta e acima deste intervalo, pode iniciar-se a formação de anidritas. Para obter-se o hemidrato beta, é realizada a calcinação via seca, sob pressão atmosférica (ALMEIDA *et al.*, 2020). A reação segue conforme exibido na Equação 1 (BARBOSA *et al.*, 2014):



As reações químicas dentro dos fornos de calcinação ocorrem em cadeia, dependendo do grau de aquecimento ao qual é submetido o material. À 100 °C, ocorre a liberação da água livre existente na gipsita representada pela Equação 2 (PINHEIRO, 2011).

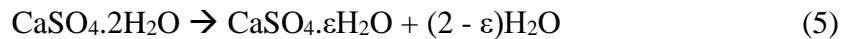
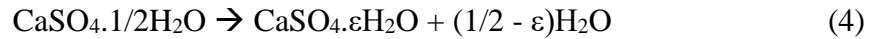


Em seguida, inicia-se o processo de reação da desidratação da gipsita que formará os hemidratos beta pela Equação 3. Na indústria, conforme visto anteriormente, esta reação ocorre de 140 a 160 °C, pois abaixo disso a velocidade de reação é baixa (PINHEIRO, 2011).



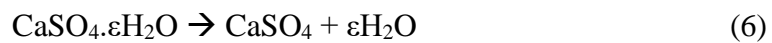
De acordo com a temperatura e o processo produtivo, o número de moléculas de cristalização do hemidrato formado pode variar de 0,15 a 0,66, porém na literatura considera-se o valor típico de 0,5 (PINHEIRO, 2011).

A anidrita III, ou anidrita solúvel, é formada no intervalo de temperatura de 160 a 190 °C, seja a partir do hemidrato ou da gipsita, conforme as Equações 4 e 5 abaixo.

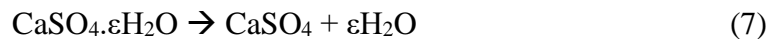


Sendo ε um valor variável entre 0,06 e 0,11. Dessa forma, a anidrita III é uma substância instável, altamente reativa e ávida por água. Pode reverter-se rapidamente a hemidrato ao reagir com a própria umidade do ar. A anidrita III no gesso atua como acelerador de pega (PINHEIRO, 2011).

Prosseguindo o aquecimento, a anidrita II ou anidrita insolúvel possui fórmula química CaSO_4 e é obtida na faixa entre 220 e 350 °C, conforme Equação 6.



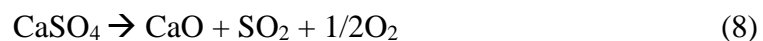
Entre 350 e 700°C, a anidrita II é denominada anidrita supercalcina, uma substância com baixa reatividade e que pode levar até sete dias para se hidratar. Outra variação da anidrita II, chamada “anidrita calcinada à morte”, é obtida de 700 a 800 °C e possui reatividade ainda mais baixa que a anidrita supercalcina e hidrata-se apenas após meses. A reação de obtenção de ambas as variações de anidrita II é apresentada pela Equação 7 (PINHEIRO, 2011).



A presença de anidrita II no gesso aumenta a resistência mecânica e dureza do material, pois, como sua hidratação é lenta e consome duas moléculas de água, a porosidade do gesso é conseqüentemente diminuída (PINHEIRO, 2011).

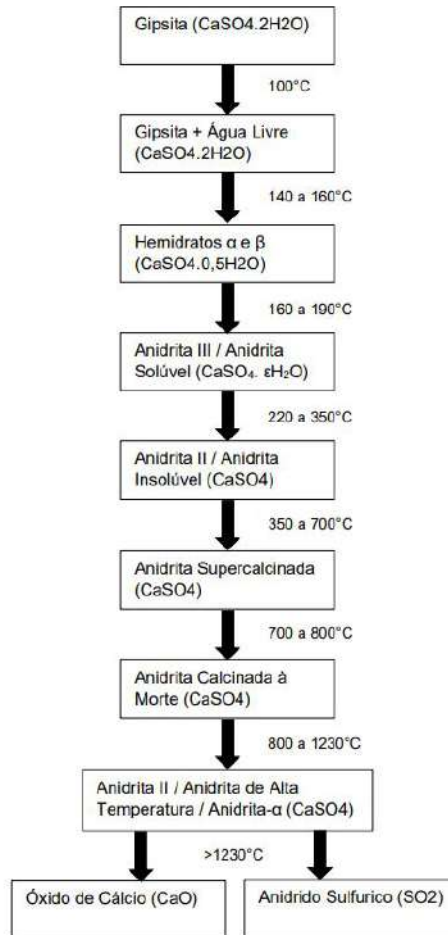
Em temperaturas de 800 a 1230 °C, a anidrita I, denominada anidrita de alta temperatura ou anidrita- α é formada. Possui a mesma fórmula química da anidrita II, porém caracteriza-se por ser uma fase impura, contaminada por óxido de cálcio, em função do início da decomposição do sulfato de cálcio (PINHEIRO, 2011).

Por fim, acima de 1230 °C, ocorre a decomposição da anidrita I em óxido de cálcio e anidrido sulfúrico de acordo com Equação 8.



Um esquema simplificado desta cadeia de reações é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Processo de desidratação da gipsita.



Fonte: elaboração própria.

Por mais que a fórmula e a composição química sejam semelhantes entre algumas destas fases geradas durante as etapas de aquecimento, a estrutura cristalina formada as difere entre si e, conseqüentemente, a forma como estas fases interagem com a água também. O sistema cristalino característico de cada fase mineral foi exibido na Tabela 1.

A oitava etapa do processo de produção do gesso beta – a pulverização – por vezes chamada de moagem fina, tem por objetivo assegurar a granulometria final adequada que garanta elevada reatividade ao gesso. Neste momento, o material calcinado passa por moinhos especiais combinados com crivos (PINHEIRO, 2011; RIBEIRO, 2006).

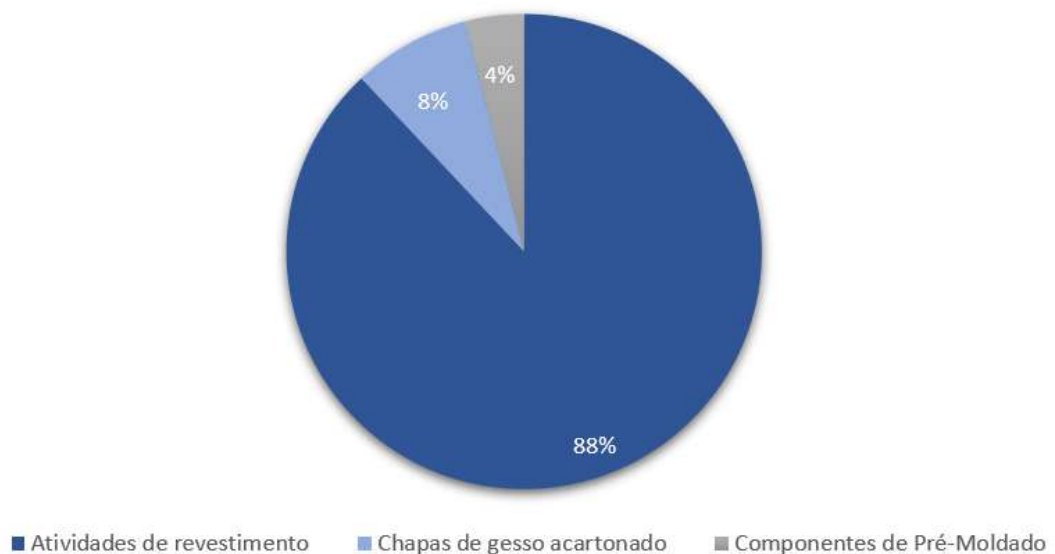
Já ao final do processo, o ensilamento consiste no armazenamento do material em silos a fim de estabilizar seus constituintes, hemidratos e anidritas. Por fim, ocorre o acondicionamento, embalagem ou ensacamento. Para isto, são utilizados sacos de papel *kraft*,

sacos plásticos ou *big bags*. O mais importante é que as embalagens sejam estanques, protegendo o material da umidade do ambiente (PINHEIRO, 2011).

2.2.4. Gesso reciclado

Os resíduos de gesso hidratado são oriundos principalmente da construção civil. Segundo Almeida *et al.* (2020), dentro deste setor, a principal origem dos resíduos de gesso é proveniente de atividades de revestimento, seguida pela produção de chapas de gesso acartonado e dos componentes pré-moldados, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Fontes de resíduos de gesso na construção civil.



Fonte: elaboração própria.

O resíduo oriundo de atividades de revestimento corresponde à pasta que endureceu e não é possível mais aplicá-la ou a sobra da pasta que foi feita em excesso. Isto ocorre especialmente devido à velocidade de endurecimento do gesso de construção, associada à aplicação manual por mão de obra frequentemente com baixa qualificação. Nesta porcentagem, ainda estão inclusas perdas que permanecem na parede como excesso de espessura e se tornará resíduo de construção e demolição (RCD), que podem apresentar-se parcialmente aderidas à base de alvenaria ou outro tipo de mineral, dificultando sua segregação. Enquanto o gesso acartonado, o qual naturalmente já possui uma composição mais complexa – incluindo majoritariamente gipsita, papel, fibras de vidro, vermiculita, argilas, amido, potassa, agentes espumantes (sabões), dispersantes e hidrorrepelentes nas placas resistentes à água – são comumente obtidos contaminados com metais (pregos),

madeira e tinta. (JOHN; CINCOTTO, 2007). As peças pré-moldadas, ao virarem resíduo, acabam sendo mais fáceis de separar durante a triagem do entulho de obra devido a seu tamanho e por estarem isoladas de outros compostos na construção (AGUIAR, 2004).

Conforme a Resolução do CONAMA N° 307/2002, até 2011 o gesso se enquadrava como um resíduo Classe C que, segundo o próprio documento são: “Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso”.

No entanto, por meio da difusão de estudos acerca deste material, a partir da Resolução do CONAMA n° 431 de 2011, o gesso passou a ser classificado como Classe B, definida como “Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plástico, papel, papelão, metais, vidros, madeira e gesso”.

A Norma Brasileira ABNT NBR 10004 classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais, seja para o meio ambiente ou para saúde pública. Nesta norma, os resíduos de gesso são classificados como Classe II A – Resíduo não inerte, em função de serem solubilizados em água.

As propriedades do resíduo de gesso hidratado, como a solubilidade e reatividade, destacam os problemas de destiná-los aos aterros e torna mandatória a busca pela destinação adequada do material por empresas e órgãos públicos. Isso porque o descarte incorreto, como o envio a lixões e aterros sanitários, dadas condições como umidade, condições anaeróbicas, baixo pH e a presença de bactérias redutoras de sulfatos, pode culminar na formação de gás sulfídrico (VANDERLEY, 2017).

No Brasil, a principal destinação de resíduos de gesso são as Áreas de Transbordo e Triagem (ATTs), licenciadas pelas prefeituras dos municípios em que se inserem, e são capazes de receber, triar e homogeneizar os resíduos. No entanto, estas unidades não realizam a reciclagem. Após as etapas de pré-tratamento, o material é vendido para os setores que o reciclarão de fato (ABDRYWALL, 2014). A relação das unidades de recebimento de resíduos de gesso no Brasil pode ser encontrada na Tabela 5.

Tabela 5 – Unidades de ATTs no Brasil.

Estado	Região Atendida	Identificação
RS	Grande Porto Alegre	Sebanella
SC	Grande Florianópolis	SulGesso
	Vale do Itajaí	Planetaa
	Blumenau e Região	VitaCiclo
	Região Norte	Planeta
PR	Grande Curitiba	Rec Gesso
	Litoral do Paraná	Rec Gesso
	Região Campos Gerais	Rec Gesso
	Grande Londrina	Kurica
SP	Grande São Paulo	Multiplus
	Vale do Paraíba	AB Ambiental
RJ	Grande Rio de Janeiro	ProRecicle
ES	Grande Vitória	Nassau / Mizú
	Guarapari	A2 Ambiental
BA	Grande Salvador	Ecológica NE
	Feira de Santana	Ecológica NE
PE	Grande Recife	Ciclo Ambiental
CE	Grande Fortaleza	MM Gesso
MG	Grande Belo Horizonte	

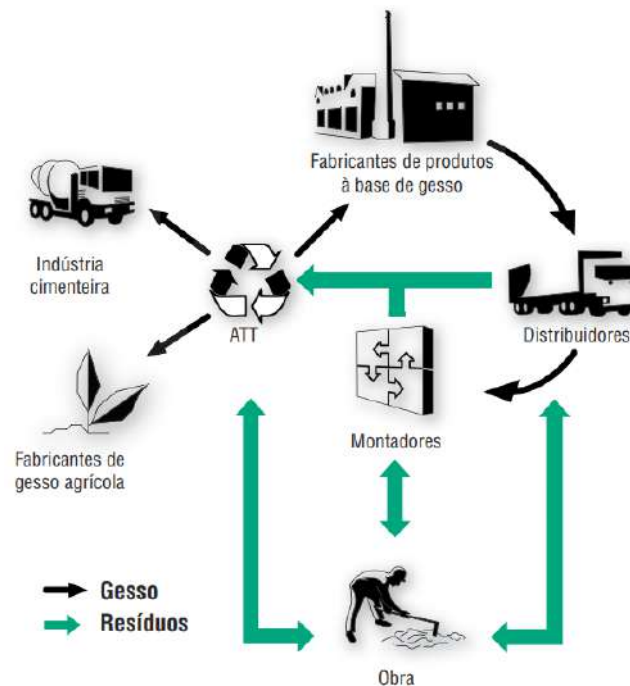
Fonte: elaboração própria.

É perceptível que os estados que possuem a maior parte de áreas atendidas são da região Sul. Este fator é compreensível e esperado uma vez que, conforme visto anteriormente, as maiores jazidas das quais pode-se obter o minério capaz de produzir o gesso encontram-se nas regiões Nordeste e Norte, de modo que a região Sul, por sua vez, tem menor acesso ao mineral, e assim, maior interesse e necessidade de reutilizar o resíduo de gesso gerado.

2.2.4.1. A utilização do gesso reciclado

A Associação Brasileira de Drywall desenvolveu um trabalho chamado “Resíduos de Gesso na Construção Civil: Coleta, armazenagem e reciclagem”, oriundo de estudos que comprovaram a possibilidade de reaproveitamento do gesso da construção civil, influenciada pela atualização da Resolução Nº 307 do CONAMA em 2011. A partir deste documento, identifica-se pelo menos três possibilidades de aplicação para o resíduo do gesso da construção civil: indústrias de cimento, agricultura e o próprio setor de produção de gesso, como exemplificado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma de reciclagem de gesso.



Fonte: ABDRYWALL (2014).

Além disso, Ângulo (2001) também constata que após realizados os métodos e processos de reciclagem é possível atingir a reciclagem integral do resíduo com diversas empregabilidades: na construção civil, correção dos solos, aditivo para compostagem, absorvente de óleos, controle de odores e secagem de lodos em estações de esgoto.

Para este trabalho, a reutilização do resíduo de gesso na produção de cimento é a aplicação de maior interesse, sendo descritos a seguir alguns estudos nesta linha.

Aires (2015) avaliou a possibilidade do uso de resíduos de peças pré-moldadas de gesso em substituição à gipsita na produção de cimento Portland CPV. Foram comparados três tipos de produtos, os produzidos a partir da gipsita pura, outro a partir da substituição de 10% da gipsita por resíduos de peças pré-moldadas, as quais também se apresentaram na forma diidratadas, e um terceiro produto no qual a porcentagem de substituição era de 20%.

Neste mesmo estudo, foram conduzidas análises de espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX) em todas as matérias-primas do cimento, difratometria de raios X (DRX) e análise termogravimétrica (TG) na gipsita e nos resíduos. Foram também avaliados quanto a perda ao fogo, CaO livre, resíduo insolúvel e anidrido sulfúrico, bem como finura, resistência à compressão, expansibilidade e tempo de pega. A partir destas análises e ensaios, com seus respectivos resultados conclui-se que é possível o aproveitamento deste tipo de resíduo em substituição parcial à gipsita na produção de cimento para a substituição de 10%, pois quando

substituída 20% da gipsita por resíduos, foi identificado o fenômeno da expansibilidade e o processo de pega foi instantâneo, o que inviabilizou outros ensaios.

Nogueira (2015) estudou a fabricação de cimento utilizando resíduos de gesso da construção civil obtidos de uma empresa licenciada para deposição e beneficiamento. Foram coletadas amostras de resíduos de gesso na forma diidratada usado para diferentes finalidades na construção civil. Em seguida, foi realizada a análise da composição química FRX, além de determinação do teor de umidade e da perda ao fogo. Os resultados obtidos foram comparados com os alcançados pela gipsita já utilizada por uma cimenteira, de acordo com os requisitos exigidos pela NBR 13207. No geral, os resultados foram favoráveis e os resíduos de gesso em sua forma diidratada apresentaram bom potencial para serem reutilizados na fabricação de cimento. No entanto, o principal problema encontrado foi o fato de que as amostras apresentaram baixo percentual de SO_3 , e a melhor opção encontrada para contornar este empecilho seria a adição dos resíduos no processo em conjunto com a gipsita.

Barros (2010) realizou análises químicas de umidade, pureza, água combinada, porcentagem de óxidos, SO_3 , além de uma análise econômica para a utilização de resíduos de gesso como matéria-prima na indústria cimenteira. Foram comparados os resultados obtidos para amostras de resíduos de gesso da construção civil obtidos em uma unidade de recebimento de depósitos e amostras de gipsita obtida diretamente do polo gesseiro de Pernambuco. O autor apontou como uma via possível de reciclagem, uma vez que, durante a comparação, não foram identificadas modificações ou contaminações nos resíduos estudados que pudessem comprometer a resistência ou pega do cimento, além de apresentar umidade e teor de SO_3 dentro dos parâmetros aceitáveis na produção cimenteira. No entanto, ressaltou-se a preocupação de não haver garantias quanto a disponibilidade contínua deste material na qualidade e quantidade necessárias.

Chandara (2009) estudou a influência do uso de resíduos de peças pré-moldadas de gesso em substituição à gipsita natural na produção de cimento Portland - equivalente ao CPI. As propriedades das matérias-primas foram analisadas por DRX, FRX e TG. Os cimentos produzidos foram analisados em termos de tempo de pega, resistência à compressão e à flexão. Os resultados das análises por varredura de calorimetria diferencial e TG mostram que o resíduo, assim como a gipsita, é majoritariamente composto por diidratos. O resíduo apresentou 12,45% de hemidrato e 1,61% de gipsita. Devido a isto, o tempo de pega do cimento produzido com gesso reciclado foi menor, pois o hemidrato é mais solúvel e precipita mais rapidamente. Por outro lado, os resultados das análises físicas foram relativamente próximos para os dois produtos.

Gazquez *et al.* (2013) utilizaram o chamado gesso vermelho, oriundo da indústria de dióxido de titânio, para produção de cimento equivalente ao CPI. Este gesso também possui em sua composição cerca de 5% de TiO_2 e 8% de hidróxidos de ferro, sendo este último responsável pela cor avermelhada característica. O estudo analisou as propriedades do cimento produzido com quatro percentuais de clínquer e gesso diferentes, sendo eles: 97,5% clínquer e 2,5% gesso vermelho, 95% clínquer e 5% gesso vermelho, 90% clínquer e 10% gesso vermelho e, por fim, 97% clínquer e 3% gipsita. Os resultados foram satisfatórios, indicando que o gesso vermelho pode ser utilizado como substituto da gipsita na fabricação de cimento, sendo os melhores resultados obtidos para a composição de 90% clínquer e 10% gesso vermelho, mantendo a qualidade e propriedades similares ao cimento produzido com gipsita.

Apesar dos casos de sucesso reportados pela literatura, atendendo às normas de adequação do material à sua respectiva aplicação, são encontradas outras limitações no que diz respeito à reciclagem do gesso, principalmente quanto à adequada gestão, separação, armazenamento e transporte do resíduo (NOGUEIRA, 2015).

Para o resíduo atingir a qualidade requerida, deve ser separado de outros materiais, como madeira, metais, papéis, plásticos, restos de alvenaria (tijolos, blocos, argamassa) e do lixo orgânico. Dessa forma, há a necessidade de treinar a mão-de-obra envolvida nos processos (ABDRYWALL, 2014). No que diz respeito ao armazenamento e transporte, deve-se levar em conta a elevada solubilidade do gesso, que quando em contato com água, libera íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} , que podem contaminar o solo e lençóis freáticos. Quando em contato com matéria orgânica e sob condições anaeróbias, o resíduo de gesso pode levar à formação de gás sulfídrico (H_2S), altamente tóxico. Dessa forma, este material requer uma gestão cuidadosa, exigindo ainda mais seu tratamento e reciclagem (GAMA, 2015).

Algumas discussões sobre a utilização do resíduo tangiam sua aplicação como agregado para a produção de concreto, entretanto, o gesso não pode ser reciclado juntamente com outras frações de minerais da construção civil para produção de agregados, pois o sulfato poderia reagir com os aluminatos do cimento, gerando a etringita, que apresenta volume maior que os compostos originais, gerando altas tensões de expansão na matriz dos concretos, podendo criar fissuras e até romper uma estrutura de concreto (NOGUEIRA, 2015).

Por fim, ainda que seja feita a separação adequada do resíduo e este apresente composição química e pureza compatível a uma dada aplicação, há uma exigência em relação ao volume produzido. Ou seja, a massa de resíduos de gesso gerada precisaria ser suficiente

para suprir a demanda de gesso através de um negócio autossustentável (VANDERLEY, 2003).

2.3. CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland consiste em um ligante hidráulico de composição bastante heterogênea. Quando misturado à água, gera uma pasta que rapidamente inicia seu processo de hidratação e evolui ao longo do tempo adquirindo elevada resistência mecânica e alta resistência à ação da água (ROADMAP, 2019).

O processo produtivo do cimento Portland pode ser dividido, de forma sucinta, em dois principais estágios: i) produção do clínquer em fornos de alta temperatura, e ii) moagem conjunta do clínquer, sulfato de cálcio e adições (calcário, escória de alto-forno, materiais pozolânicos, entre outras).

Portanto, dois insumos são comuns em todos os tipos de cimento Portland: o clínquer e o sulfato de cálcio diidratado. O clínquer é responsável pelo ganho de resistência mecânica do material endurecido, enquanto o sulfato de cálcio diidratado possui o papel de controlador de pega, a fim de impedir o endurecimento precoce do cimento e é adicionado em valores que variam entre 2 e 5% em massa (ABCP, 2002).

O clínquer é um material composto basicamente por silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) e ferro-aluminato-tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). É fabricado a partir do calcário (CaCO_3) e da argila (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3), ambos minerais obtidos diretamente de jazidas, normalmente localizadas próximas às fábricas, que passam por um processo de fusão incongruente, denominado clinquerização (RODRIGUES *et al.*, 2013).

Além do clínquer e do sulfato de cálcio diidratado, para a obtenção de propriedades específicas e possibilidade de redução do consumo de clínquer na produção de cimento, podem ser empregados compostos minerais com maior ou menor reatividade. Um destes compostos é o *filler* calcário, material que pode ser adicionado com a função de aumentar o empacotamento da mistura de cimento durante o endurecimento, por não desenvolver reações de hidratação (SOUSA, 2021).

Adicionalmente, pode-se citar a escória de alto-forno, que consiste em um resíduo das siderúrgicas, pois é gerada durante a fabricação do ferro gusa. Nos altos-fornos das siderúrgicas, durante a redução do minério de ferro, uma série de reações se desenvolvem culminando na fusão do minério e na remoção das impurezas que o compõem. Ao final do

processo, há o gotejamento de gusa líquido e a geração de dois subprodutos: escória de alto-forno e gases (SOUSA, 2021).

Atualmente, a escória de alto-forno corresponde à adição mineral que tem maior percentual de substituição de clínquer na produção de cimento Portland, isto porque ela consiste em uma adição potencialmente hidráulica, com semelhante capacidade de formar hidratos e endurecer após o contato com a água. Dentre os benefícios de realizar tal substituição, pode-se citar a questão ambiental, pois, além de utilizar um resíduo, diminui o consumo de energia e de recursos naturais ao reduzir a quantidade de clínquer. Ademais, há um benefício econômico, pois reduz o custo de produção do cimento. Como resultado, o cimento produzido a base de escória apresenta propriedades específicas como baixo calor de hidratação e resistência ao ataque de sulfatos (SOUSA, 2021; ABCP, 2002).

Outra adição possível que compõe alguns tipos de cimento Portland são os materiais pozolânicos. Estes podem ser naturais, rochas vulcânicas; ou artificiais, alguns tipos de argilas calcinadas, derivados da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas, entre outros. Os materiais pozolânicos desenvolvem comportamento hidráulico quando finamente moídos, e em meio aquoso reagem com o hidróxido de cálcio, formando produtos de hidratação idênticos aos gerados pelo clínquer Portland (ABCP, 2002). Diante do exposto, é possível obter diferentes tipos de cimento, classificados segundo a origem e proporção da adição empregada, conforme especificado pela NBR 16697:2018- Cimento Portland – Requisitos e exibido na Tabela 6.

Tabela 6 – Designação normalizada segundo a NBR 16697.

Sigla	Tipo	Componentes (% da massa total do produto cimentício)			
		Clínquer + Sulfatos de Cálcio	Escória granulada de alto forno	Material Pozolânico	Material Carbonático (Calcário)
CPI	Comum	95 a 100	-	0 a 5	-
CPI-S	Comum	90 a 94	-	-	6 a 10
CPII-E	Compostos com escória granulada de alto forno	51 a 94	6 a 34	-	0 a 15
CPII-Z	Composto com material pozolânico	71 a 94	-	6 a 14	0 a 15
CPII-F	Composto com material carbonático	75 a 89	-	-	11 a 25
CPIII	Alto-forno	25 a 65	35 a 75	-	0 a 10
CPIV	Pozolânico	45 a 85	-	15 a 50	0 a 10
CP V-ARI	Alta resistência inicial	90 a 100	-	-	0 a 10
CPB (Cimento Portland Branco)	Estrutural	75 a 100	-	-	0 a 25
	Não estrutural	50 a 74	-	-	26 a 50

Fonte: ABNT (2018).

2.3.1. Processo produtivo do cimento

As fábricas de cimento podem ser divididas em, basicamente, três tipos: fábrica integrada, fábrica de moagem ou fábrica misturadora. As unidades integradas são assim chamadas pois possuem forno de clínquerização e moinho no mesmo local. Por outro lado, nas fábricas de moagem, os componentes do cimento chegam e ficam armazenados em galpões e silos para posteriormente serem dosados e moídos em conjunto, dando origem ao cimento, e então armazenados em silos de cimento. Por fim, as fábricas misturadoras recebem o sulfato de cálcio, adições e clínquer já moídos, que por sua vez ficam armazenados em silos até serem transportados, já na dosagem certa, para os misturadores para formar o produto (CSN, 2021).

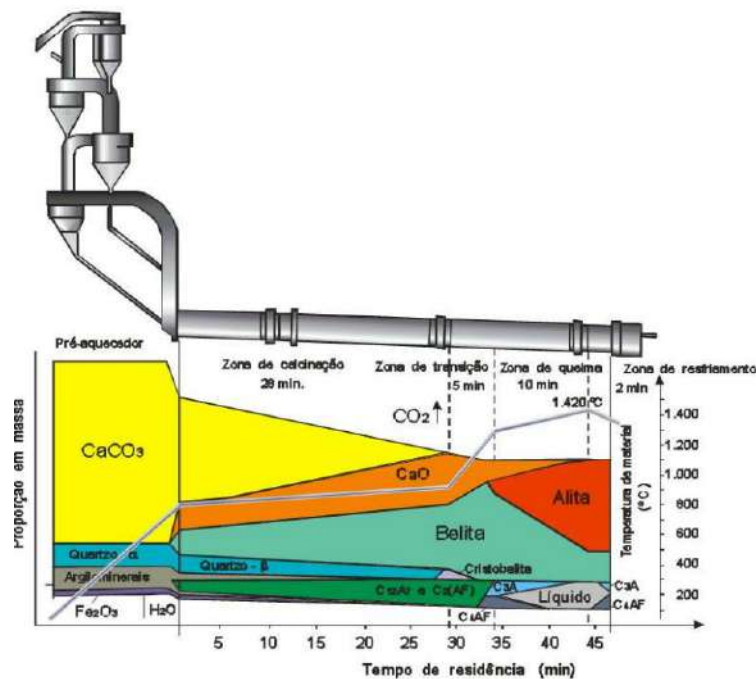
A complexidade do processo produtivo em uma fábrica integrada é nítida quando comparada às demais, devido à produção do clínquer. O processo denominado clínquerização, tem como objetivo converter as matérias-primas (argila, carbonato, minério de ferro, bauxita e quartzo) em fases minerais hidráulicas. Este processo pode ser realizado, principalmente, de duas formas: via úmida ou via seca. Tais vias diferem entre si de acordo com a tecnologia de homogeneização das matérias-primas adotada. Na via úmida, esta homogeneização é realizada com adição de água até formar uma pasta, o problema é que esta água precisará ser evaporada depois e é esta etapa responsável pelo grande gasto de energia desta via. Devido a isto, no Brasil, é realizada a via seca dada a menor quantidade de energia necessária e

consequentemente, menor custo (ABCP, 2002; RODRIGUES *et al.*, 2013; ROADMAP, 2019).

O processo de produção de clínquer por via seca consiste, em primeiro lugar, na extração das matérias-primas, calcário e argila, seguida da britagem e moagem da rocha calcária para, posteriormente, ser misturada à argila moída, em proporções pré-definidas e dosadas em quantidades que variam em geral de 80 a 95% de calcário para 5 a 20% de argila. A mistura formada, chamada farinha crua, é armazenada em silos e, em seguida, é submetida à clinquerização em temperatura entre 1450 e 1550 °C, em um forno giratório de grandes proporções com tempo de permanência de aproximadamente 50 minutos (ABCP, 2002; RODRIGUES *et al.*, 2013; ROADMAP, 2019).

Como é possível observar na Figura 11, uma série de reações progressivas e dependentes ocorrem no interior do forno durante a clinquerização.

Figura 11 – Transformações ocorridas durante a queima da farinha crua para produção de clínquer em função do tempo de residência e temperatura.



Fonte: Gobbo (2009).

Antes de analisar as reações que constituem o processo de produção do clínquer, buscando um melhor entendimento de seus componentes e das fases intermediárias geradas, as mesmas podem ser resumidas, em suas diferentes formas de apresentação, na Tabela 7.

Tabela 7 – Componentes mineralógicos do clínquer de cimento Portland.

Constituinte	Notação cimentícia	Fórmula química	Fórmula empírica
Silicato Dicálcico	C ₂ S	2CaO.SiO ₂	Ca ₂ SiO ₄
Silicato Tricálcico	C ₃ S	3CaO.SiO ₂	Ca ₃ SiO ₅
Aluminato Tricálcico	C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃	Ca ₃ Al ₂ O ₃
Ferro Aluminato tetracálcico	C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀
Óxido de Cálcio	C	CaO	-
Óxido de Alumínio	A	Al ₂ O ₃	-
Óxido Férrico	F	Fe ₂ O ₃	-
Óxido de Silício	S	SiO ₂	-
Óxido sulfúrico	Ŝ	SO ₃	-
Água	H	H ₂ O	-

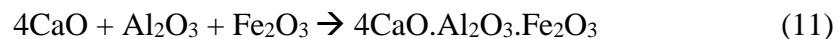
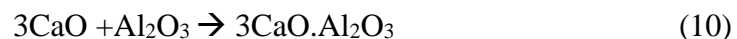
Fonte: Mehta; Monteiro(2008).

Inicialmente na clínquerização, o calor do forno promove a desidroxilação da argila, permitindo a liberação de Si, Al, e Fe, a partir de aproximadamente 400 °C.

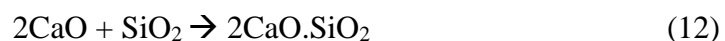
Verifica-se em seguida, à 800 °C, o início da decarbonatação do calcário, produzindo CaO, conforme demonstrado na Equação 9 (GOBBO, 2003; RODRIGUES *et al.*, 2013):



Em seguida, entre 1095 e 1205 °C, em função da liberação dos quatro elementos principais (Ca, Si, Al, Fe) estes se recombinaem para formar C₃A (3CaO.Al₂O₃) e C₄AF (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃), conforme Equações 10 e 11.



A partir de 1300 °C, estes compostos C₃A e C₄AF começam a se fundir, formando uma fase líquida localizada na interface dos grãos, que envolve os cristais de C₂S (2CaO.SiO₂), que por sua vez são formados a partir da reação dos óxidos de cálcio e de silício, a temperaturas variando entre 700 e 900 °C, segundo a Equação 12:



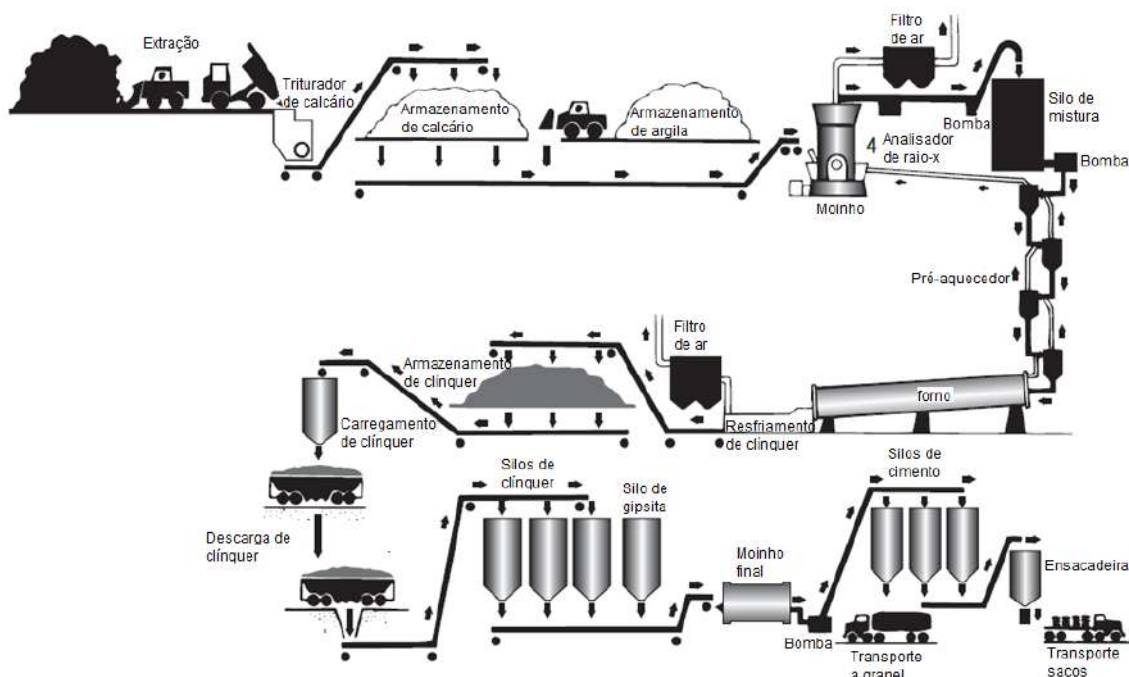
Por fim, os silicatos tricálcicos (C₃S) são formados a partir de 2CaO.SiO₂ e da cal livre, a cerca de 1200 °C conforme reação abaixo (RODRIGUES *et al.*, 2013; Gobbo, 2003):



O material obtido na saída do forno possui estrutura de pelotas acinzentadas, foscas e de tamanho variado. Este clínquer, ainda incandescente, é bruscamente resfriado ao ar, a fim de elevar a sua dureza para facilitar o processo de moagem, pois na produção de cimento ele é utilizado na forma de pó (RODRIGUES *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2019). A exigência de o resfriamento ser realizado de forma brusca é importante para influenciar nas texturas microscópicas e para manter a estrutura do clínquer e impedir que haja reconversão das fases formadas em outras indesejadas, por exemplo cal livre (COSTA, 2020).

Em seguida, o clínquer pronto e resfriado permanece armazenado por um período em silos e posteriormente é misturado e moído com o gesso e as demais adições minerais, até transformarem-se em um pó cinza, o cimento Portland (ROADMAP, 2019). O processo de produção do cimento por via seca é ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Diagrama do processo de produção do cimento Portland.



Fonte: adaptado de Zhang (2012).

É importante ressaltar que o controle de qualidade em uma fábrica de cimento é realizado de forma contínua e define se os produtos apresentam ou não características similares. Assim, em cada fábrica são definidas faixas de valores ideais para alguns parâmetros específicos da farinha crua que se transformará em clínquer. Os valores obtidos

destes parâmetros irão guiar as dosagens da argila e do calcário e avaliar a necessidade de correção de algum componente da farinha.

A Tabela 8 apresenta os valores comumente utilizados na dosagem do clínquer, onde os teores ótimos para FSC apontados pela literatura apresentam pequenas variações.

Tabela 8 – Parâmetros típicos utilizados na indústria de cimento para controle da composição da farinha de clínquer.

Parâmetro	Taylor (1997)	Galbenis e Tsimas (2006)	Puertas <i>et al.</i> (2010)	Schepper <i>et al.</i> (2013)	Vilaplana <i>et al.</i> (2015)	Young e Yang (2019)
Fator de Saturação da Cal - FSC (%)	92 – 98	92 – 96	98	92 – 94	98	90
Módulo de Sílica – MS	2,0 – 3,0	2,3 – 2,7	2,7	2,4 – 3,0	2,3	2,3
Módulo de Alumina – MA	1,0 – 4,0	1,3 – 1,7	1,3	2,4 – 4,4	1,3	1,5

Fonte: COSTA (2020)

De forma simplificada, o FSC determina a quantidade máxima de CaO que pode reagir com os outros óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) para formar a alita (C_3S) no clínquer. O MS corresponde a relação entre os silicatos e os aluminatos e compostos de ferro, assim, valores elevados de MS representam uma proporção maior de C_2S e C_3S e uma menor quantidade de C_3A e C_4AF . Enquanto o MA é a relação entre os aluminatos e os compostos de ferro, ambos materiais fundentes (COSTA, 2020).

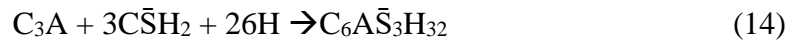
2.3.2. Hidratação do cimento

A hidratação do cimento consiste no conjunto de reações químicas que ocorrem logo após a mistura do cimento e da água, desde a sua dissolução, até atingir seu limite de solubilidade e iniciar a precipitação dos compostos hidratados ou produtos de hidratação do cimento.

2.3.2.1. Hidratação dos aluminatos

O aluminato tricálcico (C_3A) presente no clínquer endurece instantaneamente quando em contato com a água. Assim, o papel da adição do sulfato de cálcio é retardar as reações de hidratação do C_3A , possibilitando a trabalhabilidade do material (COSTA, 2020).

O mecanismo de controle acontece a partir da reação do sulfato de cálcio com o C_3A , formando um composto chamado etringita, o trissulfoaluminato de cálcio:

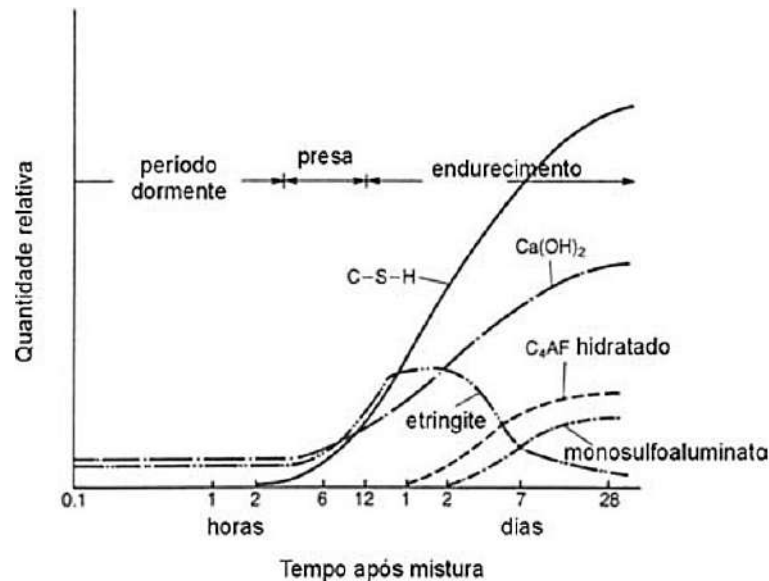


Nas primeiras horas de hidratação, é formada a etringita primária. Esta encobre totalmente o grão de clínquer, impedindo temporariamente a continuação da hidratação do cimento. Com o decorrer do tempo, a relação $\text{SO}_4^{2-}/\text{Al}(\text{OH})_4^-$ diminui, tanto porque o sulfato é consumido, quanto devido ao aumento da concentração de aluminato devido à renovação de hidratação do C_3A e do C_4AF , assim a etringita (AFt) formada torna-se instável devido à diminuição de sulfato no meio. A partir deste momento, a etringita é progressivamente convertida em monossulfoaluminato de cálcio (AFm), um dos produtos finais da hidratação do cimento, conforme mostrado na Equação 15 (AIRES, 2015; COSTA, 2020).



No que diz respeito ao C_4AF , sua reação é mais lenta e envolve menos calor, por ser menos reativo (COSTA, 2020). A evolução dos produtos de hidratação ao longo do tempo é apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Formação dos produtos de hidratação na pasta de cimento Portland ao longo do tempo.



Fonte: Coutinho (2002).

2.3.2.2. Hidratação dos silicatos

Durante a hidratação do cimento, os silicatos são os principais responsáveis pelo desenvolvimento de resistência mecânica na matriz cimentícia. O primeiro silicato a hidratar é o silicato tricálcico, C_3S , seguido do silicato dicálcico, C_2S . Entretanto, as reações para ambos compostos são semelhantes e diferem apenas quanto à cinética e a estequiometria (COSTA, 2020).

A alita proporciona o desenvolvimento de resistência a curto prazo, sua hidratação culmina logo nos primeiros dias na formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e é fundamental para determinação das propriedades da pasta de cimento endurecido, como resistência e durabilidade (COSTA, 2020).



Os produtos de hidratação do C_3S consistem em $C_3S_2H_3$, produto principal e parte da família de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) de composição variável; e em $Ca(OH)_2$ que apresenta alta solubilidade e cristal volumoso de difícil compactação (COSTA, 2020).

Já a belita (C_2S) contribui para o desenvolvimento da resistência do cimento nas idades tardias. Isso porque sua reação com água é lenta. No entanto, assim como a alita, culmina na formação de C-S-H conforme a Equação 17 (COSTA, 2020):



É importante notar que apesar de ambos os silicatos demandarem quantidades diferentes de água para hidratação, estes valores não diferem muito entre si. Entretanto, a hidratação do C_3S produz mais hidróxido de cálcio quando comparado ao C_2S . Conseqüentemente, a menor quantidade de CH gerada na reação com a belita fornece um produto com maior resistência mecânica, por ser mais compactado, e maior resistência química devido à redução da solubilidade (COSTA, 2020).

3. METODOLOGIA

A metodologia empregada para a realização deste trabalho consistiu no levantamento de informações bibliográficas e na realização de experimentos relevantes para alcançar os objetivos propostos. Para tal, foram realizadas buscas de dados em plataformas científicas, órgãos reguladores, relatórios corporativos e de organizações nacionais e internacionais, bem como a realização de uma visita técnica à uma fábrica de cimentos de relevância nacional que cooperou com a execução dos experimentos.

A pesquisa bibliográfica utilizada para a compreensão do tema e sustentação da discussão neste estudo foi realizada em bases de publicações científicas, sendo elas: Scopus, Springer, Science Direct, Periódicos CAPES e SciELO Brazil, nas quais foram consideradas fontes em português e inglês que abordassem os temas pertinentes à “Geração e Reutilização de Resíduos de Gesso”. Para a busca, utilizou-se das palavras-chaves: resíduos de gesso, gesso reciclado, gesso na construção civil, gipsita, produção de cimento Portland, beneficiamento de gesso, qualidade do gesso reciclado, normas e políticas de reciclagem.

Assim, após o entendimento teórico do tema, foi executada uma etapa experimental, na qual o resíduo de gesso hidratado foi coletado, beneficiado e usado na produção do cimento Portland CPIII para avaliação de suas propriedades físico-mecânicas. Estas etapas serão individualmente descritas nos itens seguintes.

3.1. BENEFICIAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE GESSO HIDRATADO

3.1.1. O resíduo de gesso hidratado

O resíduo estudado neste trabalho foi proveniente da cura de diferentes marcas de gesso comercial realizada ao longo das aulas práticas da disciplina de Processos Inorgânicos Experimental (EQI-472) pelos cursos de graduação em Engenharia Química e Química Industrial da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Este resíduo é constituído, em maior parte, de gesso em sua forma diidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e apresenta como vantagem, a manutenção da composição química do produto comercial, uma vez que durante as práticas não são realizadas alterações da composição, apenas de sua consistência ou relação água-ligante (a/l). A Figura 14 apresenta o material exposto antes de qualquer tipo de beneficiamento.

Figura 14 – Resíduo de gesso hidratado cedido pela UFRJ.



Fonte: elaboração própria.

3.1.2. Preparo das amostras a partir do resíduo de gesso hidratado coletado

O beneficiamento dos resíduos utilizados nesse trabalho envolveu as etapas de coleta, separação, britagem, peneiramento, secagem e estocagem para uso posterior.

Inicialmente, as amostras foram coletadas diferenciando os materiais dos tambores de armazenamento do Laboratório de Processos Inorgânicos da EQ/UFRJ. Em seguida, foram feitas a avaliação e separação dos resíduos de acordo com a NBR 10007, diferenciando os materiais recicláveis das impurezas.

Posteriormente, as amostras foram submetidas à britagem, realizada por um britador de rolos mostrado na Figura 15, visando a redução de tamanho e sua transformação em pó. O processo foi realizado repetidas vezes até alcançar a granulometria desejada, como ilustrado na Figura 16.

Figura 15 – Britador de rolos.



Fonte: elaboração própria.

Figura 16 – Diminuição da granulometria ao longo de britagens consecutivas.



Fonte: elaboração própria.

3.1.3. Análise granulométrica

O ensaio de distribuição granulométrica foi realizado utilizando peneiras com aberturas de tamanho controlado, sendo estes tamanhos correspondentes aos números de Tyler 8 (abertura de 2,39mm), 20 (abertura de 850 μ m), 28 (abertura de 590 μ m), 48 (abertura de 297 μ m), 100 (abertura de 150 μ m), 325 (abertura de 4,5 μ m), além de um fundo fechado, como exibido na Figura 17.

Figura 17 – Peneiras com retidos da amostra.



Fonte: elaboração própria.

Após a etapa de peneiramento, as amostras foram submetidas a uma etapa de secagem em estufa a 40 °C por um período de 24 horas a fim de reduzir o teor de umidade e posteriormente armazenadas de forma adequada até sua utilização.

3.1.4. Caracterização físico-química das amostras de resíduo de gesso hidratado

Os ensaios para caracterização química das amostras de resíduo de gesso foram realizados para determinação da composição química, composição mineralógica e do seu comportamento térmico. Todas as análises desta seção foram realizadas em laboratórios da Escola de Química (EQ) da UFRJ.

3.1.4.1. Composição química – fluorescência de raios-X

A amostra de resíduo de gesso hidratado na forma de pó foi caracterizada por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X. Essa técnica permite a identificação e quantificação (semiquantitativa) dos elementos presentes na amostra e foi realizada no Laboratório de Tecnologia do Hidrogênio (LabTech) do Departamento de Processos Inorgânicos (DPI) da Escola de Química com auxílio de um equipamento da marca Rigaku, modelo Primini, dotado de tubo gerador de raios X de paládio. As amostras foram analisadas

na forma de pastilhas. Para o preparo das pastilhas, as amostras foram depositadas e compactadas sobre um porta amostra e vedadas com a ajuda de um filme de polipropileno.

3.1.4.2. Composição mineralógica – difratometria de raios-X

A determinação da composição mineralógica do resíduo de gesso hidratado na forma de pó foi realizada por difratometria de Raios X. As medidas de DRX foram realizadas no LabTech do DPI da EQ empregando-se um difratômetro Rigaku, modelo Miniflex, com aquisição dos dados computadorizada. As medidas foram realizadas à temperatura ambiente ($\approx 25^{\circ}\text{C}$) empregando-se a radiação $K\alpha$ do cobre ($\lambda=1,5418 \text{ \AA}$) com 30 kV de voltagem e corrente igual a 15 mA. Os difratogramas foram adquiridos no intervalo de ângulo de Bragg de $10^{\circ} \leq 2\theta \leq 70^{\circ}$, com passo de $0,05^{\circ}$ e uma velocidade de aquisição de $1^{\circ}/\text{min}$. As fases cristalinas foram identificadas utilizando-se o software JADE® por comparação com as fichas cristalográficas do banco de dados ICDD (Internacional Center for Diffraction Data).

3.1.4.3. Análise termogravimétrica

O comportamento térmico da amostra de resíduo de gesso hidratado foi avaliado empregando-se a análise termogravimétrica. Os experimentos de TG foram realizados no Laboratório de Análises Térmicas (LABAT) do DPI da EQ utilizando-se um equipamento da TA instrument, modelo sdt q600. Os termogramas foram obtidos com taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, sob corrente de nitrogênio ($100 \text{ mL}/\text{min}$), desde a temperatura ambiente até a temperatura final desejada. As perdas de massa foram monitoradas utilizando-se uma termobalança sensível a pequenas variações de massa.

3.2. PREPARO DAS FORMULAÇÕES DE CIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E MECÂNICA

Após o preparo e caracterização do resíduo de gesso hidratados, o material foi enviado a CSN Cimentos, em Volta Redonda, onde foram conduzidos o preparo dos cimentos e os ensaios para caracterização de suas propriedades físico-químicas e mecânica.

3.2.1. Preparo das formulações de cimento Portland CPIII

A comparação do efeito da substituição da gipsita por resíduo de gesso hidratado foi realizada através da produção do cimento Portland CPIII, conforme a receita exibida na Tabela 9.

Tabela 9 – Receitas Base Seca.

Amostras	Escória Alto Forno (%)	Clínquer (%)	Gipsita CSN (%)	Resíduo de Gesso Hidratado UFRJ (%)
CPIII AM01	74,5	23	2,5	0
CPIII AM02	74,5	23	0	2,5

Fonte: dados fornecidos pela CSN.

O estudo de dosagem e mistura dos materiais foi conduzido em escala industrial, realizando a mistura e a moagem em moinho vertical, sob as condições normais de operações da fábrica, como exibido na Tabela 10, sendo o último material adicionado à gipsita para o CPIII AM01, e o resíduo de gesso para o CPIII AM02.

Tabela 10 – Condições de processo para a dosagem do cimento.

MESA		CAMADA X ROLOS		SEPARADOR		FILTRO		MOINHO		Produtividade (t/h)
Potência (Kw)	Corrente (amp)	Altura camada (mm)	Pressão Rolos (bar)	Rotação (%)	Potência (Kw)	Pressão Diferencial-DP (mmCA)	Exaustor (Kw)	Temperatura Gases Entrada (°C)	Temperatura Gases Saída (°C)	
4300	210	18,5	130	75	6,4	6,5	1820	300	105	190

Fonte: dados fornecidos pela CSN.

3.2.2. Caracterizações das formulações de cimento Portland CPIII

Os ensaios descritos a seguir foram realizados no laboratório de ensaios físicos da CSN Cimentos, em Volta Redonda.

3.2.2.1. Análise química

A determinação da composição química dos cimentos foi realizada em espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Panalytical modelo Minipal4, por meio de pastilhas prensadas com ácido esteárico, da marca MERCK, na proporção 9:1 gramas de cimento por ácido esteárico. Foram também realizados os ensaios de perda ao fogo de acordo com a NBR NM 18 e de resíduo insolúvel segundo a NBR NM 15, a fim de avaliar, respectivamente, a quantidade de material orgânico e volátil, e de material insolúvel em ácido presente em uma amostra de cimento.

3.2.2.2. Finura

A finura dos cimentos produzidos foi determinada pelo resíduo de peneiração, por peneira 75 μm , de acordo com a NBR 11579. A determinação da superfície específica foi realizada por meio do método de permeabilidade ao Ar Blaine NBR NM 76 (1998), o qual é baseado na determinação do tempo necessário para a passagem de um volume de ar através de uma amostra compactada de material pulverulento de porosidade conhecida. Determinou-se como faixa de trabalho o intervalo entre 400 e 420 m^2/kg e a medida da superfície específica em permeabilímetro de Blaine automático BSA 1, marca AcmeL.

3.2.2.3. Pasta de consistência normal e tempos de pega

A pasta de consistência normal foi avaliada conforme NBR 16606, através de uma mistura de cimento e água que apresente propriedade reológica constante a se obter através da sonda Tetmajer, um índice de consistência igual a (6 ± 1) mm. Após a determinação supracitada, os tempos de início e final de pega foram determinados segundo NBR NM 65, utilizando a agulha de Vicat Solo teste.

3.2.2.4. Expansibilidade

O ensaio de expansibilidade foi realizado pelo Método das Agulhas de *Le Chatelier*, segundo NBR 11582, para determinação da expansibilidade das pastas de cimento a quente e a frio.

3.2.2.5. Resistência à compressão axial

A resistência à compressão dos cimentos foi avaliada em argamassas de cimento, segundo NBR 7215, para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias de cura. Para os ensaios de resistências à compressão foi utilizada máquina de ensaio de compressão modelo F-25EX-F-CPILOT, Forney, para faixa de trabalho de esforço mecânico de 20 a 1100kN.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

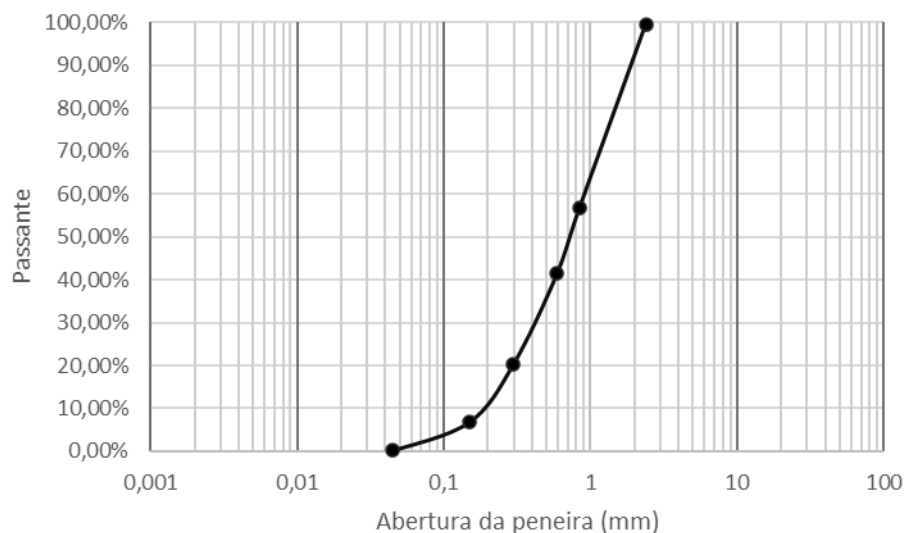
4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO RESÍDUO DE GESSO HIDRATADO

Os resultados apresentados nesta seção são oriundos das análises do resíduo de gesso hidratado realizadas em laboratório da UFRJ, após beneficiamento do material e anteriormente a sua entrega a CSN.

4.1.1. Análise do tamanho de partícula

Os resultados obtidos a partir do peneiramento e pesagem das frações granulométricas foram representados graficamente na Figura 18.

Figura 18 – Distribuição granulométrica das amostras de resíduos de gesso.



Fonte: elaboração própria

A análise granulométrica da amostra revelou que a granulometria média obtida foi de 0,57 mm. A CSN solicitou uma granulometria média inferior a 2 mm, sendo 90% dos grãos inferior, o que indica que a amostra está dentro dos parâmetros estabelecidos. Cabe ressaltar que o cumprimento das especificações é essencial para garantir a qualidade do material a ser utilizado, sem interferir a finura do cimento final e assim a demanda de água. Sendo assim, o resíduo atendeu o tamanho especificado para a produção garantindo a reatividade ideal de gesso para a produção de cimento.

Destaca-se também a baixa presença de materiais superfinos na amostra, representando menos de 0,20% do peso total da amostra inicial. Este resultado é positivo, pois

as concentrações de materiais superfinos podem comprometer a trabalhabilidade e as propriedades do produto final.

4.1.2. Composição química – fluorescência de raios-X

A composição química dos resíduos de gesso hidratado determinada por FRX é apresentada na Tabela 11. Verifica-se uma elevada pureza do resíduo de gesso hidratado, com presença majoritária de CaO (48,4%) e SO₃ (45,8%), totalizando 94,2%. Este resultado já era esperado, uma vez que este resíduo era constituído, em maior parte, de gesso na forma diidratada (CaSO₄.2H₂O), apresentando uma composição química próxima do gesso comercial que deu origem a este resíduo. Observou-se também a presença de pequenas quantidades de outros componentes, tais como o MgO e SiO₂, que pode ser atribuída à utilização do gesso na prática de colagem de barbotina ou da composição do próprio gesso comercial utilizado nas aulas práticas.

Tabela 11 – Composição química da amostra de resíduo de gesso hidratado obtida por FRX.

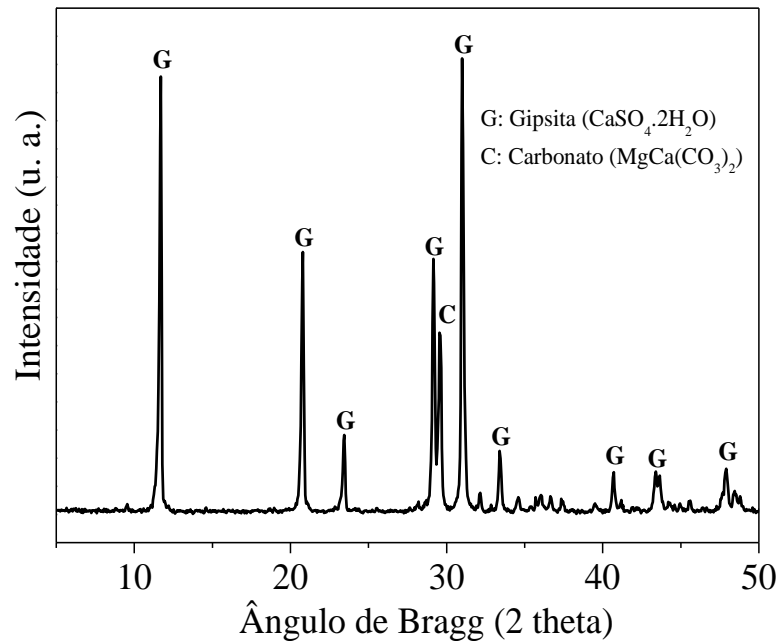
	SiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)
Resíduo de gesso hidratado	2,3	48,4	3,5	45,8

Fonte: dados fornecidos pelo LabTech.

4.1.3. Composição mineralógica - difratometria de raios-X

O perfil de difração obtido para o resíduo de gesso hidratado é apresentado na Figura 19. Os resultados mostraram que os picos de difração de maior intensidade são encontrados em $2\theta = 11,6^\circ$; $20,7^\circ$; $23,4^\circ$; $29,1^\circ$; $31,1^\circ$ e $33,3^\circ$, correspondentes aos planos (0 2 0), (0 2 1), (0 4 0), (0 4 1), (-2 2 1) e (1 5 0), respectivamente. Todos esses picos são característicos da gipsita (CaSO₄.2H₂O). Esses resultados estão de acordo com os obtidos por FRX e indicam uma alta incidência de diidratos. Um pico de menor intensidade localizado em $2\theta = 29,5^\circ$ pode ser associado à presença de carbonatos, que foi confirmado por TG conforme será mostrado na sequência.

Figura 19 – Resultado do DRX da amostra de resíduo de gesso hidratado.



Fonte: dados fornecidos pelo LabTech.

4.1.4. Análise termogravimétrica

O comportamento térmico do resíduo de gesso hidratado foi investigado e as curvas de TG e DTG são mostradas na Figura 20. Os resultados mostraram que a curva de TG pode ser dividida em duas regiões distintas de perda de massa: a primeira perda (~13%) ocorreu em temperaturas entre 80 e 190 °C e pode ser atribuída à água de hidratação, que é característico da presença de diidrato, como indicado na Equação 18. Além disso, nenhuma perda de massa foi registrada antes de 100 °C, indicando a ausência de água livre na amostra. Este resultado confirma que a etapa de secagem a 40 °C por 24 horas realizada durante o beneficiamento foi eficaz.

A segunda perda de massa (~15%), que ocorreu entre 600 e 800 °C, pode ser associada à decomposição do carbonato de cálcio (CaCO₃) existente no gesso, a qual também é caracterizada pelo respectivo pico DTG. O CaCO₃ encontrado no gesso deve-se às impurezas do mineral gipsita ou ao uso do carbonato como aditivo (PINHEIRO 2011; NETO, 2019).

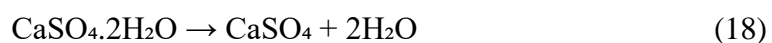
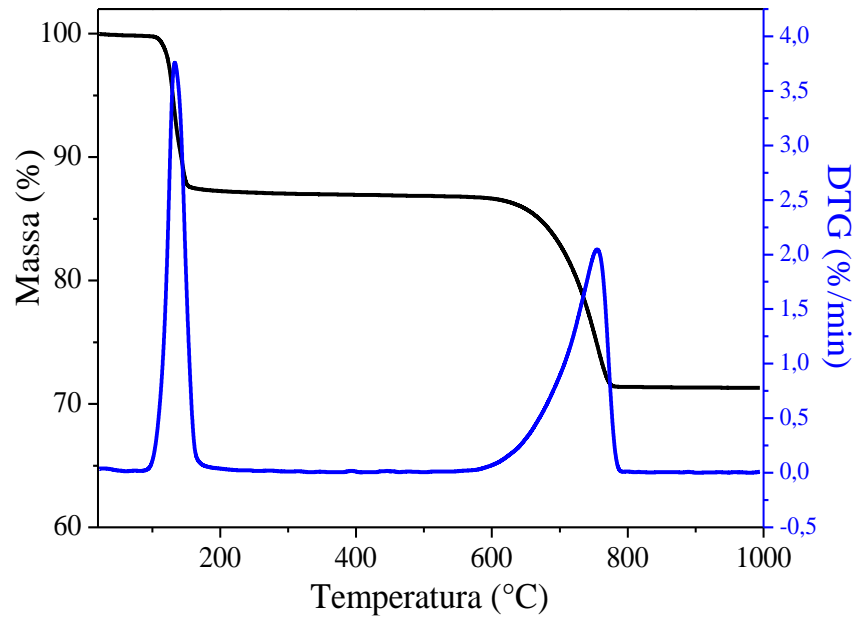


Figura 20 – TG realizado em amostra seca de resíduo de gesso reciclado.



Fonte: dados fornecidos pelo LABAT.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DO CIMENTO CPIII

4.2.1. Gipsita

A gipsita utilizada pela CSN em Volta Redonda é oriunda de Oricuri e é transportada por via rodoviária até a fábrica. A Figura 21 representa o mineral presente no laboratório de análises químicas da indústria.

Figura 21 – Gipsita utilizada pela CSN.



Fonte: elaboração própria.

Foi realizada análise da composição química por FRX da gipsita que foi utilizada neste estudo na produção do cimento CPIII AM01 e os resultados obtidos estão expressos na Tabela 12.

Tabela 12 – Composição química da gipsita utilizada pela CSN.

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)
Gipsita	1,3	0,44	32,18	0,44	45,12

Fonte: dados fornecidos pela CSN.

4.2.2. Clínquer

O clínquer utilizado é produzido pela CSN em sua unidade de Arcos/MG e chega à fábrica de moagem de Volta Redonda/RJ por via ferroviária. O percentual de calcário e argila utilizados na produção do clínquer podem variar de acordo com suas composições. A Figura 22 apresenta o material presente no laboratório da CSN em Volta Redonda e a composição do clínquer que foi utilizado neste trabalho pode ser vista posteriormente na Tabela 13.

Figura 22 – Clínquer utilizado pela CSN.



Fonte: elaboração própria.

4.2.3. Escória de alto forno

Na siderúrgica da CSN em Volta Redonda, a escória gerada pela produção de ferro gusa no próprio complexo industrial é transportada por via rodoviária até a fábrica de cimento próxima. A composição da escória que foi utilizada também está descrita na Tabela 13.

Tabela 13 – Composição química do clínquer e da escória de alto forno utilizados.

Matéria-Prima	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO₃ (%)	Na₂O (%)	K₂O (%)	CaO L (%)
Escória Alto-Forno	42,15	11,18	0,66	38,66	5,88	0	0	0	0
Clínquer Portland	22,55	4,80	2,36	64,55	2,91	1,65	0,33	1,36	1,22

Fonte: dados fornecidos pela CSN.

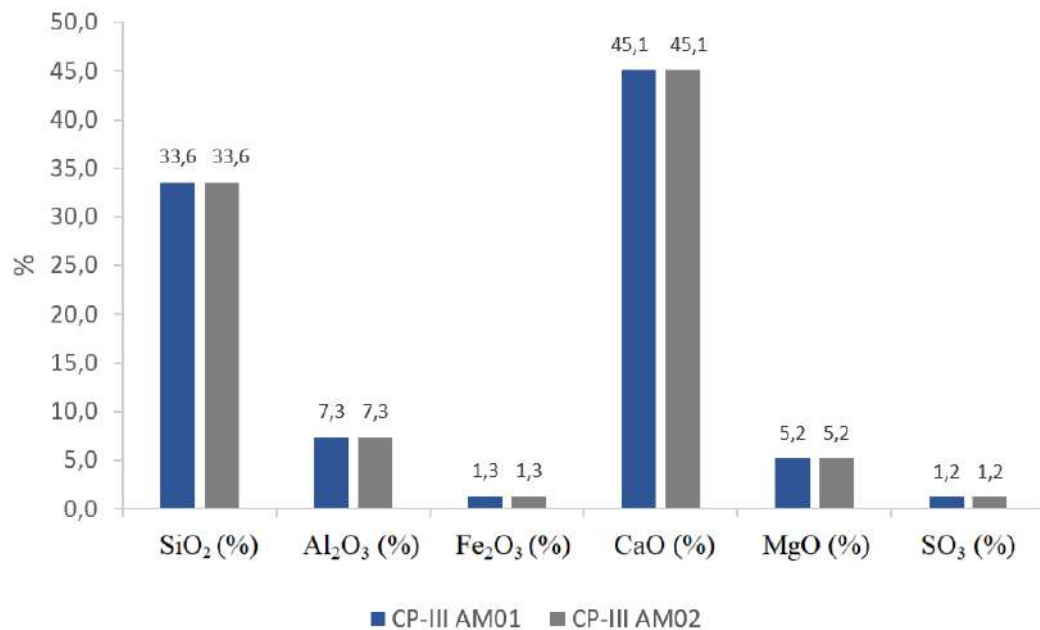
4.3. CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados das análises realizadas nas instalações da CSN das duas amostras de cimentos Portland tipo CPIII 32 RS, produzidas conforme descrito na seção 3.1.5.

4.3.1. Análise química

A Figura 23 apresenta os resultados da caracterização química realizada por FRX do cimento de referência (CPIII AM01) e do cimento contendo o resíduo de gesso (CPIII AM02), produzidos neste estudo.

Figura 23 – Resultado da caracterização química das amostras de cimento CPIII 32 RS produzidas.



Fonte: dados fornecidos pela CSN.

Foram obtidos percentuais idênticos para ambos os cimentos e os principais constituintes correspondem ao CaO, SiO₂, Al₂O₃ e MgO. O anidrido sulfúrico (SO₃), segundo limites normativos da NBR 16697, não deve ultrapassar 4,5% no cimento tipo CPIII. Esta medida está relacionada à quantidade de sulfato de cálcio presente no cimento para atuar como controlador de pega, bem como quanto ao excesso de sulfato que pode levar à formação expansiva de etringita na matriz de cimento. Dessa forma, além de ambas as amostras produzidas se enquadrarem nos requisitos da Norma, podemos notar que a utilização do resíduo de gesso hidratado no lugar da gipsita não apresentou alterações quanto à composição química.

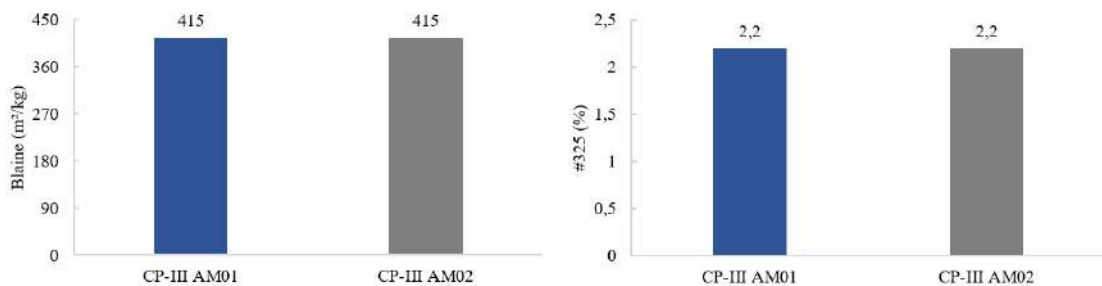
O mesmo comportamento foi observado para as análises de perda ao fogo (P.F.) e resíduo insolúvel. A perda ao fogo foi equivalente a 0,95%, notoriamente inferior ao limite estabelecido pela norma, 6,5% em massa para o cimento CPIII. Enquanto o resíduo insolúvel foi 0,83%, e a norma determina que não ultrapasse 5,0%. Apesar de identificada a fase

carbonato de cálcio no resíduo de gesso, o percentual de adição na composição final do cimento, não gerou alterações significativas na P.F.

4.3.2. Finura e superfície específica

Os resultados de finura e superfície específica foram idênticos para os cimentos contendo o resíduo de gesso (CPIII AM02) e o cimento de referência (CPIII AM01). É importante destacar que os resultados permaneceram dentro da faixa de Blaine pré-definida, entre 400 e 420, e o percentual de cimento retido em peneira 325 mesh foi inferior a 2,5%, como limitado pela NBR 16697. Ambas as amostras atenderam a esses critérios, encontrando-se dentro das especificações esperadas, o que se espera refletir na determinação de consistência normal quanto a demanda de água pelos cimentos. A Figura 24 apresenta ambos os resultados obtidos.

Figura 24 – Resultados da determinação da (A) da área específica Blaine e (B) finura em peneira 325#



Fonte: dados fornecidos pela CSN.

4.3.3. Tempo de pega

Os valores do tempo de início e fim da pega para as duas amostras são apresentados na Figura 25.

Figura 25 – Tempo de início de fim de pega das amostras de cimento CPIII 32 RS produzidas.



Fonte: dados fornecidos pela CSN.

O tempo para início da pega é requisito estipulado pela NBR 16697 e deve ser de, no mínimo, 60 minutos. Já o final da pega é uma determinação facultativa presente na mesma norma e a sugestão é que não ultrapasse 720 minutos. Como é possível observar na Figura 25, apesar do cimento CPIII AM02 ter apresentado um ligeiro acréscimo em ambas medidas, os dois cimentos satisfazem os requisitos da norma. Acredita-se que o ligeiro acréscimo observado nos tempos de início e final de pega de CPIII AM02 esteja relacionado com a presença do carbonato de cálcio na composição do resíduo de gesso, isto pois o material apresenta baixa solubilidade em água, podendo provocar um retardo nas reações de hidratação.

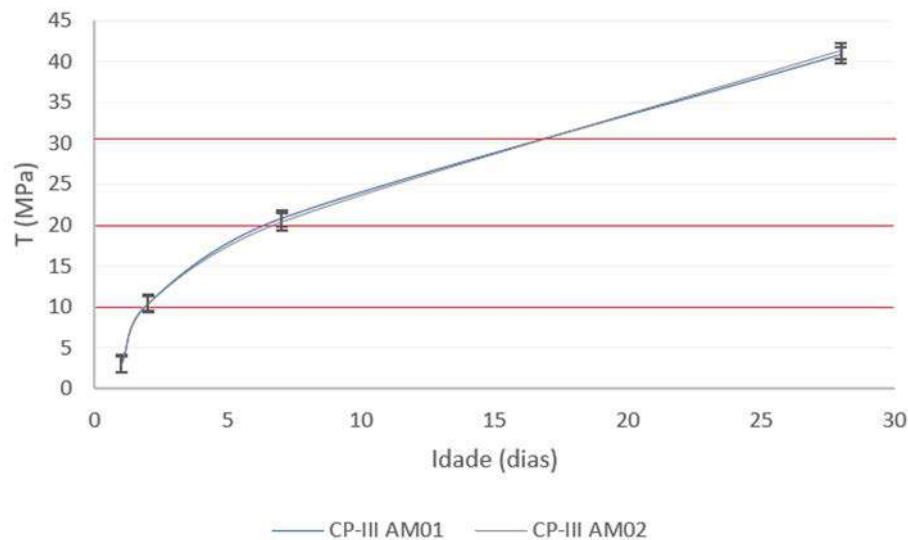
4.3.4. Expansibilidade

Apesar da NBR 11582 limitar a expansibilidade em no máximo 5mm, tanto para os ensaios de expansibilidade a quente, quanto a frio, não foi observada a abertura das agulhas de *Le Chatelier*.

4.3.5. Resistência à compressão axial

A Figura 26 apresenta os resultados de resistência à compressão para as argamassas de cimento nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias.

Figura 26 – Resultados de análise de resistência à compressão axial das amostras de cimento CPIII 32 RS produzidas.



Fonte: dados fornecidos pela CSN.

Para o cimento Portland tipo CPIII classe 32, a Norma ABNT NBR 16697 não determina um requisito para resistência à compressão na idade de 1 dia. No entanto, a referida norma determina que para as idades de 3, 7 e 28 dias os valores mínimos obtidos devem ser respectivamente 10, 20 e 32 MPa. Os dois cimentos respeitam as exigências normativas, e apresentam desempenho mecânico semelhante ao longo de todas as idades. Isto corrobora os demais resultados, e demonstra que o uso do resíduo não interferiu na reatividade do cimento, não gerando prejuízo ao seu desenvolvimento de resistência mecânica.

4.4. DADOS DA VISITA TÉCNICA

A fim de compreender e aprofundar o conhecimento sobre o processo produtivo de uma fábrica de cimento, bem como os efeitos e demandas relacionados a suas matérias-primas, em principal o sulfato de cálcio hidratado, foi realizada uma visita técnica à fábrica de cimentos da Companhia Siderúrgica Nacional, em Volta Redonda. Sendo assim possível discutir as principais características concernentes a produção e ao mercado do cimento.

Algumas informações corroboram os dados obtidos na literatura, outras estão ligadas a características muito específicas do processo produtivo e da obtenção de matérias-primas da empresa em questão. Todas as informações foram obtidas em discussão com o supervisor da garantia da qualidade da CSN Cimentos, realizada durante a visita à planta.

A visita abrangeu as instalações industriais, a familiarização com matérias-primas utilizadas pela empresa na produção de cimento Portland, as diversas operações unitárias

fundamentais ao processo produtivo e os ensaios físico-mecânicos de controle de qualidade do cimento produzido desenvolvidos no Laboratório de Controle de Qualidade – mesmos ensaios conduzidos neste trabalho para caracterização do cimento.

4.4.1.A CSN Cimentos

A Companhia Siderúrgica Nacional é uma multinacional brasileira que atua nos setores de siderurgia, mineração, logística, cimento e energia. Foi fundada em 1941 e iniciou suas operações em 1946, marcando o pioneirismo na produção de aços planos no Brasil. A CSN apresenta, entre seus ativos, uma usina siderúrgica integrada, cinco unidades industriais, sendo três delas no Brasil e duas no exterior, minas de minério de ferro, calcário, dolomita e estanho, terminais portuários, distribuidora de aços planos, além de participações em ferrovias e em quatro hidrelétricas. Para tanto, possui mais de 30 mil colaboradores.

O cimento passou a ser produzido pela Companhia em 2009 dentro da Usina Presidente Vargas (UPV), em Volta Redonda, onde foi construída a unidade da CSN Cimentos de Volta Redonda. A produção foi motivada por ser uma possível destinação de um dos subprodutos do processo de fabricação do ferro gusa presente nessa unidade, a escória granulada de alto forno. Em 2015, iniciou a operação na fábrica de Arcos, em Minas Gerais. Nesta planta está presente uma mina de calcário e é onde ocorre a fabricação do clínquer, o qual é transportado para a UPV, misturado e moído com demais matérias-primas para a obtenção do produto final, o cimento. Estas duas unidades estão relacionadas por malhas rodoviárias e ferroviárias. Em 2016, foi possível dobrar a capacidade produtiva da unidade de Arcos ao inaugurar-se a segunda unidade de moagem e a tornar uma fábrica integrada isoladamente, no entanto, ainda responsável por fornecer clínquer à unidade de Volta de Redonda, a qual é uma unidade de moagem.

Os cimentos produzidos pela CSN Cimentos são os cimentos ensacados do tipo CPIIE-32, CPIIF-32 e CPIII-32 RS e a granel do tipo CPIIE-40 e CPIII-40 RS, com uma resistência mínima de 32 e 40 MPa. De acordo com a Norma NBR 16697, os cimentos do tipo CPIII possuem relativamente alta proporção de escória de alto forno em sua composição, podendo variar entre 35 e 75%. Enquanto o CPII-F não possui nenhuma quantidade de escória presente e o CPII-E apresenta valores relativamente baixos, entre 6 e 34%. Por outro lado, estes dois tipos de CPII apresentam maiores proporções de clínquer junto ao sulfato de cálcio, sendo de 51 a 94% para o CPII-E e 75 a 89% para o CPII-F, indo contra a faixa de 25 a 65% destes compostos no CPIII. Desta forma, há uma grande vantagem econômica e ambiental

para a unidade de Volta Redonda devido à presença nesta planta também da fábrica de aço, capaz de fornecer a escória.

Em 2022, a Companhia Siderúrgica Nacional anunciou a aquisição da LafargeHolcim (Brasil) S.A, pela sua controlada CSN Cimentos. A operação adiciona uma capacidade produtiva de 10,3 milhões de toneladas por ano à da Companhia, a consolidando como a segunda maior cimenteira do Brasil. A LafargeHolcim Brasil, agora chamada CSN Cimentos Brasil S.A, já possuía um parque industrial com cinco plantas integradas de produção de cimento, quatro estações de trituração, 19 unidades de mistura de concreto, distribuídas entre os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo, Espírito Santo, Bahia, Paraíba e Goiás, além de sete áreas de mineração de agregados, como argila e calcário, majoritariamente localizadas em Minas Gerais (Brasil Mineral, 2022; Mercado&Consumo, 2021).

4.4.2. O processo produtivo

A visita à fábrica de cimentos da CSN Cimentos em Volta Redonda, proporcionou a oportunidade para compreender o processo de produção de cimento de uma fábrica de moagem, bem como quais técnicas são utilizadas para assegurar a qualidade das matérias-primas e do produto final.

Construída dentro da UPV, a fábrica se beneficia da proximidade para facilitar o transporte da escória de alto forno, que será utilizada na produção do cimento. Com um *layout* relativamente compacto, a fábrica de Volta Redonda, desempenha o papel de moagem e mistura das matérias-primas: gipsita, clínquer, calcário e escória de alto forno. A organização física da planta fabril é exibida na Figura 27.

Figura 27 – Planta 3D: Processo produtivo do cimento.



Fonte: CSN

Com exceção da escória de alto forno, produzida nos arredores da fábrica, as matérias-primas são levadas à CSN Cimentos por malha rodoviária e ferroviária. A gipsita é transportada do município de Ouricuri, em Pernambuco, até Volta Redonda, enquanto o clínquer é transportado por malha ferroviária, juntamente com o calcário, ambos oriundos de Arcos. As matérias-primas são armazenadas no galpão de matérias-primas formando grandes pilhas de homogeneização, o clínquer por outro lado é enviado aos silos de clínquer, garantindo que o material não sofra mudanças de sua composição química e mineralógica.

As matérias-primas são transportadas e dosadas por esteiras e balanças dosadoras para alimentar os moinhos verticais, onde são realizadas de maneira simultânea as operações de secagem da escória, mistura e moagem dos constituintes do cimento e classificação granulométrica do cimento.

O uso dos moinhos verticais representa uma importante inovação tecnológica no processo de produção de cimento, que substitui a convencional moagem em moinho de bolas. Isto pois, o moinho vertical possui um mecanismo de moagem altamente eficiente, que reduz de maneira precisa e homogênea o tamanho das partículas em comparação ao moinho de bolas. Além disso, emprega-se ar aquecido para secar materiais úmidos e suspender as partículas de granulometria desejada, garantindo uma distribuição uniforme do tamanho das partículas no produto final. O retorno das partículas que não atingiram o tamanho desejado ao moinho para serem moídas novamente contribui para a obtenção da granulometria adequada.

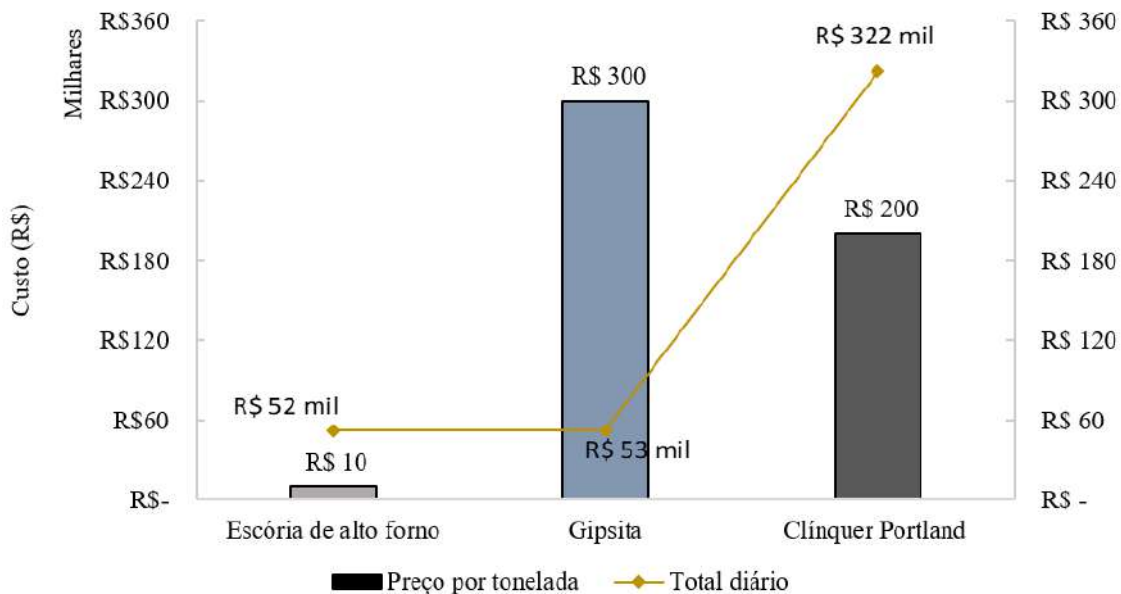
Essa tecnologia traz benefícios significativos, incluindo maior eficiência energética, baixo ruído em comparação a outros moinhos, menor geração de calor nas paredes devido ao atrito, redução de custos operacionais, melhoria na qualidade do cimento produzido e menor exigência de espaço físico para a disposição do equipamento.

Retornando ao processo, após a moagem o cimento já atende a todas as exigências normativas e é enviado aos silos de cimento, onde é armazenado. Nesta etapa, o cimento pode tanto ser enviado para o prédio de ensacadeiras, onde é ensacado em sacos de papel *kraft* de múltiplas folhas, a fim de proteger o cimento da umidade, contendo 50 kg de cimento/saco e então ser escoado para o mercado, ou pode ser vendido a granel, sendo diretamente descarregado em caminhões betoneira, em seu estado bruto, para uso no preparo de concretos.

Ao longo de todo o processo, diversas propriedades são controladas para garantir que sejam alcançadas as exigências normativas do cimento, tais como resistência à compressão, tempo de pega, expansibilidade, resíduo insolúvel, dentre outras. Isto pois, o cimento é um dos poucos materiais comercializados que suas propriedades são confirmadas após a venda. Torna-se, desta forma, imprescindível que ao longo de todo o processo, os parâmetros de produção e as condições como finura e composição química do cimento sejam conhecidas e rigorosamente controladas, a fim de garantir que o produto esteja em conformidade. Desta forma são coletadas em média 10 amostras de cimento ao longo de todo dia de produção para a execução dos ensaios laboratoriais.

Estima-se que a Companhia Siderúrgica Nacional produza cerca de 7 mil toneladas de cimento por dia, contendo cerca de 2,5% de gipsita na composição. Com um custo de transporte estimado em R\$ 300 por tonelada de gipsita, compreende-se que a empresa tem um custo de quase R\$ 53 mil por dia com esta matéria-prima. Já o clínquer Portland, produzido em Arcos e transportado por malha ferroviária, apresenta um valor de aproximadamente R\$ 200 por tonelada. Enquanto a escória de alto forno, por ser produzida dentro da própria UPV, custa R\$ 10 por tonelada. Sendo assim, a gipsita é o composto mais caro por volume adquirido, e sua logística de fato onera o processo, pois além de ser proveniente de Ouricuri – PE, é transportada exclusivamente pelo modal rodoviário. A Figura 28 resume os gastos com matérias-primas da unidade de Volta Redonda, onde são apresentados os custos em reais por tonelada de cada matéria-prima e o custo total de um dia de produção, considerando as 7 mil toneladas diárias e a composição apresentada na Tabela 9.

Figura 28 – Custo das matérias-primas do cimento Portland por tonelada adquirida e para suprir a produção diária na unidade CSN em Volta Redonda.



Fonte: dados fornecidos pela CSN.

4.4.3. Experiência na utilização de resíduos de gesso hidratado

Durante a visita técnica à CSN Cimentos, discutiu-se sobre experiências anteriores da fábrica no emprego de resíduos de gesso na fabricação do cimento. Além de relevante à questão ambiental de reaproveitamento do resíduo, há uma relação econômica bastante significativa, uma vez que para esta unidade a aquisição do mineral ultrapassa os gastos com o próprio clínquer.

Como discutido previamente (vide 2.2.3.1), através das informações coletadas na literatura, algumas limitações quanto à reutilização dos resíduos de gesso são facilmente identificadas e compreendidas, tais como a qualidade e pureza do resíduo, a composição química e mineralógica e a quantidade de material gerado. As mesmas questões foram apontadas pela fábrica quanto às experiências prévias.

Apesar das empresas que forneceriam o resíduo de gesso se localizarem nos estados do RJ e SP, as vantagens econômicas acerca do custo de transporte não sobrepujam possíveis prejuízos com manutenção de equipamentos e a qualidade do produto. Isto pois, para que o resíduo seja passível de utilização na produção de cimento, o processo de beneficiamento realizado pela empresa recicladora deve ser tal que garanta a remoção de resíduos de papel, papelão, fragmentos de madeira, plásticos e metais, bem como esteja em uma granulometria que tanto garanta a remoção dos resíduos indesejados, quanto não altere a

finura do cimento. Obviamente, todas as operações necessárias para que estas características sejam alcançadas tendem a elevar o valor do resíduo. Essa afirmação corrobora as informações levantadas por muitos pesquisadores, e afirma as vantagens econômicas e técnicas do uso da gipsita nacional.

Frente às questões envolvendo um beneficiamento inadequado, a fábrica enfrentou problemas durante o uso do resíduo devido ao entupimento de equipamentos, dada a presença de contaminantes como o papel, o que demandou a execução de paradas não programadas para limpeza, onerando o processo.

Em relação à homogeneidade da composição, observou-se nos cimentos produzidos com o resíduo de gesso a ocorrência do fenômeno chamado "falsa pega", que consiste na perda prematura de plasticidade do cimento no estado fresco. Este fenômeno está associado à redução da disponibilidade de água de amassamento, que neste caso, pode ser justificado pelo uso de fases anidras ou hemidratadas de sulfato de cálcio, que quando misturados à água tendem a consumir parte da água de amassamento para a sua hidratação. A presença destas fases pode ser justificada pelo tipo de resíduo utilizado, em termos de origem do mesmo, mas também pelo processo de beneficiamento ao qual foi submetido, uma vez que as etapas de fragmentação (britagem e moagem) tendem a liberar calor em função do atrito gerado entre as partículas, e assim promover a perda de água do sulfato de cálcio. Vale ressaltar que a empresa destacou que o resíduo de gesso fornecido era essencialmente resíduo da construção civil, da produção de moldes e de peças de gesso, sendo esta uma vantagem importante uma vez que não há a presença de contaminantes químicos como ocorre no fosfogesso.

Outro fator relevante na operacionalização desse tipo de projeto é a manutenção do fornecimento de quantidade suficiente do resíduo para a produção. Esta se mostrou ser uma das maiores limitações do uso do resíduo, sob o entendimento da CSN Cimentos, pois a quantidade gerada sofria grandes oscilações, o que dificulta para a empresa recicladora garantir o fornecimento contínuo e com características homogêneas para o emprego na produção de cimento, bem como, compromete o planejamento da fábrica quanto à aquisição de material e à qualidade das matérias-primas.

É importante reforçar que os projetos da CSN Cimentos com resíduos de gesso não prosseguiram, mas foram úteis para demonstrar quais impedimentos devem ser corrigidos e as exigências que devem ser mantidas para a aquisição do resíduo em novas oportunidades.

5. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos neste trabalho, é possível concluir que o resíduo de gesso hidratado pode ser utilizado em substituição total à gipsita na produção de cimento Portland CPIII. Para esta finalidade, é importante atentar e realizar as etapas de beneficiamento do resíduo obtido, pois assim será possível a obtenção de um material de características próximas ao mineral extraído de jazidas.

No que diz respeito às análises realizadas no resíduo de gesso hidratado, a avaliação do tamanho das partículas, por exemplo, revelou que é viável transformar peças de resíduo de gesso hidratado em um material com a granulometria adequada para a produção de cimento Portland CPIII, mediante o tratamento apropriado. Além disso, as análises FRX e DRX confirmaram a pureza do material e sua forma diidratada. Na análise de TG foi possível verificar a presença de carbonato de cálcio, que seria uma impureza da gipsita, no entanto, não acarretou variações significativas ou prejudiciais nos resultados obtidos nas amostras de cimento produzidas.

Nas análises realizadas nos produtos de cimento Portland CPIII produzidos e nas comparações feitas entre a amostra com gipsita e a com resíduo de gesso hidratado, foi possível identificar na análise química, por exemplo, que a substituição da gipsita pelo resíduo em questão não acarreta mudanças na composição do produto final. Além desta, as análises de resíduo insolúvel, finura, superfície específica e expansibilidade também apresentaram resultados idênticos entre as duas amostras.

A análise de perda ao fogo foi idêntica entre as duas amostras mesmo com a presença de carbonato de cálcio citada anteriormente, que por ser um material orgânico poderia influenciar no resultado. No entanto, já para a avaliação do tempo de pega, esta presença de carbonato de cálcio pode explicar o acréscimo nos tempos de início e fim de pega para a amostra produzida com o resíduo.

Em suma, todos os resultados das análises físico-químicas feitas estão de acordo com a Norma NBR 16697 e com os padrões da fábrica. Ainda, sem apresentar divergências mesmo com o passar do tempo, como pode ser observado nos testes de resistência à compressão axial que são feitos nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias.

É crucial ressaltar que os resultados obtidos nesta pesquisa são aplicáveis apenas a gessos com alto grau de pureza, semelhante ao material que foi objeto desta investigação. A pureza do gesso desempenha um papel fundamental na eficácia e na conformidade dos processos de substituição. Portanto, as conclusões apresentadas aqui estão estritamente

relacionadas às amostras de gesso utilizadas neste estudo específico. Qualquer variação na pureza do gesso pode implicar em resultados diferentes, e, portanto, é essencial considerar essa ressalva ao aplicar os achados deste estudo em contextos distintos.

A substituição proposta neste estudo possui vantagens tanto para o meio ambiente quanto para a empresa que a praticar. Para o meio ambiente, pode-se citar como principais vantagens a preservação de recursos naturais, prolongando a vida útil das jazidas de onde são extraídas a gipsita e reduzindo o impacto ambiental e a redução do volume de resíduos gerados e descartados, podendo conseqüentemente diminuir a necessidade de aterros. Para a empresa produtora de cimento, haverá a redução nos gastos com transporte da gipsita e uma melhoria em sua visibilidade externa, ao se aproximar e se preocupar com questões ambientais.

No entanto, é importante considerar algumas limitações que podem surgir ao implementar essa prática. Primeiramente, há a necessidade de encontrar fornecedores confiáveis capazes de suprir a demanda de resíduo de gesso hidratado na proporção necessária para a produção de cimento. Além disso, é crucial avaliar a viabilidade técnica e econômica de adaptar o processo de beneficiamento do resíduo de gesso hidratado descrito neste estudo em escala industrial, levando em conta os custos envolvidos e a eficiência do processo.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, há fatores que não foram tratados como foco no presente estudo, porém merecem a devida análise de seus impactos, como por exemplo:

- Buscar fornecedores capazes de suprir a demanda de resíduo de gesso hidratado na proporção da produção de cimento;
- Avaliar viabilidade técnica e econômica de adaptar o beneficiamento do resíduo de gesso hidratado descrito em escala industrial;
- Elaborar formas efetivas para triagem do resíduo de gesso hidratado e avaliar se é mais vantajoso ser realizada pelo fornecedor ou pela fábrica de cimento consumidora.

7. REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 11582: **Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier** Rio de Janeiro, 1991.
- ABNT. NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT. NBR NM 76: **Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).** Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT NBR 13207: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13207: Gesso para construção civil - Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ABNT NBR 16697: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ABNT NBR 10007: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10007: Amostragem de resíduos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ABNT NBR 18: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 18: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ABNT NBR 15: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15: Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ABNT NBR 11579: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11579: Determinação do índice de finura de cimento Portland com o emprego da peneira 75 µm (nº 200).** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ABNT NBR 16606: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16606: Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ABNT NBR 65: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 65: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ABNT NBR 10004: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- AGUIAR, Gerusa. **Estudos de argamassas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção.** 2004. 282 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- AIRES, Kênia Gomes. **Aplicação industrial do resíduo de peças pré-moldadas de gesso na produção de cimento Portland.** 2015. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.
- ALMEIDA, Kelson Silva; SOARES, Roberto Arruda Lima; MATOS, José Milton Elias. Efeito de resíduos de gesso e de granito em produtos da indústria de cerâmica vermelha: revisão bibliográfica. **Revista Matéria**, Piauí, v. 25, n.01. 2020.

ANGULO, Sérgio Cirelli e ZORDAN, Sérgio Eduardo e JOHN, Vanderley Moacyr. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. 2001, Anais. São Paulo: IBRACON, 2001.

ANTUNES, Maria Lucia. *et al.* **Utilization of gypsum from construction and demolition waste in Portland cement mortar**. Cerâmica, v.5 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106)

Associação Brasileira de Drywall. (s.d.). **Sustentabilidade**. Disponível em: <https://drywall.org.br/sustentabilidade/> Acesso em: 13 Jul. 2023

BALTAR, Carlos Adolpho Magalhães; BASTOS, Flavia de Freitas; LUZ, Adão Benvindo. **Rochas & Minerais Industriais**. 2ed. CETEM - Centro de Tecnologia Mineral. 2005.

BALTAR, Carlos Adolpho Magalhães; BASTOS, Flavia de Freitas; BORGES, Lucila Ester Prado. **Variiedades mineralógicas e processos utilizados na produção dos diferentes tipos de gesso**. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

BARBOSA, Amanda Alves; FERRAZ, Andréa de Vasconcelos; SANTOS, Geovani Alves. **Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso β obtido do pólo do Araripe**. 2014. Cerâmica(356), 60:501-508. Bahia, 2014.

BARROS, Jordânia Souza. **Viabilidade da reutilização dos resíduos de gesso advindos da construção civil para aplicação na indústria cimenteira**. 2010. 41p. Monografia (Especialização em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

CAVALCANTI, Leonardo Barbosa. **Determinação de Condições Operacionais Adequadas na desidratação do minério de gipsita para obtenção de um gesso beta reciclável**. 2006. 69p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2006.

CHANDARA, Chea; AZIZLI; Khairun Azizi Mohd; AHMAD; Zainal Arifin. **Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in Portland cement**. Waste Management, v.29, p1675-1679, 2009.

Companhia Siderúrgica Nacional – CSN. **Eu Entendo de Cimento: Apostila de Cimentos**. 2021.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução CONAMA nº 307**. 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução CONAMA nº 431**. 2011.

COSTA, Fernanda Nepomuceno. **Valorização do resíduo de construção civil por meio de sua incorporação ao processo de clínquerização**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Instituto de Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.

COUTINHO, Joana de Sousa. **Ciência de Materiais – 1ª parte**. p. 65-88. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2002

DANTAS, Rafael. Ferrovia Transnordestina: Um novo corredor de exportação. **Revista Algomais**, 2 de abril de 2023. Disponível em: https://revista.algomais.com/especial_ferrovia_5/ Acesso em: 18 jun. 2023.

GAMA, Samara Cintia Alves. **Análise do Gerenciamento dos Resíduos de Gesso da Construção Civil no Município João Pessoa-PB**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

GAZQUEZ, Manuel *et al.* Evaluation of the use of TiO₂ industry red gypsum waste in cement production. **Cement & Concrete Composites**. Espanha, v.37 p. 76–81, 2013.

GOBBO, Luciano de Andrade. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld**. 2003. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

GOBBO, Luciano de Andrade. **Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de Cimento Portland**. 2009. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

Instituto de Geociências - USP. **Gipsita**. Didático. Disponível em: <<https://didatico.igc.usp.br/minerais/sulfatos/gipsita/>>. Acesso em: 09 mai. 2023.

International Energy Agency. **Cement**. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/industry/cement> Acesso em: 23 set. 2023

LAFARGEHOLCIM SE CHAMARÁ CSN CIMENTO BRASIL. **Brasil Mineral**, São Paulo, 10 de setembro de 2022. Cimento. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/lafargeholcim-se-chamara-csn-cimentos-brasil> Acesso em: 13 Out. 2023.

LAFARGEHOLCIM VENDE OPERAÇÃO LOCAL À CSN POR US\$ 1,025 BI. **Mercado e Consumo**, 10 de setembro de 2021. Economia. Disponível em: <https://mercadoeconsumo.com.br/10/09/2021/noticias/lafargeholcim-vende-operacao-local-a-csn-por-us-1025-bi/?cn-reloaded=1> Acesso em: 12 Out. 2023

Ministério de Minas e Energia. **Anuário Estatístico: Setor de Transformação de Não-Metálicos**. 2006 – BRASÍLIA: SGM, 2020.

Ministério De Minas E Energia. **Anuário estatístico: setor de transformação de não metálicos**. 1995 – BRASÍLIA: SGM, 2021. Disponível em:

MEHTA, Povidar Kumar; MONTEIRO, Paulo Jose Melarragno. **Concrete: Microstructure, Properties, and Material**. 3ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

NETO, Lucas Gomes Padilha. **Desenvolvimento de Metodologia para Reciclagem do Resíduo de Gesso gerado nas Práticas de Processos Inorgânicos Experimentais**. 2019. 45 p. Monografia (Graduação em Química Industrial) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

NOGUEIRA, Denise Vanderlei *et al.* Reutilização do resíduo de gesso da construção civil como insumo no processo de fabricação do cimento. **Revista Ambiental**, Paraíba, v.1 n.2, p. 55-65, Abr/Jun, 2015.

OLIVEIRA, Thamires Rodrigues *et al.* **Avaliação da utilização de resíduos incorporados ao clínquer portland: revisão sistemática**. In: **Anais do V Simpósio Internacional de Inovação e Tecnologia**. São Paulo: Blucher, 2019.p. 81-89.

PINHEIRO, Sayonara Maria de Moraes. **Gesso reciclado: avaliação de propriedades para uso em componentes**. 2011. 304p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

RAMOS, Etiene. GypWay Holding reúne mineradoras do maior polo de gipsita do país. **Movimento Econômico**, Pernambuco, 13 de agosto de 2021. Negócios. Disponível em: <https://movimentoeconomico.com.br/economia/negocios/2021/08/13/gypway-holding-reune-mineradoras-do-maior-polo-de-gipsita-do-pais/>

RIBEIRO, Abrahão Severo. **Produção de gesso reciclado a partir de resíduos oriundos da construção civil**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **ROADMAP TECNOLÓGICO CIMENTO BRASIL**. Rio de Janeiro, 2019.

RODRIGUES, Diulia Caroline *et al.* Modelagem matemática de um forno rotativo empregado na produção de clínquer (Mathematical modeling of a Rotary kiln employed in the clinker production). 2013. **Cerâmica**. Espírito Santo, v.59, p. 302-309, 2013.

SANTOS, Jaciara Cássia de Carvalho. **Estudo da adsorção de monocamadas de água em gipsita (010) através de óptica não linear**. 2017. 126 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC. **Relatório Anual 2021**. São Paulo: 2021.

SOBRINHO, Antonia Christino P. de Lyra; AMARAL, Antônio José Rodrigues; DANTAS, José Orlando Câmara. Gipsita.2012. **Sumário Mineral**. p.71-72. 2012.

SOUSA, Bianca Anacleto Araújo *et al.* **A construção civil em uma perspectiva econômica, ambiental e social**. 1. ed. Guarujá - SP: Editora Científica Internacional, 2021.

URBANO, José Junio. **Estudo numérico do processo de calcinação da gipsita em fornos rotativos com aquecimento indireto a óleo.** 2013. 120 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

VANDERLEY, M. John; CINCOTTO, Maria Alba. **Alternativas para gestão de resíduos de gesso.** São Paulo, 2007.

VANDERLEY, M. John. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais** São Paulo: Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade de São Paulo, 2017.

VENDA DA LAFARGEHOLCIM PARA CSN CIMENTOS É APROVADA SEM RESTRIÇÕES PELO CADE. **Ministério da Justiça e Segurança Pública**, 04 de abril de 2022. Mercado. Disponível em: <https://www.gov.br/cade/pt-br/assuntos/noticias/venda-da-lafargeholcim-para-csn-cimentos-e-aprovada-sem-restricoes-pelo-cade> Acesso em: 13 Out 2023.

ZHANG, Fei. **Magnesium oxide based binders as low-carbon cements.** 2012. Tese (Doutorado em Filosofia). Imperial College London, Londres, 2012.