



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO DE  
PROCESSOS AMBIENTAIS**

**ADRIANA ADRIELLE LIMA PINTO**

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM  
MÉTODO ESTEQUIOMÉTRICO PARA  
QUANTIFICAÇÃO DE FASES MINERAIS EM  
GESSOS COMERCIAIS**

**Recife, 2025**

**ADRIANA ADRIELLE LIMA PINTO**

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM  
MÉTODO ESTEQUIOMÉTRICO PARA  
QUANTIFICAÇÃO DE FASES MINERAIS EM  
GESSOS COMERCIAIS**

**Área de Concentração:** Desenvolvimento em Processos Ambientais.

**Linha de Pesquisa:** Modelagem, Inovação e Sustentabilidade

**Orientadora:** Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

**Coorientador:** Prof. Dr. Leonardo Bandeira dos Santos

**Recife, 2025**

P659d

Pinto, Adriana Adrielle Lima.

Desenvolvimento e validação de um método estequiométrico para quantificação de fases minerais em gessos comerciais / Adriana Adrielle Lima  
Pinto, 2025.

98 f. : il.

Orientador: Valdemir Alexandre dos Santos.

Coorientador: Leonardo Bandeira dos Santos.

Mestrado (Dissertação) - Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2025.

1. Gipsita. 2. Mineralogia. 3. Gesso - Indústria.  
4. Gesso - Experimentos. 5. Algoritmos.  
6. Python (Linguagem de programação de computador).  
I. Título.

CDU 553.635


Luciana Vidal - CRB4/1338

## TERMO DE APROVAÇÃO

**ADRIANA ADRIELLE LIMA PINTO**


### **DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM MÉTODO ESTEQUIOMÉTRICO PARA QUANTIFICAÇÃO DE FASES MINERAIS EM GESSOS COMERCIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS - MESTRADO da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP) para obtenção do título de Mestre em DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS. A presente dissertação foi defendida e aprovada em 28 de julho de 2025 pela banca examinadora constituída pelos professores doutores:

Documento assinado digitalmente  
 **VALDEMIR ALEXANDRE DOS SANTOS**  
Data: 10/09/2025 16:00:47-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Orientador(a) e Presidente da Banca: Prof. Dr.  
Valdemir Alexandre dos Santos

Documento assinado digitalmente  
 **JOAQUIM TEODORO ROMAO DE OLIVEIRA**  
Data: 08/09/2025 12:43:04-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Titular Interno(a) – Prof. Dr. Joaquim Teodoro  
Romão de Oliveira



Titular Externo(a) – Prof. Dr. Carlos Costa  
Dantas

Recife, 2025

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>14</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>16</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>17</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1 Geral</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2 Específicos</b> .....	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>19</b>
<b>ARTIGO DE REVISÃO DA LITERATURA ENVIADO PARA PUBLICAÇÃO NA REVISTA CADERNO PEDAGÓGICO (QUALIS A2 – CAPES)</b> .....	<b>19</b>
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1 Mineral Gipsita</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1.1 Polo Gesseiro do Araripe</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1.2 Propriedades e aplicações do gesso</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1.3 Conversão do gesso</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1.4 Modelos Cinéticos da Desidratação do Gesso</b> .....	<b>23</b>
<b>3.1.5 Fornos de Calcinação Instalados no PGA</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1.6 Condições Operacionais no PGA</b> .....	<b>30</b>
<b>3.1.7 Teor de di-hidrato, semi-hidrato e anidrita no gesso comercial</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1.8 Reidratação do gesso</b> .....	<b>32</b>
<b>3.2 Estudos de Caso</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2.1 Métodos históricos de preparação</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2.2 Influência dos depósitos minerais e dos métodos de calcinação</b> .....	<b>35</b>
<b>3.2.3 Mecanismos de desidratação e reidratação</b> .....	<b>36</b>
<b>3.2.4 Reações térmicas e microestruturais</b> .....	<b>37</b>
<b>3.2.5 Controle do teor de semi-hidrato</b> .....	<b>37</b>
<b>3.2.6 Métodos inovadores de produção</b> .....	<b>38</b>
<b>3.2.7 Síntese dos estudos de caso</b> .....	<b>39</b>
<b>3.2.8 Lacunas de Pesquisa e Trabalhos Futuros</b> .....	<b>43</b>
<b>4 CONCLUSÃO</b> .....	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>45</b>
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>52</b>
<b>ARTIGO ENVIADO PARA O PERIÓDICO AABC (QUALIS A2)</b> .....	<b>52</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>53</b>

<b>ABSTRACT</b> .....	<b>54</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>55</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>56</b>
<b>2.1. Fundamentação Estequiométrica</b> .....	<b>56</b>
<b>2.1.1 Base para Análise Estequiométrica</b> .....	<b>58</b>
<b>2.1.2 Cálculo de CO<sub>2</sub> usado na formação do MgCO<sub>3</sub></b> .....	<b>59</b>
<b>2.1.4 Estimativa de CaO disponível para formação do gesso</b> .....	<b>59</b>
<b>2.1.5 Fator de Correção</b> .....	<b>60</b>
<b>2.2. Estimativa das Fases Mineraias no Gesso Comercial</b> .....	<b>61</b>
<b>2.3. Implementação de um Código em Python</b> .....	<b>72</b>
<b>2.4. Caracterização das Amostras de Gessos Comerciais</b> .....	<b>73</b>
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>76</b>
<b>3.1. Caracterização Química da Gipsita como Matéria-prima Comum</b> .....	<b>76</b>
<b>3.2. Teores de Di-hidrato, Semi-hidrato e Anidrita nas amostras via DTG</b> .....	<b>77</b>
<b>3.3. Valores dos Tempos de Pega nas Amostras de Gesso</b> .....	<b>82</b>
<b>3.3 Resultados Obtidos com Auxílio do Python</b> .....	<b>84</b>
<b>3.4 Validação do Método Estequiométrico Proposto</b> .....	<b>85</b>
<b>4. CONCLUSÃO</b> .....	<b>88</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>88</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>89</b>
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>93</b>
<b>CONSIDERAÇÕES GERAIS E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>93</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES GERAIS E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>94</b>
<b>5.1. Considerações Gerais</b> .....	<b>94</b>
<b>5.2. Perspectivas de Trabalhos Futuros</b> .....	<b>94</b>
<b>APÊNDICE I</b> .....	<b>96</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. 1 - Características operacionais e ambientais dos fornos de calcinação instalados no Polo Gesseiro do Araripe .....	29
Tabela 1. 2 - Requisitos químicos para o gesso de construção .....	33
Tabela 1. 3 – Requisitos para o gesso de construção.....	33
Tabela 1. 4 - Síntese dos conhecimentos derivados dos estudos de caso e possíveis correlações relevantes para o PGA.....	40
Tabela 2. 1 – Requisitos físicos do gesso para construção civil.....	74
Tabela 2. 2 – Análise físico-química com parâmetros médios do mineral Gipsita utilizado no desenvolvimento deste trabalho.....	76
Tabela 2. 3 - Valores das diferenças entre os teores minerais percentuais determinados por análise termogravimétrica (DTG) e com auxílio de um código Python desenvolvido neste trabalho.....	86

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1 - Produtos dependentes da temperatura obtidos após a calcinação do mineral de gesso .....	22
Figura 1. 2 - Adoção cronológica de fornos de calcinação para produção de semi-hidrato beta: 1 – Armazenamento do minério de gesso; 2 – Moagem do gesso; 3 – Elevador de canecas; 4 – Silo de alimentação do calcinador; 5 – Chaminé; 6 – Ciclone coletor de finos de gesso; 7 – Silo de semi-hidrato beta; 8 – Forno tipo panela; 9 – Forno vertical tipo caldeira; 10 – Forno rotativo tubular; 11 – Forno caldeira rotativo ("pança quente" ou Forno Beau).....	29
Figura 2. 1 - Fluxograma decisório para a classificação das fases minerais (Di-hidrato – D; Hemi-hidratino – H; Anidrita - A) em gessos comerciais com base nos parâmetros físico-químicos.....	71
Figura 2. 2 - Termograma do tipo TGA/DTG representando as transições de fase do mineral gipsita utilizado neste estudo durante o processo de desidratação térmica, em função da temperatura e da pressão.....	78
Figura 2. 3 - Termogramas TGA/DTG das amostras de gesso de fundição obtidos a partir da gipsita calcinada, evidenciando a liberação de água de cristalização durante o aquecimento: (a) Gesso de fundição F1; (b) Gesso de fundição F2; (c) Gesso de fundição F3. ....	79
Figura 2. 4 - Termogramas TGA/DTG das amostras de gesso de revestimento obtidos a partir da gipsita calcinada, evidenciando a liberação de água de cristalização durante o aquecimento: (a) Gesso de revestimento R1; (b) Gesso de revestimento R2; (c) Gesso de revestimento R2; (c) Gesso de revestimento R3; (d) Gesso de revestimento R4. ....	80
Figura 2. 5 - Teores percentuais médios da água de hidratação e das fases minerais identificadas nos gessos comerciais de fundição avaliados via análises TGA/DTG. ....	81
Figura 2. 6 - Teores percentuais médios da água de hidratação e das fases minerais identificadas nos gessos comerciais de revestimento avaliados via análises TGA/DTG. ....	81
Figura 2. 7 - Gráfico ilustrativo da composição da trabalhabilidade das amostras de gesso de fundição a partir dos tempos de pega (TP) inicial e final .....	82
Figura 2. 8 - Gráfico ilustrativo da composição da trabalhabilidade das amostras de gesso de revestimento a partir dos tempos de pega (TP) inicial e final .....	83
Figura 2. 9 - Teores percentuais de água de hidratação, di-hidrato (D), semi-hidrato (H) e anidrita (A) determinados por meio do código Python desenvolvido neste trabalho.....	84
Figura 2. 10 - Teores percentuais de água de hidratação, di-hidrato (D), semi-hidrato (H) e anidrita (A) determinados por meio do código Python desenvolvido neste trabalho.....	85

## RESUMO

A desidratação térmica da gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) é o principal processo industrial responsável pela produção de gesso comercial, com formação de diferentes fases minerais — di-hidrato, semi-hidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) e anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) — em função das condições de calcinação. Considerando que essas fases impactam diretamente propriedades como o tempo de pega e a trabalhabilidade do produto, este trabalho teve como objetivo propor e validar um modelo estequiométrico para estimar a composição mineralógica do gesso produzido no Polo Gesseiro do Araripe (PGA), com base na composição química da gipsita e no teor de água de hidratação das amostras de gesso. Foram desenvolvidas equações algébricas fundamentadas na análise da perda de água durante a reação de desidratação, as quais permitiram a quantificação das fases em amostras comerciais. Um algoritmo foi implementado em linguagem Python para automatizar os cálculos e foi aplicado em sete amostras comerciais, entre gessos de revestimento e fundição. Os teores médios de semi-hidrato encontrados foram de 82,34% nos gessos de revestimento e 86,12% nos de fundição. A presença de anidrita nos gessos de revestimento foi associada a um maior tempo de pega. A comparação entre os resultados obtidos por simulação (Python) e análise térmica (DTG) revelou variações inferiores a 2,1%, demonstrando a robustez do modelo. A metodologia desenvolvida se mostra promissora para fins de controle de qualidade e otimização da produção industrial de gesso.

**Palavras-chave:** Reação de desidratação. Fases mineralógicas. Código computacional. Validação experimental. Indústria gesseira. Mineral gispista.

## ABSTRACT

The thermal dehydration of gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) is the main industrial process responsible for the production of commercial plaster, resulting in the formation of different mineral phases—dihydrate, hemihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ), and anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ )—depending on the calcination conditions. Considering that these phases directly affect properties such as setting time and workability, this study aimed to propose and validate a stoichiometric model to estimate the mineralogical composition of plaster produced in the Araripe Gypsum Pole (PGA), based on the chemical composition of gypsum and the hydration water content of the plaster samples. Algebraic equations were developed based on the analysis of water loss during the dehydration reaction, which enabled the quantification of phases in commercial samples. An algorithm was implemented in Python to automate the calculations and was applied to seven commercial samples, including plaster for coating and casting purposes. The average hemihydrate content was found to be 82.34% in coating plasters and 86.12% in casting plasters. The presence of anhydrite in coating plasters was associated with a longer setting time. The comparison between the results obtained through simulation (Python) and thermal analysis (DTG) showed deviations of less than 2.1%, demonstrating the robustness of the model. The developed methodology proves to be promising for quality control and optimization of industrial plaster production.

**Keywords:** Dehydration reaction. Mineralogical phases. Computational code. Experimental validation. Plaster industry. Gypsiferous mineral.

## 1 INTRODUÇÃO

A gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) é um dos minerais mais explorados no Brasil para a produção de gesso, especialmente na região do Polo Gesseiro do Araripe (PGA), em Pernambuco, que concentra cerca de 95% da produção nacional (DNPM, 2020; Silva et al., 2018). O processo industrial de desidratação térmica da gipsita é essencial para transformar o di-hidrato em fases anidras ou parcialmente hidratadas, como o semi-hidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) e a anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), cujas formações dependem das condições térmicas e da taxa de aquecimento (Jacobs et al. 2023). Essas fases, resultantes da calcinação controlada, são determinantes para as propriedades físico-químicas do gesso comercial, impactando diretamente a trabalhabilidade e a resistência mecânica final dos produtos (Krejsová et al. 2024).

A eficiência do processo térmico, contudo, ainda é limitada pela ausência de controle preciso de variáveis operacionais nos fornos utilizados em escala industrial, o que compromete a padronização da qualidade do gesso (Bel-Anzué e Elert, 2021). Esse cenário exige o desenvolvimento de métodos quantitativos simples, porém robustos, que possibilitem a estimativa da composição mineralógica do produto final com base em análises acessíveis, como a composição química da gipsita e o teor de água de hidratação presente no gesso calcinado (Yaghobzadeh & Razani, 2022). Dessa forma, a análise estequiométrica das reações envolvidas na desidratação da gipsita apresenta-se, nesse contexto, como uma estratégia promissora e tecnicamente fundamentada.

Neste cenário, a presente dissertação propõe o desenvolvimento de um modelo algébrico baseado nas reações de desidratação térmica da gipsita, com o objetivo de estimar os teores de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (di-hidrato),  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  (semi-hidrato) e  $\text{CaSO}_4$  (anidrita) no gesso comercial. Para isso, empregou-se a linguagem de programação Python na elaboração de um algoritmo de cálculo que considera dados físico-químicos obtidos de amostras comerciais provenientes da matéria-prima e do gesso produzido no PGA. Essa abordagem permite não apenas maior rigor nas estimativas, mas também a possibilidade de automação e sistematização do controle de qualidade na indústria gesseira (Silva et al., 2022).

Este trabalho se justifica pela relevância industrial e tecnológica do setor gessoso brasileiro, pelo impacto ambiental associado ao uso de combustíveis fósseis nos fornos de calcinação — uma vez que o tempo e a temperatura de operação estão diretamente relacionados ao consumo energético — e pela escassez de ferramentas matemáticas aplicadas ao controle de qualidade em tempo real nesse segmento. A metodologia proposta nesta dissertação visa subsidiar decisões em processos de otimização térmica e desenvolvimento de novos produtos, ampliando a competitividade e a sustentabilidade da cadeia produtiva do gesso.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Desenvolver por meio de ensaios em amostras do mineral gipsita, correlações químicas para definir de forma prévia a qualidade do gesso produzido, a partir do teor da água de hidratação residual.

### **2.2 Específicos**

- Desenvolver expressões de cálculo capazes de estimar o grau de hidratação que permita caracterizar a qualidade de gessos comerciais.
- Caracterizar físico-quimicamente os minerais Gipsita que deram origem aos gessos comerciais utilizados para exemplificação das expressões de cálculo desenvolvidas.
- Adquirir amostras de gessos de diferentes fabricantes instalados no Polo Gesseiro do Araripe (PGA).
- Determinar os teores de água de hidratação das amostras de gessos comerciais coletados do PGA.
- Aplicar as expressões de cálculo desenvolvidas na identificação dos teores de semi-hidrato (H), anidrita (A) e Di-hidrato (D) para avaliação dos gessos comerciais.

# CAPÍTULO I

## ARTIGO DE REVISÃO DA LITERATURA PUBLICADO NA REVISTA CADERNO PEDAGÓGICO (QUALIS A2 – CAPES)

Revista  
**CADERNO  
PEDAGÓGICO**

REVISTA CADERNO PEDAGÓGICO – Studies Publicações Ltda.  
ISSN: 1983-0882

**Kinetic and technological perspectives on the conversion of Araripe gypsum into commercial  $\beta$ -hemihydrate: a comprehensive review**

**Perspectivas cinéticas e tecnológicas da conversão da gipsita do Araripe em  $\beta$ -hemidrato comercial: uma revisão abrangente.**

**Perspectivas cinéticas y tecnológicas de la conversión del yeso de Araripe en  $\beta$ -hemihidrato comercial: una revisión exhaustiva.**

DOI: 10.54033/cadpedv22n9-165

Originals received: 6/9/2025  
Acceptance for publication: 7/2/2025

## 3 REVISÃO DA LITERATURA

### 3.1 Mineral Gipsita

#### 3.1.1 Polo Gesseiro do Araripe

O PGA abrange 42 minas de gesso ativas, 174 unidades industriais de calcinação e aproximadamente 750 fábricas de artefatos pré-moldados. Essas atividades geram cerca de 13.900 empregos diretos e 69.000 empregos indiretos, contribuindo para uma receita anual de R\$ 1,4 bilhão (De Castro Souza et al. 2023). As extensas reservas de gesso do Brasil, com um horizonte de exploração estimado em 600 anos com base na taxa atual de extração, oferecem um potencial significativo para o crescimento contínuo e o desenvolvimento de novas tecnologias de processamento.

#### 3.1.2 Propriedades e aplicações do gesso

Quimicamente conhecido como sulfato de cálcio semi-hidratado, o gesso possui uma ampla gama de aplicações industriais e comerciais, abrangendo desde a construção civil até as indústrias médica e agrícola. A singularidade do gesso está em sua capacidade reversível de desidratação e reidratação. Durante a calcinação, a gipsita é aquecida entre 100 °C e 200 °C, perdendo aproximadamente 75% de sua água de cristalização e se transformando em sulfato de cálcio sem-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ), comumente conhecido como gesso de construção (Arnavutoglu et al. 2024). Quando reidratado com água, o sem-hidrato pode ser moldado e trabalhado em seu estado plástico. Após a cura, adquire resistência mecânica, tornando-se adequado para aplicações que exigem durabilidade e estabilidade estrutural (Krejsová et al. 2024).

Além da construção civil, o gesso também é utilizado na agricultura como gesso agrícola (sulfato de cálcio di-hidratado), fornecendo 15% de enxofre e 18% de cálcio. Pode ainda conter nutrientes como boro, fósforo, zinco e cobre, que melhoram as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, ao mesmo tempo que reduzem os níveis de alumínio tóxico (Da Silva et al. 2024).

### 3.1.3 Conversão do gesso

A conversão do mineral gipsita em gesso é realizada por meio de um processo conhecido como calcinação, que envolve a aplicação controlada de calor durante um período específico. Durante esse processo térmico, a gipsita passa por uma desidratação molecular, resultando em alterações significativas em suas propriedades físico-químicas. Inicialmente, o mineral é britado e, em seguida, calcinado industrialmente em uma faixa de temperatura entre 100 °C e 200 °C (Adekola et al. 2018), promovendo a remoção da água de cristalização presente em sua estrutura química:



A calcinação pode resultar em diferentes tipos de cristais de sulfato de cálcio que, embora compartilhem a mesma fórmula química, apresentam propriedades físicas e morfológicas distintas. Essas diferenças dependem da temperatura e da duração aplicadas durante o processo. O gesso comercial é composto predominantemente por sem-hidrato (de 54,8% a 96,2%), além de anidrita (de 0,0% a 19,0%) e di-hidrato (de 0,0% a 10,0%) (Romano-Matos et al. 2023).

A desidratação térmica do sulfato de cálcio di-hidratado é um processo de grande importância científica e industrial, permitindo a produção de materiais com diferentes níveis de hidratação, como o sulfato de cálcio sem-hidratado e o sulfato de cálcio anidro ( $\text{CaSO}_4$ ) (Shen et al. 2019). Esse processo é essencial para a fabricação de sem-hidrato e de outros compostos à base de sulfato de cálcio com aplicações diversas na construção civil, na indústria médica e na agricultura.

Quando aquecido em forno de calcinação ou em autoclave, diversos produtos podem ser formados, dependendo das condições de temperatura e pressão aplicadas ao mineral de gesso (Abu Zeitoun et al. 2020). A cerca de 100 °C (sob pressão de vapor entre 1,4 e 2,4 atm em autoclave), forma-se o  $\alpha$ -semi-hidrato (Rejab 2013). Essa fase é caracterizada por uma estrutura cristalina mais compacta e por propriedades mecânicas superiores, sendo amplamente utilizada em aplicações industriais que requerem alta resistência (Singh 2022).

Entre 100 °C e 200 °C, forma-se o  $\beta$ -semi-hidrato, conhecido como gesso de Paris (Christensen 2008). Essa fase é obtida sob condições

atmosféricas normais e apresenta menor densidade e resistência mecânica em comparação ao  $\alpha$ -semi-hidrato. O  $\beta$ -semi-hidrato é utilizado na construção civil, na confecção de moldes e em aplicações médicas.

De 220 °C a 380 °C, o gesso é convertido em anidrita III (solúvel), que mantém uma estrutura reativa e pode ser utilizada como retardante de pega em cimentos Portland e em determinadas formulações industriais.

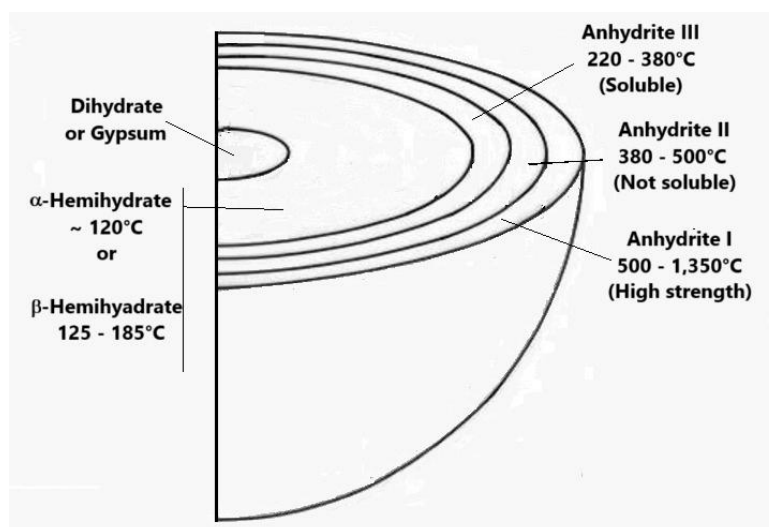
Em temperaturas entre 380 °C e 500 °C, forma-se a anidrita II (insolúvel), uma fase mais estável e com menor reatividade (Seufert et al. 2009a). Essa fase é empregada em aplicações que exigem maior resistência à água e durabilidade.

Entre 500 °C e 1.350 °C, obtém-se a anidrita I, uma forma extremamente estável, com alta resistência mecânica, frequentemente utilizada em materiais de construção especializados.

Acima de 1.350 °C, o sulfato de cálcio sofre decomposição irreversível, formando óxido de cálcio (CaO) e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), um processo que ocorre sob condições extremas (Murariu et al. 2022).

A Figura 1 ilustra os produtos derivados da desidratação térmica do mineral de gesso em função da temperatura e pressão aplicadas.

Figura 1. 1 - Produtos dependentes da temperatura obtidos após a calcinação do mineral de gesso



Fonte: Autora (2024).

A produção de gesso comercial requer uma seleção cuidadosa da rocha

de gipsita com teor de sulfato de cálcio di-hidratado superior a 80%, o que normalmente é realizado manualmente logo após a extração. O minério é então transportado para unidades industriais, onde passa por processos de britagem, moagem e peneiramento antes de ser calcinado em fornos especializados (Lira et al. 2015). A indústria emprega diversos tipos de fornos, incluindo panela, caldeira vertical, forno rotativo tubular e caldeira rotativa, cada um oferecendo vantagens específicas para a produção de diferentes formas de gesso, como o semi-hidrato alfa e beta (Da Silva et al. 2018).

Em ambientes laboratoriais, a síntese de fases específicas do sulfato de cálcio — como o  $\alpha$ -semi-hidrato, o  $\beta$ -semi-hidrato e as diversas formas de anidrita — é normalmente realizada sob condições rigorosamente controladas de temperatura, pressão e umidade. Por exemplo, o  $\alpha$ -semi-hidrato é geralmente produzido em autoclaves sob altas pressões de vapor, resultando em cristais densos e uniformes, com propriedades mecânicas superiores. Em contraste, o  $\beta$ -semi-hidrato é gerado em condições atmosféricas, com menor uniformidade cristalina, sendo mais adequado para aplicações que exigem porosidade e pega mais rápida. A anidrita II, frequentemente considerada indesejável na produção de gesso, forma-se em temperaturas mais elevadas e tempos prolongados de calcinação.

Ambientes industriais, como os observados no Polo Gesseiro do Araripe, muitas vezes carecem de controle preciso sobre esses parâmetros devido a limitações tecnológicas, o que leva à variabilidade na composição das fases. Como resultado, o gesso comercial frequentemente contém fases mistas, o que pode comprometer o comportamento de pega e o desempenho mecânico. Essa discrepância destaca a importância de adaptar o conhecimento processual derivado de laboratório ao contexto industrial, promovendo melhor controle de processo e padronização.

#### **3.1.4 Modelos Cinéticos da Desidratação do Gesso**

A desidratação térmica do gesso é um processo multifásico altamente dependente de variáveis como temperatura, tempo, pressão de vapor e tamanho de partícula. A compreensão da cinética envolvida é essencial para o controle preciso da formação do semi-hidrato e para evitar a conversão

indesejada em fases menos reativas, como a anidrita. Modelos cinéticos têm sido amplamente aplicados para descrever os mecanismos que regem essa transformação, possibilitando a previsão das taxas de reação, a determinação da energia de ativação e a otimização das condições industriais de calcinação (Souza & Ferraz, 2025).

Um dos modelos mais utilizados na literatura é o Modelo do Núcleo Não Reagido (NNR), que considera que a reação ocorre da superfície da partícula em direção ao centro, com um núcleo não reagido cercado por uma camada de produto. Esse modelo tem sido aplicado para representar a difusão do vapor de água gerado durante a desidratação através da nova camada de semi-hidrato formada (Shen et al., 2019). A equação típica associada à geometria esférica com controle difusional é:

$$1 - \frac{1}{2}X - (1 - X)^{\frac{2}{3}} = kt \quad (1)$$

em que X representa a fração de conversão, k é a constante de velocidade e t é o tempo de reação.

Outra abordagem relevante envolve modelos empíricos baseados na equação de Arrhenius, que descreve a dependência da constante de velocidade em relação à temperatura:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2)$$

em que A é o fator pré-exponencial,  $E_a$  é a energia de ativação, R é a constante universal dos gases e T é a temperatura absoluta. Estudos como o de Iwasaki e Koga (2020) aplicaram essa equação para extrair parâmetros cinéticos a partir de dados termogravimétricos (TG), identificando regiões distintas de desidratação com diferentes valores de  $E_a$ , variando de 60 a 100 kJ/mol, dependendo da pressão de vapor.

Modelos geométricos como o Modelo de Reação com Volume Contrátil (*Contracting Volume Reaction Model*) e o modelo de nucleação e crescimento de Johnson-Mehl-Avrami também são utilizados para explicar variações nos perfis de conversão. O modelo de Johnson-Mehl-Avrami, por exemplo, assume que a reação ocorre por nucleação aleatória dos cristais de semi-hidrato seguida de crescimento, com a seguinte expressão:

$$X(t) = 1 - \exp(-kt^n) \quad (3)$$

em que n é o expoente de Avrami, relacionado ao mecanismo de nucleação e

crescimento. Esse modelo foi aplicado por Tang et al. (2019) para descrever a conversão direta do gesso em  $\gamma$ -anidrita sob condições de baixa pressão de vapor.

Estudos mais recentes têm integrado técnicas experimentais como TG-DSC e DRX com simulações computacionais para desenvolver modelos termodinâmicos acoplados à cinética, com ênfase na influência da pressão de vapor de água gerada internamente (Kyono et al., 2022). Esses modelos demonstram que o acúmulo de vapor durante a calcinação pode atrasar ou até reverter parcialmente a desidratação, impactando negativamente a eficiência energética do processo.

Do ponto de vista industrial, a aplicação desses modelos permite estimar os tempos ideais de residência em fornos rotativos ou verticais, ajustar as faixas de temperatura para maximizar a conversão em semi-hidrato e minimizar perdas energéticas, além de desenvolver sensores de monitoramento em tempo real com base nas taxas de conversão. No contexto do Polo Gesseiro do Araripe, onde predominam fornos com baixa automação, a incorporação de modelos cinéticos simplificados pode representar um primeiro passo em direção à melhoria do controle de qualidade e à redução da variabilidade associada à operação empírica dos sistemas térmicos (Hiller, 1997).

### **3.1.5 Fornos de Calcinação Instalados no PGA**

Os fornos do tipo panela, amplamente utilizados no Polo Gesseiro do Araripe até o final da década de 1990, ainda são empregados por algumas empresas da região devido à simplicidade de operação, baixos custos de manutenção e reposição, e à versatilidade na produção de diferentes tipos de gesso  $\beta$  (Salman e Khraishi, 1998). Tradicionalmente construídos por oficinas locais, esses fornos utilizam lenha como principal fonte de combustível, o que os torna acessíveis, mas limita sua eficiência energética e ambiental. Apesar de representarem uma solução econômica, os fornos do tipo panela apresentam deficiências significativas no controle de temperatura, o que resulta em desperdício de energia e na formação de subprodutos indesejáveis durante a calcinação (Bel-Anzué e Elert, 2021). Além disso, o uso de lenha como combustível contribui substancialmente para a emissão de poluentes como  $\text{CO}_2$  e material particulado, além de estar associado à desmatamento local,

agravando os impactos ambientais da atividade. Comparados a outros modelos modernos, os fornos panela são menos eficientes, evidenciando a necessidade de modernização tecnológica para melhorar a sustentabilidade e a competitividade da indústria gesseira regional.

Introduzidos na década de 1980, os fornos tipo marmita vertical destacam-se por sua maior produtividade e eficiência operacional em comparação a modelos tradicionais como o forno panela (Filkoski et al., 2018). Fabricados por empresas locais de metalurgia, esses fornos utilizam predominantemente lenha ou óleo combustível pesado (BPF) como fontes de energia. Exigem menos mão de obra por tonelada de gesso produzida e garantem maior uniformidade na calcinação, devido à capacidade de processar grandes lotes em ciclos de aproximadamente três horas. Além da superior eficiência energética, esses fornos incorporam sistemas como ciclones para retenção de partículas, contribuindo para a redução das emissões de particulados e, conseqüentemente, da poluição atmosférica. Seu projeto inclui isolamento térmico eficiente, minimizando perdas de calor e reduzindo parcialmente as emissões por unidade de gesso produzido. No entanto, apesar dessas vantagens, os fornos verticais enfrentam limitações de sustentabilidade, especialmente pela dependência da lenha, associada ao desmatamento, ou pelo uso inadequado de biomassa. Embora representem um avanço em produtividade e controle de processo, requerem melhorias tecnológicas e transição para combustíveis mais limpos para atender às exigências ambientais atuais e alinhar-se aos princípios da sustentabilidade industrial.

Os fornos rotativos tubulares de aquecimento direto foram inicialmente projetados para operar com óleo combustível pesado (BPF) como fonte de energia. Posteriormente, foram adaptados para incorporar gaseificadores alimentados com lenha ou carvão, ampliando sua aplicabilidade em diversos cenários industriais. Embora tenham sido amplamente populares na década de 1980, esses fornos foram gradualmente substituídos nos anos 1990 por fornos de aquecimento indireto, como os fornos marmita rotativos (adotado oficialmente em 2005). No entanto, algumas plantas industriais ainda utilizam esse modelo devido às suas características vantajosas (Urbano et al., 2021).

Os benefícios dos fornos rotativos tubulares incluem produção contínua, possibilitando maior eficiência operacional, elevada eficiência térmica e

facilidade de automação, tornando-os adequados para operações em larga escala. Quando alimentados com combustíveis fósseis como gás natural ou óleo combustível, esses fornos apresentam eficiência energética superior e menores emissões de particulados em comparação aos modelos tradicionais a lenha (Filkoski et al., 2018; Oliveira et al., 2014). Contudo, sua operação contribui significativamente para a emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) associada à queima de combustíveis fósseis, o que representa um desafio ambiental. O uso desse tipo de forno é particularmente vantajoso para processos que requerem controle preciso de temperatura e alta produtividade. Ainda assim, é essencial a transição para tecnologias mais modernas e combustíveis renováveis, a fim de alinhar essas operações às exigências ambientais contemporâneas, reduzindo emissões e promovendo maior sustentabilidade no setor.

Introduzidos na década de 1990, os fornos tipo marmitta rotativo, popularmente conhecidos como “pança quente”, foram inspirados em equipamentos de calcinação desenvolvidos pela empresa alemã Grelbex®. Esses fornos possuem capacidade de produção entre 60 e 120 toneladas por dia (Ogata et al., 2024). Fabricados por empresas locais no PGA, destacam-se pela versatilidade no uso de combustíveis disponíveis regionalmente, como lenha, coque, óleo combustível pesado (BPF) e biomassa. Quando adequadamente projetados, podem atingir alto grau de automação, com monitoramento contínuo de variáveis críticas como temperatura e tempo de residência, otimizando o processo produtivo (Wenmin e Zhugang, 2012).

Esse tipo de forno combina as principais vantagens dos fornos rotativos e de marmitta, oferecendo maior eficiência térmica e melhor controle das condições de calcinação. É particularmente indicado para a produção de gessos especiais e chapas de drywall, atendendo às demandas de fabricantes internacionais que operam no PGA. Quando alimentado com gás natural, o forno pança quente reduz significativamente as emissões de poluentes, como  $\text{CO}_2$  e material particulado, em comparação aos fornos tradicionais a lenha. Essa característica posiciona esse equipamento como uma alternativa ambientalmente mais sustentável, alinhada às tendências globais de redução de impactos ambientais.

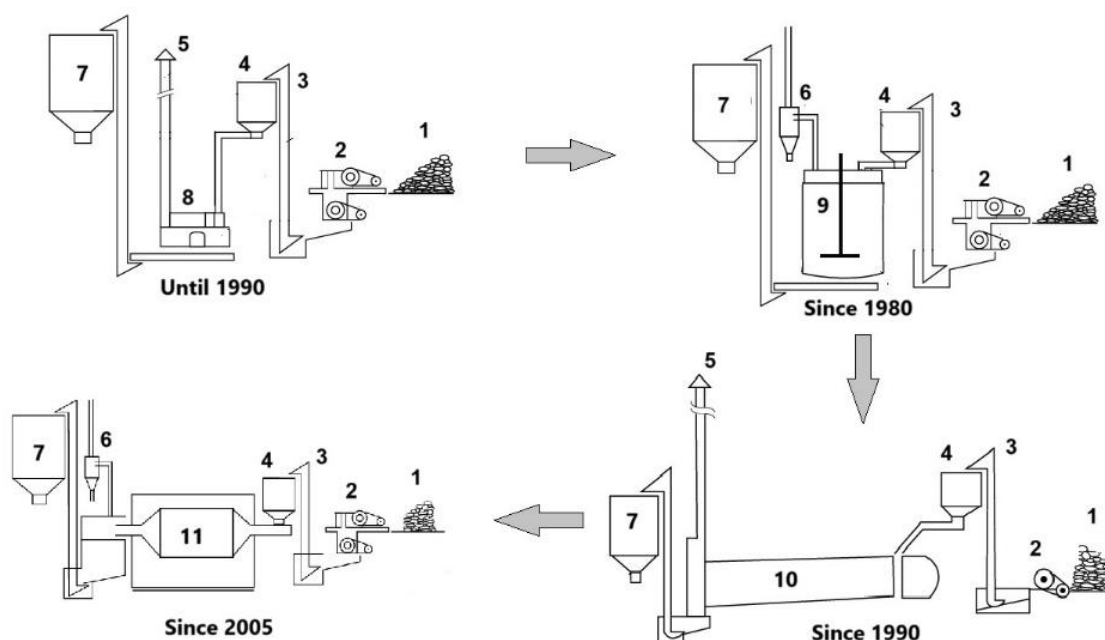
Embora o forno rotativo tubular ofereça alta eficiência térmica, os dados

disponíveis não permitem inferir sua viabilidade em pequenas indústrias do Polo Gesseiro do Araripe (PGA), principalmente devido aos custos de adaptação às fontes de energia limpa e ao baixo grau de automação da região.

A Figura 2 apresenta uma visão geral da adoção de fornos pelas empresas do PGA. Os diversos modelos de fornos exibem vantagens e limitações distintas. Por exemplo, os fornos rotativos tubulares tendem a produzir produtos supercalcinados devido a gradientes térmicos e exigem mecanismos para o controle de finos, enquanto os fornos verticais, embora econômicos, são menos duráveis e demandam manutenção mais frequente (Mun e Yoo, 2024). Os fornos verticais tipo caldeira e caldeira rotativa se destacam por sua eficiência térmica, maior uniformidade do produto final e flexibilidade no uso de combustíveis.

É importante destacar que a escassez de combustíveis na região do PGA levou muitas fábricas de gesso a utilizarem lenha como principal fonte de energia. Como consequência, a região apresenta sinais significativos de desertificação e necessita urgentemente de incentivos para implementar mudanças em seus processos, especialmente a adoção de matrizes energéticas sustentáveis (Silva et al., 2022). A Tabela 1 consolida os diferentes tipos de combustíveis utilizados pelos fornos no Polo Gesseiro do Araripe (PGA), destacando os resultados em termos de eficiência térmica, qualidade da calcinação e níveis de poluição.

Figura 1. 2 - Adoção cronológica de fornos de calcinação para produção de hemi-hidrato beta: 1 – Armazenamento do minério de gesso; 2 – Moagem do gesso; 3 – Elevador de canecas; 4 – Silo de alimentação do calcinador; 5 – Chaminé; 6 – Ciclone coletor de finos de gesso; 7 – Silo de hemi-hidrato beta; 8 – Forno tipo panela; 9 – Forno vertical tipo caldeira; 10 – Forno rotativo tubular; 11 – Forno caldeira rotativo ("barriga quente" ou Forno Beau).



Fonte: Autora (2024).

Tabela 1. 1 - Características operacionais e ambientais dos fornos de calcinação instalados no Polo Gesseiro do Araripe

Tipo de Forno	Combustível Primário	Eficiência Térmica	Qualidade da Calcinação	Nível de Poluição
Forno Tipo Panela	Lenha	Baixa (~20-30%)	Qualidade irregular devido ao controle precário de temperatura.	Alta: emissões significativas de CO <sub>2</sub> , material particulado e desmatamento associado ao uso de lenha.
Forno tipo Marmitta Vertical	Lenha	Moderada (~40-50%)	Controle melhorado em comparação aos fornos tipo panela.	Alta: embora mais eficiente, ainda depende de lenha com emissões elevadas de poluentes.

Forno Rotativo Tubular	GLP ou Gás Natural	Alta (~60-80%)	Alta qualidade, se o controle de temperatura for adequado e houver formação consistente.	Moderada: menores emissões de particulados, mas emissões significativas de CO <sub>2</sub> devido à queima de combustíveis fósseis.
Forno tipo Marmitta Rotativo (Pança Quente)	Lenha, BPF, Coque, GLP, Gás Natural ou Cavacos de Madeira	Boa (~60-70%)	Boa qualidade com uma estratégia de controle de processo adequada.	Baixa a moderada: GN < GLP < Cavacos de Madeira < Lenha < BPF.

Fonte: Autora (2024).

### 3.1.6 Condições Operacionais no PGA

A relação entre as condições cinéticas investigadas em estudos acadêmicos e as práticas industriais no setor gesseiro envolve, principalmente, a adaptação de parâmetros como temperatura, pressão e controle de vapor d'água. Em ambientes acadêmicos, as temperaturas são rigorosamente controladas para mapear cada estágio da desidratação do gesso, com valores que variam de aproximadamente 45 °C até mais de 200 °C (Miyazaki, 1969). Essa precisão é essencial para identificar as transições de di-hidrato (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) para semi-hidrato (CaSO<sub>4</sub>·0,5H<sub>2</sub>O) e, eventualmente, para anidrita (CaSO<sub>4</sub>), monitorando as alterações estruturais e energéticas em cada fase.

Nos fornos industriais, as temperaturas são mantidas dentro de faixas operacionais mais amplas para maximizar a eficiência e a produtividade, geralmente entre 140 °C e 250 °C para a produção de semi-hidrato. Embora a precisão rigorosa seja menos viável em escala industrial, manter uma faixa de temperatura consistente é crucial para obter um semi-hidrato de alta qualidade (Koper et al., 2020).

Muitos estudos acadêmicos investigam o efeito do vapor d'água gerado durante a desidratação e seu impacto nas taxas de reação (Krejsová et al., 2024). O controle da pressão de vapor permite aos pesquisadores estudar a desidratação em condições isobáricas, demonstrando como o aumento do

vapor d'água retarda o processo de desidratação — um insight essencial para otimizar a qualidade do produto e minimizar a formação indesejada de anidrita (Kyono et al., 2022).

Nos fornos de calcinação, o controle do vapor d'água é mais desafiador. A ventilação é geralmente utilizada para remover o vapor gerado, mas a pressão não é gerenciada com a mesma precisão que em estudos laboratoriais. A recirculação de parte dos gases de exaustão para a entrada do forno pode manter o teor de umidade próximo ao nível desejado. Esse controle rudimentar possibilita a produção de semi-hidrato, embora com flexibilidade limitada para ajustes finos, o que pode resultar em variabilidade na qualidade do produto final.

### **3.1.7 Teor de di-hidrato, semi-hidrato e anidrita no gesso comercial**

Materiais pré-moldados exigem gesso com alta resistência mecânica e capacidade de pega rápida. O semi-hidrato é o componente ideal para gessos destinados a aplicações pré-moldadas, pois se hidrata rapidamente ao ser misturado com água, permitindo o controle dos tempos de pega e o endurecimento acelerado. Isso facilita a remoção dos moldes e melhora o manuseio dos produtos sem comprometer a resistência inicial necessária para o transporte e a instalação (Ding et al., 2023).

Pequenas quantidades de anidrita II podem melhorar a resistência superficial e aumentar a dureza, o que é desejável para materiais pré-moldados sujeitos à abrasão. No entanto, altos teores de anidrita podem retardar o processo de hidratação, afetando negativamente a resistência final e a trabalhabilidade. Testes indicam que misturas contendo até 50% de anidrita II podem ser vantajosas quando a resistência superficial é prioritária. Contudo, proporções mais elevadas de anidrita dificultam a hidratação completa, comprometendo a coesão e a integridade estrutural (Zhai et al., 2014).

Pequenas quantidades de gesso não calcinado (di-hidrato) podem atuar como agentes de nucleação, acelerando a hidratação do semi-hidrato e promovendo uma matriz mais coesa. No entanto, teores excessivos de di-hidrato são indesejáveis, pois podem acelerar demais a hidratação, dificultando o controle do tempo de pega e reduzindo a trabalhabilidade necessária para a produção precisa de pré-moldados.

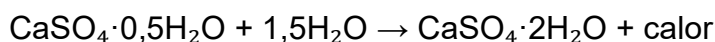
Para o gesso de revestimento, a prioridade é alcançar uma superfície lisa e durável, com tempo de trabalho prolongado para permitir ajustes e alisamento

(Risdonne et al., 2021). O semi-hidrato, devido à sua capacidade de hidratação controlada, é também o principal componente para revestimentos, garantindo boa aderência e permitindo um acabamento uniforme e suave, essencial para aplicações como reboco ou revestimento decorativo de paredes e tetos. Contudo, para garantir facilidade de aplicação e tempo de trabalho adequado, o teor de semi-hidrato é ajustado para evitar uma hidratação excessivamente rápida. Em revestimentos, a presença de anidrita II em quantidades moderadas (até cerca de 40%) contribui para o aumento da dureza superficial do gesso, melhorando a resistência à abrasão e ao desgaste em superfícies de uso frequente (Seufert et al., 2009b). No entanto, altos teores de anidrita podem aumentar a trabalhabilidade diminuindo a coesão do revestimento, devido à hidratação parcial e lenta da anidrita, resultando em um revestimento com alta porosidade interna e menor resistência estrutural a longo prazo.

De acordo com Seufert et al. (2009a), a presença de di-hidrato em revestimentos pode causar hidratação muito rápida, limitando o tempo de aplicação. Em pequenas quantidades, ele auxilia na nucleação, garantindo boa formação cristalina e textura suave. Contudo, sua presença deve ser limitada para evitar fissuras ou secagem irregular, o que poderia comprometer a estética e a durabilidade do revestimento.

### 3.1.8 Reidratação do gesso

Quando o semi-hidrato entra em contato com a água, ele se reidrata e se reconverte em sulfato de cálcio di-hidratado, conforme a reação:



Esse processo de reidratação libera calor e faz com que o gesso solidifique, tornando-o adequado para aplicações que exigem resistência mecânica (Lee et al., 2013).

O gesso utilizado na construção civil é, em geral, o  $\beta$ -semi-hidrato, caracterizado por sua baixa densidade e alta porosidade, o que o torna ideal para revestimentos leves e massas de preenchimento (Sophia et al., 2016; Darmawan et al., 2020). Quando misturado com água, o  $\beta$ -semi-hidrato passa por um processo de hidratação e solidificação, no qual a forma semi-hidratada é reidratada para formar novamente o sulfato de cálcio di-hidratado. Esse processo é essencial para aplicações que exigem molde rápido e resistência mecânica

(Alberto et al., 2011).

O tempo de hidratação, ou tempo de pega, pode ser dividido em dois estágios: inicial e final. O tempo de pega inicial refere-se ao intervalo entre a mistura do pó de gesso com água e o momento em que o material atinge uma consistência intermediária, ainda moldável. O tempo de pega final refere-se ao período necessário para que o gesso endureça completamente e atinja sua resistência mecânica final (Darmawan et al., 2020).

De acordo com a NBR 13207 da ABNT (2017), os requisitos químicos para o gesso de revestimento (fino e grosso) e para o gesso de fundição (fino e grosso) estão especificados conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 1. 2 - Requisitos químicos para o gesso de construção

<b>Determinações químicas</b>	<b>Limites (%)</b>
Água livre	Máx. 1,3
Água de cristalização	4,2 a 6,2
Óxido de cálcio (CaO)	Mín. 38,0
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	Mín. 53,0

Fonte: (NBR 13207 ABNT, 2017).

Além disso, a Tabela 3 da norma apresenta os requisitos físicos para esses tipos de gesso:

Tabela 1. 3 – Requisitos para o gesso de construção

<b>Classificação do Gesso</b>	<b>Tempo de pega (min) (NBR 12128)</b>		<b>Módulo de finura (NBR 12127)</b>
	<b>Início</b>	<b>Fim</b>	
Gesso fino para revestimento	> 10	> 45	< 1,10
Gesso grosso para revestimento	> 10	> 45	> 1,10

Gesso fino para fundição	4 – 10	20 - 45	< 1,10
Gesso grosso para fundição	4 – 10	20 - 45	> 1,10

Fontes: (NBR 12127 ABNT, 2017; NBR 12128 ABNT, 2017)

Esses parâmetros são fundamentais para garantir a trabalhabilidade e o desempenho do gesso em diversas aplicações na construção civil, incluindo revestimentos, moldes e fundições.

O gesso é um material versátil, amplamente utilizado devido à sua facilidade de aplicação e rápida moldabilidade. O controle dos parâmetros de calcinação e do tempo de pega é essencial para assegurar a qualidade e a durabilidade do material em suas diferentes aplicações. Os requisitos normativos, como os definidos pela NBR 13207 da ABNT (2017), garantem a padronização e a qualidade dos produtos no mercado brasileiro de gesso, contribuindo para o desenvolvimento sustentável e eficiência na indústria da construção.

### 3.2 Estudos de Caso

Os estudos apresentados nesta seção foram selecionados por sua relevância no avanço da compreensão dos mecanismos químicos, térmicos e estruturais envolvidos na conversão do gesso. Eles abrangem métodos consolidados, como a termogravimetria, e abordagens inovadoras, incluindo moagem assistida por solvente e soluções salinas concentradas, além de questões práticas relacionadas à influência de depósitos minerais e aditivos (Yaghobzadeh e Razani, 2022; Yepes et al., 2021).

#### 3.2.1 Métodos históricos de preparação

Mishmastneha et al. (2023) investigaram métodos históricos de preparação de gesso na Pérsia e na Itália renascentista, avaliando como essas técnicas influenciaram a microestrutura e as propriedades de molhabilidade dos materiais. Duas receitas tradicionais foram replicadas: o Gach-e Koshteh (Pérsia, século XIV) e o Gesso Sottile (Itália, século XV), sendo comparadas com gessos modernos de baixa resistência.

O estudo revelou que o Gach-e Koshteh promove a formação de cristais de gesso em forma de placas, com orientação preferencial, aumentando a molhabilidade devido à exposição de facetas hidrofílicas. Por outro lado, o Gesso Sottile e os gessos modernos apresentaram cristais em forma de agulha, com características mais hidrofóbicas devido à exposição limitada dessas facetas.

As análises realizadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Microscopia de Força Atômica (AFM) e Difração de Raios X (DRX) confirmaram que a preparação do Gach-e Koshteh, que envolve processamento mecânico contínuo, resulta em uma microestrutura densa e compacta. Já o Gesso Sottile, preparado com excesso de água e longos períodos de repouso, produziu cristais maiores, porém menos densamente distribuídos.

Apesar da importância histórica, essas técnicas possuem viabilidade industrial limitada. O Gesso Sottile é impraticável devido ao tempo de preparação prolongado, e o Gach-e Koshteh, embora gere material de alta qualidade, depende de métodos artesanais incompatíveis com as demandas industriais contemporâneas do Polo Gesseiro do Araripe.

### **3.2.2 Influência dos depósitos minerais e dos métodos de calcinação**

Yaghobzadeh e Razani (2022), em sua revisão de literatura, destacaram três fatores principais que influenciam as propriedades do gesso: depósito mineral, método de calcinação e aditivos. A composição química do depósito mineral afeta diretamente o tamanho e a estrutura cristalina do gesso, enquanto a calcinação em diferentes temperaturas altera as fases cristalinas, como di-hidrato, semi-hidrato e anidrita.

Além disso, as condições de calcinação determinam as características das fases resultantes, e a moagem do gesso impacta significativamente suas propriedades mecânicas. Os autores também discutiram exemplos históricos e contemporâneos do uso de aditivos, enfatizando sua importância no aumento da resistência de argamassas e de outras propriedades (Gliozzo et al., 2021).

Os resultados sugerem que uma compreensão detalhada da estrutura e das propriedades do gesso é essencial para otimizar sua aplicação na conservação de monumentos. Métodos de processamento avançados e o uso de aditivos podem contribuir significativamente para a preservação do

patrimônio cultural, garantindo que as argamassas mantenham tanto qualidades funcionais quanto estéticas, para usos históricos e modernos.

No contexto do Polo Gesseiro do Araripe, conhecido por possuir algumas das reservas de gesso mais puras do mundo (88%–99%), conforme Moreira et al. (2024), o uso de aditivos apresenta grande potencial para o aperfeiçoamento das propriedades dos produtos. No entanto, a adoção de aditivos deve ser acompanhada por um rigoroso controle de processo nas práticas industriais da região, a fim de garantir a qualidade consistente e a eficiência na produção.

### 3.2.3 Mecanismos de desidratação e reidratação

Tang et al. (2019) investigaram as rotas de desidratação do sulfato de cálcio di-hidratado e os mecanismos de reidratação da anidrita solúvel ( $\gamma$ -CaSO<sub>4</sub>), utilizando uma abordagem termodinâmica e simulações de Monte Carlo (MC). O estudo revelou que, sob condições de baixa pressão de vapor, o gesso se desidrata diretamente para formar  $\gamma$ -CaSO<sub>4</sub>, enquanto pressões intermediárias levam à formação de  $\beta$ -semi-hidrato ( $\beta$ -CaSO<sub>4</sub>·0,5H<sub>2</sub>O) antes da anidrita solúvel. Em ambientes com alta pressão de vapor, o gesso permanece estável, sem ocorrer desidratação.

As simulações demonstraram que o  $\gamma$ -CaSO<sub>4</sub> possui alta capacidade de captar água de atmosferas extremamente secas, permitindo sua reidratação e a formação de fases sub-hidratadas, como CaSO<sub>4</sub>·0,67H<sub>2</sub>O, dependendo da umidade relativa. Experimentalmente, verificou-se que o  $\gamma$ -CaSO<sub>4</sub> é capaz de se reidratar mesmo sob umidades relativas tão baixas quanto 1%, sugerindo potenciais aplicações em processos de secagem e na extração de água em ambientes áridos, incluindo desertos e até Marte. Esses achados destacam a necessidade de modelos termodinâmicos avançados para processos industriais, bem como a importância do uso de silos de estabilização no PGA, para evitar interferências na qualidade causadas por temperaturas residuais de calcinação.

Elert et al. (2023) analisaram o impacto da temperatura de calcinação no desempenho de gessos tradicionais, com ênfase na construção sustentável e na preservação histórica. Utilizando amostras de depósitos históricos da Espanha, verificou-se que temperaturas de calcinação entre 100 °C e 1000 °C indicam que o intervalo entre 200 °C e 400 °C é o ideal para formar semi-hidrato

reativo com boa resistência mecânica, enquanto temperaturas acima de 500 °C resultam em anidrita insolúvel, comprometendo a reatividade e o desempenho frente à intempérie (Klimchouk, 1996).

O estudo enfatizou que o controle preciso da temperatura e os ajustes na microestrutura são essenciais para equilibrar reatividade e durabilidade em diferentes condições ambientais. No contexto do Polo Gesso do Araripe, essa análise reforça a importância de implementar sistemas de controle de temperatura precisos nos fornos de calcinação, uma vez que muitas fábricas locais ainda operam sem monitoramento adequado, o que limita a qualidade do gesso produzido.

### **3.2.4 Reações térmicas e microestruturais**

Krause et al. (2020) analisaram o comportamento térmico de materiais à base de gesso e de rochas naturais, com ênfase nos mecanismos de reação sob cargas térmicas. Utilizando gesso de alta pureza proveniente das formações Zechstein, na Alemanha, os autores avaliaram as transformações mineralógicas e estruturais em diferentes temperaturas, empregando técnicas como Microtomografia Computadorizada (micro-CT), Difração de Raios X (DRX), Análise Termogravimétrica (TGA), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (MIP).

A microestrutura influenciou significativamente o processo: as regiões centrais apresentaram cristais maiores e maior porosidade, enquanto as regiões periféricas exibiram microestruturas mais densas com cristais menores. A porosidade foi correlacionada com a redução da difusividade térmica. Um modelo de reação foi proposto, destacando o papel dos filmes de água como mediadores.

Concluiu-se que a transformação térmica do gesso depende de condições físico-químicas, como temperatura e umidade, com implicações importantes para aplicações industriais e na construção civil, especialmente quando expostos a altas temperaturas.

### **3.2.5 Controle do teor de semi-hidrato**

Dweck e Lasota (1998) realizaram um estudo detalhado sobre a caracterização de gessos comerciais utilizando termogravimetria (TG) para

estimar as proporções de semi-hidrato, di-hidrato, anidrita e componentes inertes. A análise revelou a degradação da qualidade do gesso devido à exposição à umidade, que resulta na reidratação parcial do semi-hidrato para di-hidrato. Dois tipos de gesso comercial (A e B) foram avaliados. O Gesso A continha, em média, 88,51% de semi-hidrato, 5,94% de di-hidrato e 5,54% de componentes inertes, enquanto o Gesso B apresentava 85,28% de semi-hidrato, 7,30% de di-hidrato e 7,42% de componentes inertes.

Testes isotérmicos realizados a 250 °C, 275 °C e 300 °C demonstraram maior precisão na determinação das proporções de fases em comparação aos métodos dinâmicos. Esses resultados confirmam a eficácia da termogravimetria como ferramenta de controle de qualidade para aplicações industriais.

O estudo também destacou a importância de condições adequadas de armazenamento para evitar a hidratação indesejada do gesso. Além disso, reforçou a necessidade de desenvolver métodos de monitoramento em tempo real para garantir a formação precisa de semi-hidrato durante a produção. Essa abordagem é particularmente relevante para as indústrias do Polo Gesseiro do Araripe, onde o controle preciso das variáveis de processo pode melhorar significativamente a qualidade e competitividade do produto final, incentivando a exploração de soluções tecnológicas inovadoras (Vasconcelos et al., 2011).

### **3.2.6 Métodos inovadores de produção**

Maslyk et al. (2022) propuseram um método inovador e sustentável para a produção de nanocristais de semi-hidrato a partir de di-hidrato, eliminando a necessidade de processos com alto consumo energético. O método emprega moagem assistida por solvente, onde o gesso é moído em um moinho de bolas com metanol como solvente auxiliar, alcançando a conversão completa para semi-hidrato em aproximadamente 200 minutos. A funcionalização superficial com metanol evitou a aglomeração dos cristais, resultando em dispersões estáveis.

Os nanocristais foram analisados por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Difração de Raios X de Pó (PXRD), MEV e Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET), enquanto sua estabilidade térmica e estrutural foi confirmada por TGA e refinamento de Rietveld. O estudo também examinou como variáveis experimentais, como tempo de moagem e

tipo de solvente, influenciam a morfologia dos nanocristais.

Os resultados indicaram que as dispersões de semi-hidrato são adequadas para aplicações avançadas, incluindo filmes ópticos transparentes e sensores descartáveis de umidade. O método demonstrou escalabilidade e eficiência energética, com grande potencial para substituir os processos tradicionais de calcinação na produção de placas de gesso. No entanto, estudos de viabilidade técnica e econômica são necessários para validar sua aplicação em larga escala, especialmente considerando que certas etapas do processo, como o uso de etanol, são incompatíveis com as práticas industriais atuais do Polo Gesseiro do Araripe.

Stawski et al. (2024) investigaram a conversão reversível de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  em  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  em soluções salinas altamente concentradas. O estudo demonstrou que, em salmouras com concentrações de NaCl acima de 4 M e temperaturas superiores a 80 °C, ocorre a precipitação direta e rápida do semi-hidrato, que se mantém estável até reverter para gesso ao resfriar. Esse ciclo mostrou-se repetível e eficiente no controle da formação do semi-hidrato.

A pesquisa utilizou difração de raios X in situ e espectroscopia Raman para monitorar as transformações de fase, revelando que os bancos de dados termodinâmicos comumente utilizados subestimam a estabilidade do semi-hidrato em soluções salinas. Além disso, o método é mais eficiente energeticamente do que os processos de calcinação ou autoclave, pois utiliza água como meio, reduzindo perdas térmicas. Os cristais resultantes apresentaram maior estabilidade e menor desordem em escala mesoscópica em comparação aos produzidos em soluções de baixa salinidade.

Essa abordagem possui grande potencial para a reciclagem de resíduos de gesso e para a promoção da sustentabilidade na indústria de materiais de construção, sendo particularmente relevante para otimizar o uso das reservas de gesso no PGA.

### **3.2.7 Síntese dos estudos de caso**

Os estudos discutidos nas subseções Métodos históricos de preparação até Métodos inovadores de produção oferecem contribuições valiosas para a

otimização dos processos de fabricação no PGA, favorecendo o desenvolvimento de metodologias mais eficientes e sustentáveis. Ao abordar práticas como o controle preciso da temperatura de calcinação, o uso racional de aditivos e a preservação das propriedades do gesso sob condições ambientais adversas, esses estudos estabelecem uma base técnica sólida para orientar os avanços tecnológicos e as melhorias industriais na região.

Esses estudos demonstram que a compreensão dos mecanismos de desidratação do sulfato de cálcio e da microestrutura permite que a indústria ajuste os parâmetros operacionais para produzir gesso de alta qualidade de forma eficiente e sustentável. Conseqüentemente, os modelos descritos por Tang et al. (2019) e Krause et al. (2020) são inestimáveis para prever e otimizar os resultados industriais, fornecendo uma base teórica robusta para o progresso tecnológico do setor.

A Tabela 4 sintetiza as informações relacionadas aos casos analisados e suas implicações para possíveis implementações no Polo Gesseiro do Araripe (PGA).

Tabela 1. 4 - Síntese dos conhecimentos derivados dos estudos de caso e possíveis correlações relevantes para o PGA.

<b>Autor-Ano</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Método</b>	<b>Resultados</b>	<b>Principais Implicações</b>
Dweck e Lasota (1998)	Estimar proporções de semi-hidrato, di-hidrato e materiais inertes no gesso comercial.	Ensaaios TG dinâmicos e isotérmicos em gessos comerciais.	Gesso $\alpha$ : 88,51% semi-hidrato; Gesso $\beta$ : 85,28% semi-hidrato. TG isotérmico foi mais preciso.	Base para o controle de qualidade industrial do gesso.
Tang et al. (2019)	Investigar as rotas de	Simulações de Monte	$\gamma$ -CaSO <sub>4</sub> capta água	Aplicações industriais em

<b>Autor-Ano</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Método</b>	<b>Resultados</b>	<b>Principais Implicações</b>
	desidratação do gesso e reidratação do $\gamma$ - $\text{CaSO}_4$ .	Carlo e cálculos termodinâmicos.	mesmo em baixa umidade. Destaque para os modelos termodinâmicos.	secagem e extração de água em ambientes áridos.
Krause et al. (2020)	Analisar reações térmicas e estruturais em materiais à base de gesso.	Técnicas como micro-CT, DRX, TGA, MEV e MIP.	Conversão de gesso para semi-hidrato pode ocorrer a 50 °C. Modelos de dissolução–cristalização.	Importância do controle de temperatura e umidade durante a calcinação.
Yaghobzadeh e Razani (2022)	Revisar os efeitos dos depósitos minerais, métodos de calcinação e aditivos.	Revisão bibliográfica e análise histórica de aditivos.	Depósitos e aditivos influenciam o tamanho e a resistência dos cristais de gesso.	Relevância para preservação de monumentos e propriedades de argamassas.
Maslyk et al. (2022)	Propor método sustentável para produzir	Moagem assistida por solvente com metanol em moinho de bolas.	Obtenção de nanocristais estáveis com menor consumo energético.	Potencial uso sustentável na produção de placas de gesso.

<b>Autor-Ano</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Método</b>	<b>Resultados</b>	<b>Principais Implicações</b>
	nanocristais de semi-hidrato.		Processo escalável.	
Elert et al. (2023)	Avaliar a influência da temperatura de calcinação nas propriedades do gesso.	DRX, TG-DSC, FESEM, MIP e simulações de intemperismo.	Temperaturas ideais entre 200 °C e 400 °C para semi-hidrato reativo.	Recomendações para controle fino de temperatura nos fornos do PGA.
Mishmastneha et al. (2023)	Investigar métodos históricos de preparação de gesso e suas propriedades.	Reprodução de receitas tradicionais e caracterização por MEV e AFM.	Cristais hidrofílicos ou hidrofóbicos dependendo do método histórico.	Melhoria de propriedades históricas aplicáveis à produção moderna.
Stawski et al. (2024)	Estudar a conversão de gesso para semi-hidrato em salmouras	Difração de raios X e espectroscopia Raman in situ.	Semi-hidrato estável obtido a partir de salmouras >4 M e 80 °C.	Sustentabilidade e economia de energia para a indústria do gesso.

Autor-Ano	Objetivo	Método	Resultados	Principais Implicações
	concentrada s.			

Fonte: Autora (2024).

### 3.2.8 Lacunas de Pesquisa e Trabalhos Futuros

A análise apresentada ao longo desta revisão destaca lacunas importantes na compreensão e aplicação atual dos processos de desidratação do gesso, especialmente no contexto das práticas industriais do Polo Gesseiro do Araripe. Preencher essas lacunas é essencial para melhorar a eficiência dos processos, a qualidade dos produtos e a sustentabilidade ambiental. Com base na síntese da literatura existente e em uma avaliação crítica, propõem-se as seguintes direções para pesquisas futuras:

- Adaptação de modelos cinéticos à prática industrial: a maioria dos modelos cinéticos é desenvolvida em condições laboratoriais controladas e raramente é aplicada como estratégia de controle em tempo real nos fornos industriais. Esforços futuros devem se concentrar na adaptação de modelos cinéticos simplificados, que possam ser implementados com sensores de baixo custo para o monitoramento in situ do processo.
- Modernização das tecnologias de calcinação: muitas unidades de produção locais ainda operam manualmente, com controle insuficiente de temperatura e vapor. O desenvolvimento de sistemas modulares e acessíveis de automação, voltados para pequenas e médias empresas, pode reduzir significativamente a variabilidade do processo e o consumo de energia.
- Impacto de impurezas mineralógicas secundárias: a influência de impurezas traço na cinética de desidratação, nas transições de fases cristalinas e no desempenho do produto final ainda é pouco explorada. Compreender essas interações pode apoiar estratégias mais robustas de otimização de processos.
- Integração de métricas de sustentabilidade: avaliações de ciclo de vida e análises de eficiência energética dos diferentes tipos de fornos em uso ainda são limitadas. A incorporação de métricas ambientais nos modelos de otimização de processos pode ajudar a identificar pontos críticos para

intervenção.

- Avaliação de técnicas alternativas de desidratação: tecnologias como calcinação assistida por micro-ondas, moagem assistida por solvente e desidratação mediada por solução salina oferecem potencial de economia de energia e novas propriedades dos materiais. Essas alternativas devem ser investigadas por meio de estudos em escala piloto, considerando sua viabilidade nas condições regionais.
- Fortalecimento da colaboração entre indústria e academia: há uma necessidade clara de interação mais próxima entre instituições de pesquisa e indústrias locais, para garantir que os avanços científicos se traduzam em melhorias práticas. Programas conjuntos de pesquisa e desenvolvimento podem fomentar a inovação e a atualização tecnológica.

As pesquisas futuras devem se concentrar não apenas na caracterização de materiais e reações, mas também na entrega de soluções tangíveis para otimização de processos, responsabilidade ambiental e competitividade no setor gesseiro. Esses esforços podem contribuir para transformar o Polo Gesseiro do Araripe em um modelo de referência em desenvolvimento industrial sustentável e de alto desempenho.

## **4 CONCLUSÃO**

Esta revisão examinou criticamente os processos envolvidos na conversão do gesso em hemi-hidrato comercial no Polo Gesseiro do Araripe, com foco especial na cinética de desidratação, nas tecnologias de fornos e nas implicações ambientais. Os resultados evidenciam que, embora a região possua reservas de gipsita de pureza excepcionalmente alta, as práticas industriais ainda dependem em grande parte de tecnologias obsoletas, com controle de processo limitado e elevado impacto ambiental.

Por meio da análise detalhada de modelos cinéticos — incluindo abordagens controladas por difusão e por nucleação-crescimento — e de seu potencial de aplicação em cenários industriais, este trabalho destaca a necessidade de integrar estruturas cinéticas simplificadas em sistemas de monitoramento em tempo real. Esses modelos podem ser fundamentais para otimizar o controle de temperatura, o tempo de residência e a remoção de vapor

d'água, assegurando a qualidade consistente do produto.

O estudo comparativo dos tipos de fornos revela uma necessidade urgente de modernização tecnológica. Fornos rotativos e rotativo-panela, quando devidamente automatizados e alimentados por fontes de energia mais limpas, oferecem ganhos significativos em eficiência térmica e redução de emissões. No entanto, a adoção em larga escala ainda é limitada por barreiras econômicas e de infraestrutura, o que reforça a importância de incentivos políticos e capacitação técnica.

A síntese de estudos de caso ilustra a relevância prática da análise termogravimétrica, de métodos avançados de desidratação (como a moagem assistida por solventes e a conversão mediada por salmoura), e do controle da composição de fases para melhorar o desempenho e a sustentabilidade. Esses insights contribuem para a construção de uma base científica e tecnológica robusta para orientar a inovação industrial no setor.

Além disso, a identificação de lacunas críticas de pesquisa — incluindo a necessidade de validação cinética em escala industrial, a integração de métricas de sustentabilidade e a intensificação da colaboração entre academia e indústria — aponta para direções estratégicas capazes de impulsionar a transformação do setor gesseiro. Esforços futuros devem priorizar o desenvolvimento de soluções tecnológicas modulares e de baixo custo, bem como abordagens baseadas na economia circular que sejam viáveis dentro das realidades operacionais do Polo Gesseiro do Araripe.

Concluindo, ao ir além de abordagens meramente descritivas, esta revisão oferece uma perspectiva estruturada e crítica sobre como o conhecimento científico da desidratação do gesso pode ser traduzido em ações concretas para a modernização industrial. Fornece um roteiro para alinhar a produção local às demandas globais por responsabilidade ambiental, eficiência de processos e excelência de produto — posicionando o Polo Gesseiro do Araripe como um potencial modelo de desenvolvimento industrial sustentável.

## REFERÊNCIAS

ABU ZEITOUN, E. et al. The mechanism of the first hydration-dehydration cycle of pure  $\alpha$ - and  $\beta$ - $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ . *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2020, n. 1, p. 1–11, 2020. Disponível em:

<https://doi.org/10.1155/2020/1732621>

ADEKOLA, F. A. et al. Dissolution kinetics studies of Nigerian gypsum ore in hydrochloric acid. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, v. 53, n. 5, p. 845–855, 2018

ALBERTO, N. et al. Characterization of different water/powder ratios of dental gypsum using fiber Bragg grating sensors. *Dental Materials Journal*, v. 30, n. 5, p. 700–706, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4012/dmj.2011-004>

ARNAVUTOGLU, E.; ARBAG, H.; KOYUNCU, D. D. E. Change in microstructure, mechanical strength, fire resistance, and radiation attenuation properties of gypsum plaster with boric acid. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 5 jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09190-4>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 12127: Determinação do módulo de finura de gesso para construção civil*. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 12128: Determinação do tempo de pega de gesso para construção civil*. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13207: Gesso para construção civil – Especificação*. Rio de Janeiro, 2017.

BEL-ANZUÉ, P.; ELERT, K. Changes in traditional building materials: the case of gypsum in Northern Spain. *Archaeological and Anthropological Sciences*, v. 13, n. 10, 30 set. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12520-021-01438-6>

CHIGBU, U. E.; ATIKU, S. O.; DU PLESSIS, C. C. The science of literature reviews: searching, identifying, selecting, and synthesising. *Publications*, v. 11, n. 1, p. 2, 6 jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/publications11010002>

CHRISTENSEN, A. N. et al. Formation and transformation of five different phases in the  $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$  system: crystal structure of the subhydrate  $\beta\text{-CaSO}_4\cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$  and soluble anhydrite  $\text{CaSO}_4$ . *Chemistry of Materials*, v. 20, n. 6, p. 2124–2132, mar. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/cm7027542>

COOPER, C. et al. Defining the process to literature searching in systematic reviews: a literature review of guidance and supporting studies. *BMC Medical Research Methodology*, v. 18, n. 1, 14 ago. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0545-3>

DA SILVA, D. B. P. et al. Avaliação da influência do aditivo hidrofugante nas pastas de gesso de fundição. *Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, v. 17, n. 1, p. 172–182, 2018

DA SILVA, D. M.; COSTA, A. F.; OLIVEIRA, J. P. Agricultural gypsum application for soil improvement: nutrient supply and aluminum reduction. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 24, p. 1205–1214, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01234-7>.

DARMAWAN, I.; WILLY, O.; BUDIMAN, J. A. Setting time of construction gypsum, dental plaster, and white orthodontic gypsum. *Journal of Dental Research, Dental Clinics, Dental Prospects*, v. 14, n. 3, p. 167–170, 21 set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34172/joddd.2020.036>

DE CASTRO E SOUZA, E.; OLIVEIRA, R. A. P.; FERRAZ, A. V. Caracterização de diferentes amostras do mineral gipsita do Polo Gesseiro do Araripe: do macro ao micro com refinamento Rietveld. *Holos*, v. 39, e14902, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2023.14902>.

DING, H. et al. Study on the effect of three types of calcium sulfate on the early hydration and workability of self-compacting repair mortar. *Materials*, v. 16, n. 16, p. 5648, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma16165648>

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. *Gipsita (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O): caracterização e balanço de produção no Brasil*. Brasília: DNPM, 2020.

DWECK, J.; LASOTA, E. I. P. Quality control of commercial plasters by thermogravimetry. *Thermochimica Acta*, v. 318, n. 1–2, p. 137–142, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0040-6031\(98\)00338-4](https://doi.org/10.1016/s0040-6031(98)00338-4)

ELERT, K.; BEL-ANZUÉ, P.; BURGOS-RUIZ, M. Influence of calcination temperature on hydration behavior, strength, and weathering resistance of traditional gypsum plaster. *Construction and Building Materials*, v. 367, n. 130361, p. 130361, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130361>

FERREIRA, D. C. E. et al. Study of gypsum composite with residue of ornamental rocks: physical, mechanical and thermal analysis. *Cerâmica*, v. 69, n. 391, p. 172–180, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132023693913385>

FILKOSKI, R. V.; PETROVSKI, I. J.; GJURCHINOVSKI, Z. Energy optimisation of vertical shaft kiln operation in the process of dolomite calcination. *Thermal Science*, v. 22, n. 5, p. 2123–2135, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.2298/tsci180125278f>

FLORES YEPES, J. A. et al. Analysis of additives in gypsum coatings based on melamine, polycarbonate salts, polycarboxylate, and polycarboxylic acids. *Coatings*, v. 11, n. 10, p. 1204, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings11101204>

GERALDO, R. H. et al. Gypsum plaster waste recycling: a potential environmental and industrial solution. *Journal of Cleaner Production*, v. 164, p. 288–300, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.188>

GLIOZZO, E.; PIZZO, A.; LA RUSSA, M. F. Mortars, plasters and pigments—research questions and sampling criteria. *Archaeological and Anthropological Sciences*, v. 13, n. 11, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12520-021-01393-2>

HILLER, A. H. et al. Kinetics of gypsum dehydration. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Dordrecht, v. 49, n. 3, p. 1345–1352, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1011597106589>.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA. *Panorama atual do Arranjo Produtivo Local (APL) gesso da região do Araripe-PE: linha de base 2023*. Rio de Janeiro: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2023.

IWASAKI, S.; KOGA, N. Thermal dehydration of calcium sulfate dihydrate: physico-geometrical kinetic modeling and the influence of self-generated water vapor. *Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP*, v. 22, n. 39, p. 22436–22450, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/d0cp04195e>

JACOBS, A.; PEREIRA, J.; SOUZA, E. C. Thermal decomposition mechanisms of gypsum: a comprehensive kinetic analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 143, p. 1245–1257, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12045-9>

KLIMCHOUK, A. The dissolution and conversion of gypsum and anhydrite. *International Journal of Speleology*, v. 25, n. 3, p. 2, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.5038/1827-806x.25.3.2>

KOPER, A. et al. Influence of the calcination temperature of synthetic gypsum on the particle size distribution and setting time of modified building materials. *Energies*, v. 13, n. 21, p. 5759, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13215759>

KRAUSE, F. et al. Reactivity of gypsum-based materials subjected to thermal load: investigation of reaction mechanisms. *Materials*, v. 13, n. 6, p. 1427, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13061427>

KREJSOVÁ, J.; NOVÁK, T.; SUCHOMEL, M. The effect of hemihydrate phase purity on mechanical properties of commercial plasters. *Construction and Building Materials*, v. 393, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.131223>

KYONO, A. et al. Structural evolution of gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) during thermal dehydration. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, v. 117, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.2465/jmps.220811>

LEE, J.-H.; OGURA, H.; SATO, S. Reaction control of  $\text{CaSO}_4$  during hydration/dehydration repetition for chemical heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, v. 63, n. 1, p. 192–199, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.043>

LIRA, C. P. L. et al. Gipsita. *Balanço Mineral Brasileiro*. Brasília: DNPM/PE,

2015.

MASLYK, M. et al. A fast and sustainable route to bassanite nanocrystals from gypsum. *Advanced Functional Materials*, v. 32, n. 20, p. 2111852, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adfm.202111852>

MISHMASTNEHI, M. et al. Advanced materials engineering in historical gypsum plaster formulations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 120, n. 7, p. e2208836120, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.2208836120>

MIYAZAKI, H. The transformation of calcium sulfate hemihydrate to II-anhydrite. *Gypsum & Lime*, 1969. Disponível em: <https://doi.org/10.11451/mukimate1953.1969.59>

MOREIRA, A. L. M. S. et al. Production of machined gypsum/polymer blocks for use in three-dimensional milling systems and later conversion to hydroxyapatite. *Cerâmica*, v. 69, n. 392, p. 346–354, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132024703923519>

MUN, S.; YOO, J. Operating key factor analysis of a rotary kiln using a predictive model and Shapley additive explanations. *Electronics*, v. 13, n. 22, p. 4413, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics13224413>

MURARIU, M. et al. Recent advances in production of ecofriendly polylactide (PLA)-calcium sulfate (anhydrite II) composites: from the evidence of filler stability to the effects of PLA matrix and filling on key properties. *Polymers*, v. 14, n. 12, p. 2360, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14122360>

OGATA, K. et al. Effect on rotation speed on thermal dehydration characteristics of waste gypsum particles in a constant volume rotary vessel by heating. *Materials*, v. 17, n. 6, p. 1276, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma17061276>

PUERTO, J. D. et al. Reliability of reusing gypsum flat board grinded waste as a conventional plaster replacement for buildings. *Sustainability*, v. 16, n. 18, p. 7889, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16187889>

REJAB, L. Evaluation of some physical properties of locally prepared alpha-calcium sulfate hemihydrate. *Al-Rafidain Dental Journal*, v. 13, n. 1, p. 14–20, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.33899/rden.2013.84673>

RISDONNE, V. et al. A multi-analytical study of historical coated plaster surfaces: the examination of a nineteenth-century V&A cast of a tombstone. *Heritage Science*, v. 9, n. 1, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00533-0>

ROMANO-MATOS, V. et al. Improvement of plasterboard properties by the control of polymethylhydrosiloxane dosage, stirring time, and drying temperature applied to the calcium sulfate hemihydrate and water mixture. *Materials*, v. 16, n. 14, p. 5084, 2023. Disponível em:

<https://doi.org/10.3390/ma16145084>

SALMAN, O. A.; KHRAISHI, N. Thermal decomposition of limestone and gypsum by solar energy. *Solar Energy (Phoenix, Ariz.)*, v. 41, n. 4, p. 305–308, 1988. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(88\)90025-4](https://doi.org/10.1016/0038-092x(88)90025-4)

SEUFERT, S. et al. Discrimination of bassanite and anhydrite III dehydrated from gypsum at different temperatures. *Zeitschrift für Kristallographie Supplements*, v. 2009, n. 30, p. 447–452, 2009a. Disponível em: <https://doi.org/10.1524/zksu.2009.0066>

SEUFERT, S. et al. Quantitative determination of anhydrite III from dehydrated gypsum by XRD. *Cement and Concrete Research*, v. 39, n. 10, p. 936–941, 2009b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.06.018>

SHEN, L. et al. Thermodynamic modeling of calcium sulfate hydrates in the  $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$  system from 273.15 to 473.15 K with extension to 548.15 K. *Journal of Chemical and Engineering Data*, v. 64, n. 6, p. 2697–2709, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00112>

SILVA, A. A.; OLIVEIRA, L. C.; FERREIRA, P. P. Caracterização físico-química de gipsita do Polo Gesseiro do Araripe. *Revista Cerâmica*, v. 64, n. 369, p. 102–107, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643702194>

SILVA, J. W. L.; SILVA, J. A. A. DA; TAVARES, J. A. Volumetric production of Eucalyptus spp. clones under different spacing in a severe drought period in the semi-arid region of Pernambuco, Brazil. *Floresta*, v. 52, n. 1, p. 150, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/ufv.v52i1.78798>

SILVA, T. G. DA et al. Gypsum recommendations for a typical Dystrophic Red Argisol cropped with *Phaseolus vulgaris*. *Revista CERES*, v. 71, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-737x2024710014>

SINGH, M. *Gypsum & gypsum products: their science & technology*. London: CRC Press, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781003345008>

SOPHIA, M.; SAKTHIESWARAN, N.; BABU, G. O. Gypsum as a construction material—a review of recent developments. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, v. 2, n. 12, p. 1–9, 2016. ISSN (online): 2349-6010.

SOUZA, C. E.; FERRAZ, A. V. Study of the conversion of the dihydrate phase into  $\beta$ -hemihydrate from two varieties of the mineral gypsum. *Revista Matéria*, v. 30, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0726>

SOUZA, E. D. C.; PESSOA OLIVEIRA, R. A.; DE VASCONCELOS FERRAZ, A. Characterization of different samples of the gypsum mineral from the Araripe gypsum Pole: from macro to micro with Rietveld refinement. *Holos*, v. 8, n. 39, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2023.14902>

SOUZA, J. C. DE et al. Mining scheduling of gypsum exploitation by terrace mining method: an eco-sustainable alternative. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 15, n. 2, p. 175–181, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/2176-1523.1374>

STAWSKI, T. M. et al. Solution-driven processing of calcium sulfate: the mechanism of the reversible transformation of gypsum to bassanite in brines. *Journal of Cleaner Production*, v. 440, n. 141012, p. 141012, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141012>

TANG, Y. et al. Dehydration pathways of gypsum and the rehydration mechanism of soluble anhydrite  $\gamma$ -CaSO<sub>4</sub>. *ACS Omega*, v. 4, n. 4, p. 7636–7642, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03476>

URBANO, J. J. et al. Dynamic modeling of the heat transfer process in rotary kilns with indirect oil heating: parametric analysis of gypsum calcination case. *Thermal Science*, v. 26, n. 2 Part C, p. 1637–1648, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.2298/tsci210523245u>

VASCONCELOS, W. E. DE et al. Analysis of gypsum ore conversion with aid of gamma-ray transmission and CCRD. *Progress in Nuclear Energy*, v. 53, n. 8, p. 1185–1189, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.08.001>

WENMIN, X.; ZHUGANG, Y. Application of fuzzy-PID in control of FC furnace gypsum calcination temperature. In: *12th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, 2012. Anais... IEEE, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icarcv.2012.6485428>

YAGHOBZADEH, H. et al. A review of the structure, application, production process and effect of additives in traditional gypsum mortar. *Journal of Research on Archaeometry*, v. 8, n. 1, p. 185–205, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.52547/jra.8.1.185>

ZHAI, H. et al. Experimental study on application of anhydrous plaster gypsum. *Asian Journal of Chemistry*, v. 26, n. 6, p. 1580–1582, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.14233/ajchem.2014.17297>

## **CAPÍTULO II**

**ARTIGO ENVIADO PARA O  
PERIÓDICO ANAIS DA ACADEMIA  
BRASILEIRA DE CIÊNCIAS -  
AABC (QUALIS A2 CAPES)**

## RESUMO

A qualidade do gesso comercial é diretamente influenciada pela eficiência da desidratação térmica da gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), processo responsável pela formação de diferentes fases minerais, como o semi-hidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) e a anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ). Neste trabalho, foram desenvolvidos modelos estequiométricos algébricos baseados no teor de água de hidratação do gesso e na composição química da gipsita para estimar as proporções dessas fases no produto final. Utilizou-se a linguagem Python para, a partir da análise estequiométrica da desidratação térmica da gipsita, elaborar um código capaz de quantificar os teores das fases minerais presentes em amostras de gesso comercial. Foram analisadas amostras de sete tipos distintos de gesso produzidos no Polo Gesseiro do Araripe (PGA). Os resultados revelaram teores médios de semi-hidrato de 86,12% nos gessos de fundição e 82,34% nos gessos de revestimento. As variações percentuais entre os teores de di-hidrato, semi-hidrato e anidrita influenciam no tempo de pega. Os valores das variações dos teores das fases minerais entre os obtidos por simulação (Python) e os determinados experimentalmente (DTG) foram inferiores a 2,03%. A metodologia proposta apresenta potencial para aplicação em rotinas de controle de qualidade e na otimização de fornos industriais.

**Palavras-chave:** Gesso; Gipsita; Desidratação térmica; Cálculo estequiométrico; Fases minerais; Python.

## ABSTRACT

The quality of commercial gypsum is directly influenced by the efficiency of the thermal dehydration of gypsum rock ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), a process responsible for the formation of different mineral phases, such as hemihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) and anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ). In this study, algebraic stoichiometric models were developed based on the hydration water content of gypsum and the chemical composition of gypsum rock to estimate the proportions of these phases in the final product. Python programming language was used to create a code capable of quantifying the contents of the mineral phases present in commercial gypsum samples, based on the stoichiometric analysis of the thermal dehydration of gypsum rock. Samples of seven different types of gypsum produced in the Araripe Gypsum Pole (PGA) were analyzed. The results revealed average hemihydrate contents of 86.12% in casting gypsums and 82.34% in plastering gypsums. The percentage variations among the contents of dihydrate, hemihydrate, and anhydrite influence the setting time. The differences in mineral phase contents between the simulated results (Python) and those determined experimentally (DTG) were below 2.03%. The proposed methodology shows potential for application in quality control routines and in the optimization of industrial kilns.

**Keywords:** Gypsum; Gypsum rock; Thermal dehydration; Stoichiometric calculation; Mineral phases; Python.

## 1 INTRODUÇÃO

O sulfato de cálcio di-hidratado, amplamente conhecido como gesso, é um dos insumos mais versáteis utilizados nas indústrias da construção civil, odontologia, medicina e moldagem industrial. Sua relevância decorre da facilidade de manipulação, baixo custo e capacidade de endurecimento após adição de água. Comercialmente, o gesso pode ser encontrado em três formas cristalinas principais: di-hidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), semi-hidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) e anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), cuja proporção no material influencia diretamente características como tempo de pega, trabalhabilidade, retração e resistência mecânica (Westgate et al 2018; Iwasaki & Koga 2020).

A obtenção do gesso ocorre por meio da desidratação térmica da gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), sendo este um processo altamente dependente da homogeneidade térmica no interior dos fornos industriais. Temperaturas abaixo ou acima da faixa ideal de conversão (entre 120 °C e 180 °C) podem resultar, respectivamente, em resíduos de di-hidrato ou formação excessiva de anidrita no produto final (Jacobs et al. 2023). Essa heterogeneidade leva à coexistência de múltiplas fases minerais, dificultando o controle de qualidade e a padronização do material comercializado.

As análises físico-químicas tradicionais, como difração de raios X (DRX), análise térmica (TG/DTG) e espectroscopia no infravermelho, são comumente empregadas para caracterização dessas fases. Contudo, esses métodos exigem equipamentos especializados e mão de obra altamente qualificada, o que dificulta sua aplicação rotineira em ambientes de produção (Badens et al. 1999; Guatame-Garcia 2019). Nesse contexto, cresce o interesse por ferramentas computacionais que permitam inferir a composição mineralógica do gesso a partir de dados de análises físico-químicas convencionais, como teor de água de hidratação, CaO e  $\text{SO}_3$  (Paulik et al. 1992; Krejsová et al. 2024).

A escolha de uma linguagem computacional adequada deve preceder à elaboração de um algoritmo computacional para a implantação de técnicas de análises numéricas dos efeitos. O uso do Python como linguagem computacional para o desenvolvimento de algoritmos é justificado por sua sintaxe simples, vasta biblioteca de recursos científicos e ampla aceitação na comunidade acadêmica e industrial (dos SANTOS et al., 2023). Python oferece

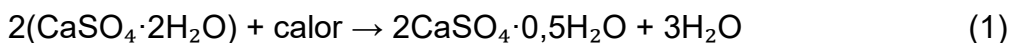
ferramentas robustas para manipulação de dados, cálculos numéricos, análise estatística e visualização gráfica, sendo especialmente útil em estudos experimentais e modelagens complexas. Além disso, permite fácil integração com outras plataformas e favorece a reprodutibilidade dos resultados, aspecto fundamental em pesquisas científicas. Sua aplicabilidade em ambientes como Google Colab facilita o compartilhamento e a execução remota de códigos, sem necessidade de instalação local de softwares, promovendo acessibilidade e eficiência no desenvolvimento de soluções computacionais.

Este trabalho propõe a construção e validação experimental de um algoritmo computacional desenvolvido em linguagem Python, que utiliza relações estequiométricas aplicadas às condições químicas do gesso comercial, conforme as normas da ABNT (NBR 13207:2017), para determinar a composição relativa das fases di-hidratada, semi-hidratada e anidra. O modelo incorpora um fator de correção (FC), que ajusta os valores de CaO e SO<sub>3</sub> com base na variação do teor de água de cristalização, considerando a presença de impurezas típicas da gipsita sedimentar, como carbonatos, óxidos metálicos e sílica.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Fundamentação Estequiométrica

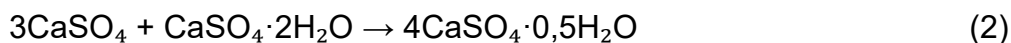
O sulfato de cálcio semi-hidratado (CaSO<sub>4</sub>·0,5H<sub>2</sub>O), comumente denominado gesso, é obtido mediante a remoção parcial da água presente na forma di-hidratada do mineral Gipsita (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) através do fornecimento de energia térmica, usualmente em temperaturas superiores a 70 °C. A equação estequiométrica que descreve esse processo é a seguinte (Iwasaki & Koga 2020):



Essa transformação não apenas reduz o teor de água do material de 20,9% (em condições de pureza mineral absoluta) para 6,2%; como também modifica significativamente as proporções dos principais óxidos constituintes, elevando os teores de CaO e SO<sub>3</sub> para 38,6% e 55,2%, respectivamente (Souza et al. 2023; Sáez-Pérez et al. 2022). O gesso apresenta propriedades relevantes, como a capacidade de endurecer após a adição de água,

característica passível de modulação para se alcançar um tempo de pega específico. Além disso, a variação volumétrica observada durante a cura, ou pega, torna este material amplamente aplicável em processos de moldagem (Westgate et al. 2018).

Sob condições ideais e homogêneas de temperatura no interior do reator, seria esperado que todo o di-hidrato fosse convertido integralmente em semi-hidrato. No entanto, na prática industrial, as condições térmicas frequentemente se mostram heterogêneas, resultando em zonas dentro do forno que apresentam desvios em relação à temperatura ótima de reação (Jacobs et al. 2023). Regiões com temperatura insuficiente podem levar à permanência de di-hidrato no produto final, enquanto zonas com superaquecimento promovem a formação de anidrita. Em situações de forte heterogeneidade térmica, a coexistência de anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) e di-hidrato poderia ocorrer. No entanto, essas fases interagem quimicamente segundo a reação descrita por Badens et al. (1999):



Esse comportamento justifica a predominância, nas massas finais dos gessos termicamente desidratados, de misturas compostas exclusivamente por anidrita e semi-hidrato; di-hidrato e semi-hidrato; ou apenas semi-hidrato (Shinya et al. 2016). Dessa forma, após a saída do material do reator deve ocorrer a chamada etapa de estabilização do produto, essencial para a definição da composição final.

Ao se considerar a conversão estequiométrica da gipsita em suas fases parcialmente ou totalmente desidratadas (semi-hidrato e anidrita), a adoção de valores médios de composição química das amostras é uma prática aceitável e metodologicamente sustentada (Souza, Oliveira & Ferraz, 2023). Essa abordagem reduz a complexidade analítica, facilita a aplicação de modelos algébricos e computacionais — como o proposto na presente dissertação — e mantém a confiabilidade dos resultados dentro dos limites de variabilidade natural do minério. Em suma, a padronização da composição química média torna-se uma estratégia eficaz para fins de modelagem, controle de qualidade e otimização de processos térmicos no setor gesseiro.

Considerando um minério de gipsita com 100% de pureza, a composição teórica do gesso contendo exclusivamente a fase semi-hidratada apresenta-se

como: 6,21% de água de hidratação ( $\text{H}_2\text{O}_{\text{HIDRAT}}$ ), 38,62% de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e 55,17% de anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ) (Krejsová et al. 2024). Entretanto, além dos aspectos relacionados às condições térmicas mencionadas, deve-se também considerar a presença de impurezas minerais, como o carbonato de magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ) e o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), naturalmente presentes na gipsita. No caso do  $\text{CaCO}_3$ , por exemplo, o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) pode reagir com o  $\text{SO}_3$  disponível, originando novamente anidrita (Sáez-Pérez et al. 2022). Por esse motivo, uma análise rigorosa das interações entre esses constituintes é fundamental para garantir a acurácia em se desejando a determinação do grau de conversão da reação, com base no teor percentual de  $\text{H}_2\text{O}_{\text{HIDRAT}}$ .

### 2.1.1 Base para Análise Estequiométrica

Além dos carbonatos de cálcio e de magnésio, outras impurezas frequentemente encontradas em depósitos minerais de gipsita incluem sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e óxidos do tipo  $\text{R}_2\text{O}_3$ , como a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). A eventual presença de excesso de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) ou de anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ) no sistema também contribui para a formação de fases secundárias, que devem ser consideradas como impurezas (Ciullo 1996). A quantificação dessas espécies e sua contribuição na composição final do sulfato de cálcio semi-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ), obtido por desidratação térmica da gipsita, exige o estabelecimento prévio de uma nomenclatura padronizada, essencial para a formulação e compreensão das equações envolvidas neste estudo.

Com base na literatura clássica, três pressupostos fundamentais devem ser adotados para uma correta interpretação dos dados provenientes das análises químicas do gesso (Vogel 1989):

- Os carbonatos presentes, especificamente  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$ , não sofrem decomposição sob as temperaturas normalmente aplicadas para a conversão térmica da gipsita em semi-hidrato, uma vez que essas temperaturas são inferiores aos valores exigidos para a calcinação desses sais.
- Todo o óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) presente na amostra provém exclusivamente da decomposição térmica do  $\text{MgCO}_3$ .
- A totalidade do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) identificado na análise química é oriunda das decomposições térmicas do  $\text{CaCO}_3$  e do  $\text{MgCO}_3$ .

### 2.1.2 Cálculo de CO<sub>2</sub> usado na formação do MgCO<sub>3</sub>

A decomposição térmica do carbonato de magnésio é representada pela equação estequiométrica:



em que a relação molar entre MgO e CO<sub>2</sub> é 1:1. Considerando suas massas molares (MgO = 40 g/mol e CO<sub>2</sub> = 44), tem-se:

$$\text{CO}_2^* (\%) = (44/40) \times \text{MgO}\% = 1,1 \times \text{MgO}\% \quad (4)$$

Em CO<sub>2</sub>\* (%) é o CO<sub>2</sub> percentual usado na formação do MgCO<sub>3</sub>.

### 2.1.3 Cálculo do teor de CO<sub>2</sub> usado na formação do CaCO<sub>3</sub>

A decomposição do carbonato de cálcio ocorre conforme a estequiometria:



O CO<sub>2</sub> proveniente do CaCO<sub>3</sub> (denotado CO<sub>2</sub>\*\*\*) é calculado pela proporção estequiométrica:

$$\text{CO}_2^{**}(\%) = (44/56) \times \text{CaO}\% = 0,79 \times \text{CaO}\% \quad (6)$$

Sendo CaO\*\*\*% o teor percentual de CaO usado na formação do CaCO<sub>3</sub>.

### 2.1.4 Estimativa de CaO disponível para formação do gesso

O total de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>TOTAL) na amostra (avaliado pela análise de perda ao fogo), ou seja, ligado ao MgCO<sub>3</sub> e ao CaCO<sub>3</sub> será:

$$\text{CO}_2\text{TOTAL} (\%) = \text{CO}_2^*\% + \text{CO}_2^{**}\% \quad (7)$$

Ou seja,

$$\text{CO}_2\text{TOTAL} (\%) = 1,1 \times \text{MgO}\% + 0,79 \times \text{CaO}\% \quad (8)$$

Pode-se então estimar o teor de CaO disponível (CaODISP) para formação de gesso, uma vez que o CaO\* usado na formação do CaCO<sub>3</sub>\* vem de:

$$\text{CaO}^{**}\% = (\text{CO}_2\text{TOTAL} - 1,1 \text{ MgO}\%)/0,79 \quad (9)$$

Levando a estimativa do óxido de cálcio disponível para formação do gesso ( $CaO_{DISP}$ ) para:

$$CaO_{DISP} = CaO_{Total} - \left[ \left( \frac{CO_{2TOTAL} - 1,1MgO}{0,79} \right) \right] \quad (10)$$

Em que  $CaO_{TOTAL}$  é o valor de CaO obtido por análise química e  $CO_{2TOTAL}$  é o valor da perda ao fogo (Sithole et al., 2021), também obtido por análise química.

### 2.1.5 Fator de Correção

Considerando que impurezas minerais como argilominerais, carbonatos ( $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ ), óxidos metálicos ( $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ) e sílica ( $SiO_2$ ) são comumente presentes nos depósitos naturais, a constituição do minério de gipsita não é de apenas sulfato de cálcio em diferentes graus de hidratação. A reação responsável pela conversão da gipsita em gesso é apenas a perda de água de hidratação e, dessa forma, os constituintes do gesso são os mesmos constituintes do minério de gipsita em proporções diferenciadas pelo teor de água que permanece no gesso. Neste contexto

$$FC = \frac{100 - (H_2O_{Gipsita} - H_2O_{Gesso})}{100} \quad (11)$$

Em que:

$H_2O_{Gipsita}$  – É o teor de água de cristalização da amostra de gipsita, obtido por via analítica;

$H_2O_{Gesso}$  – é o teor de água de cristalização da amostra de gesso comercial.

Valores de FC próximos de 1 indicam uma gipsita com alto grau de pureza mineralógica, enquanto valores significativamente inferiores a essa unidade sugerem a presença de contaminantes insolúveis ou substituições estruturais que resultam na redução da quantidade de água quimicamente ligada à estrutura do cristal. Em amostras naturais oriundas de bacias sedimentares, é comum encontrar FP na faixa de 0,70 a 0,95, dependendo do grau de intemperismo e da presença de inclusões minerais secundárias (Guatame-Garcia 2019) como parâmetro complementar em estudos de controle

de qualidade de jazidas, em avaliações comparativas de fontes de matéria-prima e em ajustes de parâmetros de calcinação em fornos industriais, já que a pureza do minério impacta diretamente na eficiência térmica do processo de desidratação e na qualidade do gesso produzido (Souza et al. 2023).

Dentro de um entendimento matemático e computacional refinado pode-se calcular os valores dos parâmetros de composição do gesso a partir dos parâmetros de composição da gipsita (com exceção da água de hidratação) com auxílio dos respectivos valores corrigidos com FC. Dessa forma, tanto na verificação das condições primárias e secundárias, quanto nas fórmulas finais de cálculo dos teores de fases (di-hidrato, semi-hidrato e anidrita), utiliza-se os valores desses parâmetros corrigidos sem risco de inconsistência lógica (Paulik et al. 1992).

## **2.2. Estimativa das Fases Minerais no Gesso Comercial**

A desidratação térmica da gipsita, principal matéria-prima para a produção de gesso, leva à formação de diferentes fases de sulfato de cálcio, como o semi-hidrato e a anidrita, dependendo das condições de calcinação empregadas. Em temperaturas moderadas (130–180 °C) sob pressão atmosférica, obtém-se predominantemente o semi-hidrato beta (Souza & Ferraz, 2025), enquanto temperaturas superiores a 250 °C, especialmente sob baixa umidade relativa, favorecem a formação da anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) (Seufert et al., 2009a).

A identificação e quantificação dessas fases no gesso comercial são fundamentais para garantir a qualidade do produto final, uma vez que as diferentes fases apresentam comportamentos distintos em contato com a água. A presença de di-hidrato, por exemplo, pode indicar falhas na calcinação, enquanto a anidrita, mais estável e de reatividade reduzida, aumenta significativamente o tempo de pega (Kovacs et al., 2008). Dessa forma, o conhecimento da distribuição mineralógica do produto influencia diretamente propriedades tecnológicas como tempo de endurecimento e resistência mecânica (Kobetičová et al., 2024).

Para a estimativa das fases presentes, adota-se uma abordagem estequiométrica baseada no teor de água de hidratação residual no produto calcinado. Como cada fase mineral contém uma quantidade fixa e conhecida

de água de cristalização, a análise química permite inferir, por meio de raciocínio algébrico, os teores relativos de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CaSO}_4$  no material final. O teor de água de hidratação, portanto, é a variável central que orienta a formulação de equações específicas para cada cenário de calcinação. Essas equações compõem um modelo algébrico robusto que poderá, posteriormente, ser traduzido em linguagem computacional para fins de automação e controle de qualidade em plantas industriais.

A quantificação do óxido de cálcio disponível (CaODISP) é indispensável para a formação do sulfato de cálcio (Beretka et al. 2007). Esse valor corresponde à fração de CaO que excede àquela quimicamente associada ao carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e que, portanto, encontra-se livre para reagir com o anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ). O valor de CaODISP poderá ser limitante, suficiente ou excedente em relação ao  $\text{SO}_3$  presente na amostra. Como a reação entre CaODISP e  $\text{SO}_3$  ocorre em proporção molar 1:1, o equilíbrio estequiométrico entre esses dois componentes pode ser estabelecido pela relação CaODISP/ $\text{SO}_3$ . Sendo assim, três condições primárias distintas, devendo ser consideradas para se chegar às concentrações de: semi-hidrato (H) apenas, semi-hidrato e anidrita (A) ou di-hidrato (D) e semi-hidrato, a partir da água de hidratação em uma amostra do gesso, utilizando parâmetros resultantes das análises da gipsita corrigidos pelo fator FC quantificado pela Equação (7).

Portanto, com base na estequiometria das reações de desidratação, foi desenvolvido um modelo algébrico que permite estimar os teores de cada fase a partir de parâmetros obtidos em análises físico-químicas da gipsita original e do gesso produzido, como os teores de CaO,  $\text{SO}_3$ , MgO,  $\text{CO}_2$  e a água de hidratação.

A razão entre o óxido de cálcio disponível (CaOdisp) e o óxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ) pode indicar diferentes condições do processo de desidratação térmica da gipsita. Quando essa razão se encontra dentro de uma faixa aceitável, pode-se prosseguir com um critério de avaliação inicial da composição mineralógica do gesso obtido.

A razão entre o óxido de cálcio disponível (CaOdisp) e o óxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ) pode indicar diferentes condições do processo de desidratação térmica da gipsita. Quando essa razão se encontra dentro de uma faixa aceitável, pode-se prosseguir com um critério de avaliação inicial da composição mineralógica

do gesso obtido. Para considerar a variabilidade inerente aos resultados de análises químicas, aplica-se uma margem de incerteza de  $\pm 2\%$  sobre a razão  $\text{CaO}_{\text{DISP}}/\text{SO}_3$ , o que permite definir intervalos de aceitação para classificação da condição primária 1, 2 e 3 (CP1, CP2 ou CP3).

*Condição Primária 1:*

$$\frac{\text{CaO}_{\text{DISP}}}{\text{SO}_3} = \frac{56}{80} = 0,7 \pm \sigma_m \quad (12)$$

Nesta condição de equilíbrio,  $\sigma_m$  denota a incerteza da razão entre os teores de  $\text{CaO}_{\text{DISP}}$  e  $\text{SO}_3$  na composição do gesso analisado. Os valores de **CaO<sub>DISP</sub>** e **SO<sub>3</sub>** encontram-se em negrito para denotar que estão corrigidos com o auxílio do FC (Equação 11).

*Condição Primária 2:*

$$\frac{\text{CaO}_{\text{DISP}}}{\text{SO}_3} > 0,7 + \sigma_m \quad (13)$$

Quando a razão é superior a  $0,7 + \sigma_m$  e;

*Condição Primária 3:*

$$\frac{\text{CaO}_{\text{DISP}}}{\text{SO}_3} < 0,7 - \sigma_m \quad (14)$$

Cada uma dessas três condições primárias define caminhos distintos, cada uma através de 3 condições secundárias, para a estimativa das fases presentes no material analisado, e deve ser verificada previamente à aplicação das equações específicas de quantificação mineralógica.

Definindo-se as condições e expressões de cálculo resultantes têm-se:

***Condição Primária 1***

Nesta condição não existe excesso de  $\text{CaO}_{\text{DISP}}$  ou  $\text{SO}_3$ , restando a verificação de casos da composição do produto; se composto apenas de semi-

hidrato, se composto de semi-hidrato e anidrita, ou se composto de semi-hidrato e di-hidrato.

A razão entre a soma dos óxidos e o teor de água no gesso permite classificar o material quanto às condições secundárias 1, 2 e 3 de desidratação (CS1, CS2 ou CS3). Essa classificação é fundamental para a escolha do conjunto de equações utilizado na estimativa da composição mineralógica final. Quando a condição secundária é identificada como CS1, assume-se que o gesso é constituído predominantemente por semi-hidrato. A equação correspondente permite estimar o teor dessa fase no produto.

*Condição Secundária 1/1:*

$$\frac{SO_3 + CaO_{DISP}}{H_2O_{Gesso}} = 15,1 \pm \sigma_m \quad (15)$$

Neste caso, o sistema pode ser interpretado como contendo exclusivamente sulfato de cálcio semi-hidratado ( $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$ ). O teor percentual de semi-hidrato (H) na amostra é dado por:

$$H = SO_3 + CaO_{DISP} + H_2O_{Gesso} \quad (16)$$

Na condição CS2, há formação concomitante de semi-hidrato e anidrita. A estimativa do teor de semi-hidrato é feita com base em um coeficiente fixo multiplicado pelo teor de água do gesso, enquanto a anidrita é obtida por diferença.

*Condição secundária 1/2:*

$$\frac{SO_3 + CaO_{DISP}}{H_2O_{Gesso}} > 15,1 + \sigma_m \quad (17)$$

Infere-se neste caso que existe a presença simultânea de semi-hidrato e anidrita, uma vez que a água de hidratação é menor do que na condição de só haver semi-hidrato. Daí, a totalidade da água combinada está associada apenas ao semi-hidrato, sendo a anidrita completamente anidra. As proporções de cada uma dessas fases podem ser obtidas mediante um sistema de duas

equações algébricas:

$$A + H = \mathbf{SO}_3 + \mathbf{CaO}_{DISP} + \mathbf{H}_2\mathbf{O}_{Gesso} \quad (18)$$

e

$$\frac{H}{\mathbf{H}_2\mathbf{O}_{Gesso}} = \frac{136+9}{9} \quad (19)$$

Cuja resolução leva a:

$$H = 16,1 \cdot \mathbf{H}_2\mathbf{O}_{Gesso} \quad (20)$$

e, considerando a pureza do minério,

$$A = (\mathbf{SO}_3 + \mathbf{CaO}_{DISP} + \mathbf{H}_2\mathbf{O}_{Gesso}) - 16,1 \cdot \mathbf{H}_2\mathbf{O}_{Gesso} \quad (21)$$

Para a condição CS3, considera-se a presença de semi-hidrato e di-hidrato. A equação proposta permite estimar o teor de di-hidrato, utilizando a água presente e a soma dos óxidos. O semi-hidrato é então obtido pela diferença entre a soma dos óxidos mais a água e o valor estimado de di-hidrato.

*Condição secundária 1/3:*

$$\frac{\mathbf{SO}_3 + \mathbf{CaO}_{DISP}}{\mathbf{H}_2\mathbf{O}_{Gesso}} < 15,1 - \sigma_m \quad (22)$$

Infere-se a presença de semi-hidrato e di-hidrato, uma vez que se observa uma quantidade residual de sulfato de cálcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), indica pela quantidade de água maior que a existente quando se tem apenas a presença de semi-hidrato. Então os teores percentuais de semi-hidrato (H) e di-hidrato (D) são obtidas a partir do seguinte sistema de equações algébricas:

$$H + D = \mathbf{SO}_3 + \mathbf{CaO}_{DISP} + \mathbf{H}_2\mathbf{O}_{Gesso} \quad (23)$$

e

$$\frac{9}{145} \cdot H + \frac{36}{172} \cdot D = \mathbf{H}_2\mathbf{O}_{Gesso} \quad (24)$$

Levando-se em consideração a pureza do minério de gipsita, têm-se:

$$D = \frac{76,998 \cdot \mathbf{H}_2\mathbf{O}_{Gesso} - 4,78(\mathbf{SO}_3 + \mathbf{CaO}_{DISP} + \mathbf{H}_2\mathbf{O}_{Gesso})}{11,32} \quad (25)$$

e

$$H = \mathbf{SO}_3 + \mathbf{CaO}_{DISP} + \mathbf{H}_2\mathbf{O}_{Gesso} - D \quad (26)$$

### **Condição Primária 2**

A verificação de uma razão superior a  $0,7 + \sigma_m$  entre os teores percentuais de óxido de cálcio disponível ( $\text{CaO}_{\text{DISP}}$ ) e anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ) caracteriza um cenário de excesso de CaO em relação ao  $\text{SO}_3$ . Nessa condição, assume-se que todo o  $\text{SO}_3$  presente encontra-se completamente reagido com o CaO disponível, formando sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) em sua totalidade. Considerando a estequiometria da reação entre CaO e  $\text{SO}_3$ , o teor de sulfato de cálcio gerado pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$\text{CaSO}_4(\%) = \text{SO}_3 + 0,7 \cdot \text{SO}_3 = 1,7 \cdot \text{SO}_3 \quad (27)$$

A composição do produto final pode então ser inferida por meio da comparação entre o teor estimado de  $\text{CaSO}_4$  e o valor da água de cristalização ( $\text{H}_2\text{O}_{\text{HIDRAT}}$ ) determinada experimentalmente. Essa análise permite identificar se a amostra é constituída por uma combinação de semi-hidrato e anidrita, ou por uma mistura de semi-hidrato e di-hidrato. A partir dessa correlação, três distintos cenários devem ser considerados para a avaliação mineralógica do material.

Condição Secundária 2/1:

$$\frac{1,7 \cdot \text{SO}_3}{\text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}}} = 15,1 \pm \sigma_m \quad (28)$$

Para um valor da razão entre 1,7 vezes o teor de anidrido e o de água de hidratação do gesso, igual a  $15,1 \pm \sigma_m$ , só existe semi-hidrato presente no produto final, o qual pode ter seu percentual na amostra calculado a partir de:

$$\text{H} = 1,7 \text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} \quad (29)$$

Condição secundária 2/2:

$$\frac{1,7 \cdot \text{SO}_3}{\text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}}} > 15,1 + \sigma_m \quad (30)$$

Infere-se neste caso que existe a presença simultânea de semi-hidrato

e anidrita, uma vez que a água de hidratação é menor do que na condição de só haver semi-hidrato. Daí, a totalidade da água combinada está associada apenas ao semi-hidrato, sendo a anidrita completamente anidra. As proporções de cada uma dessas fases podem ser obtidas mediante um sistema de duas equações algébricas:

$$A + H = \text{SO}_3 + \text{CaO}_{\text{DISP}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} \quad (31)$$

e

$$\frac{H}{\text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}}} = \frac{145}{9} \quad (32)$$

Cuja resolução leva a:

$$H = 16,1 \cdot \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} \quad (33)$$

e, considerando a pureza do minério,

$$A = (\text{SO}_3 + \text{CaO}_{\text{DISP}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}}) - 16,1 \cdot \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} \quad (34)$$

Condição secundária 2/3:

$$\frac{1,7 \cdot \text{SO}_3}{\text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}}} < 15,1 - \sigma_m \quad (35)$$

Infere-se a presença de semi-hidrato e di-hidrato no gesso produzido, uma vez que se observa uma quantidade de água maior que a existente quando se tem apenas a presença de semi-hidrato. Então os teores percentuais de semi-hidrato (H) e di-hidrato (D) são obtidas a partir do seguinte sistema de equações algébricas (Birss, & Thorvaldson, 1955):

$$H + D = \text{SO}_3 + \text{CaO}_{\text{DISP}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} \quad (36)$$

e

$$\frac{9}{145} \cdot H + \frac{36}{172} \cdot D = \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} \quad (37)$$

Levando-se em consideração a pureza do minério de gipsita, têm-se:

$$D = \frac{76,998 \cdot \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} - 4,78(\text{SO}_3 + \text{CaO}_{\text{DISP}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}})}{11,32} \quad (38)$$

e

$$H = \text{SO}_3 + \text{CaO}_{\text{DISP}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} - D \quad (39)$$

**Condição Primária 3**

Uma razão entre os teores molares de  $\text{CaO}_{\text{DISP}}$  e  $\text{SO}_3$  menor que  $0,7 - \sigma_m$  indica que existe um excesso de  $\text{SO}_3$  e que todo o  $\text{CaO}_{\text{DISP}}$  é utilizado na formação do  $\text{CaSO}_4$ . A quantidade de  $\text{CaSO}_4$  formada será a soma do percentual de  $\text{CaO}_{\text{DISP}}$  mais o de  $\text{SO}_3$ . Ou seja,

$$\text{SO}_3 = \frac{80}{56} \text{CaO}_{\text{DISP}} \quad (40)$$

E a quantidade de  $\text{CaSO}_4$  formado será a soma do  $\text{CaO}_{\text{DISP}}$  mais o  $\text{SO}_3$ . Ou seja,

$$\text{CaSO}_4 = \text{CaO}_{\text{DISP}} \cdot \left(1 + \frac{80}{56}\right) \quad (41)$$

Condição Secundária 3/1:

$$\frac{2,43 \cdot \text{CaO}_{\text{DISP}}}{\text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}}} = 15,1 \pm \sigma_m \quad (42)$$

Neste caso infere-se que só há semi-hidrato, cujo teor, levando-se em conta a presença de contaminações chega-se a:

$$H = 2,43 \cdot \text{CaO}_{\text{DISP}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} \quad (43)$$

Condição Secundária 3/2:

$$\frac{2,43 \cdot \text{CaO}_{\text{DISP}}}{\text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}}} > 15,1 + \sigma_m \quad (44)$$

Para uma razão entre os teores molares de  $\text{SO}_3$  e água de cristalização maior que  $15,1 + \sigma_m$  tem-se a ocorrência simultânea de anidrita e semi-hidrato. Por isso, o sistema algébrico obtido pode levar ao seguinte sistema de equações algébricas:

$$A + H = 2,43 \cdot \text{CaO}_{\text{DISP}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} \quad (45)$$

e

$$\frac{9}{145} \cdot H = \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} \quad (46)$$

E como resultado dos teores minerais após a consideração da existência de impurezas tem-se:

$$H = 16,1 \cdot \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} \quad (47)$$

e

$$A = 2,43 \cdot \text{CaO}_{\text{DISP}} - 15,1 \cdot \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} \quad (48)$$

Condição secundária 3/3:

$$\frac{2,43 \cdot \text{CaO}_{\text{DISP}}}{\text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}}} < 15,1 - \sigma_m \quad (49)$$

Para a presente condição de verificação dos teores de di-hidrato e semi-hidrato inferidos pelas condições correspondentes, de uma quantidade de água de hidratação superior àquela esperada para a presença de apenas semi-hidrato, o sistema de equações algébricas é:

$$D + H = 2,43 \cdot \text{CaO}_{\text{DISP}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} \quad (50)$$

e

$$\frac{9}{145} \cdot H + \frac{36}{172} \cdot D = \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} \quad (51)$$

As Equações de (12) a (51) permitem estimar, de forma quantitativa, a composição mineralógica do gesso em situações onde os precursores reagem em proporções estequiometricamente balanceadas, mas o grau de hidratação dos produtos varia em função da distribuição térmica do sistema de desidratação.

$$H = 2,43 \cdot \text{CaO}_{\text{DISP}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} - D \quad (52)$$

e

$$D = \left[ \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} - \left( \frac{21,87}{145} \cdot \text{CaO}_{\text{DISP}} + \frac{9}{145} \text{H}_2\text{O}_{\text{Gesso}} \right) \right] \cdot \frac{12470}{1836} \quad (53)$$

O Quadro 1 resume as condições primárias e respectivas condições secundárias, bem como as expressões de cálculo associadas aos teores de minerais nos gessos produzido, em função dessas condições e dos resultados da análise química do minério de Gipsita utilizado como insumo do processo produtivo.

Quadro 1 – Expressões de cálculo que quantificam os teores de minerais presentes nos gessos produzidos a partir de minério de Gipsita

Condição Primária	Condição Secundária	Expressão de Cálculo
$\frac{CaO_{disp}}{SO_3} = 0,7 \pm \sigma_m$	(1) $\frac{SO_3 + CaO_{DISP}}{H_2O_{Gesso}} = 15,1 \pm \sigma_m$	$H = SO_3 + CaO_{DISP} + H_2O_{Gesso}$
	(2) $\frac{SO_3 + CaO_{DISP}}{H_2O_{Gesso}} > 15,1 + \sigma_m$	$H = 16,129 \cdot H_2O_{Gesso}$ $A = (SO_3 + CaO_{DISP} + H_2O_{Gesso}) - 16,1 \cdot H_2O_{Gesso}$
	(3) $\frac{SO_3 + CaO_{DISP}}{H_2O_{Gesso}} < 15,1 - \sigma_m$	$D = \frac{76,998 \cdot H_2O_{Gesso} - 4,78(SO_3 + CaO_{DISP} + H_2O_{Gesso})}{11,32}$ $H = SO_3 + CaO_{DISP} + H_2O_{Gesso} - D$
$\frac{CaO_{disp}}{SO_3} > 0,7 + \sigma_m$	(1) $\frac{1,7 \cdot SO_3}{H_2O_{Gesso}} = 15,1 \pm \sigma_m$	$H = 1,7 \cdot SO_3 + H_2O_{Gesso}$
	(2) $\frac{1,7 \cdot SO_3}{H_2O_{Gesso}} > 15,1 + \sigma_m$	$H = 16,1 \cdot H_2O_{Gesso}$ $A = (SO_3 + CaO_{DISP} + H_2O_{Gesso}) - 16,1 \cdot H_2O_{Gesso}$
	(3) $\frac{1,7 \cdot SO_3}{H_2O_{Gesso}} < 15,1 - \sigma_m$	$D = \frac{76,998 \cdot H_2O_{Gesso} - 4,78(SO_3 + CaO_{DISP} + H_2O_{Gesso})}{11,32}$ $H = SO_3 + CaO_{DISP} + H_2O_{Gesso} - D$
$\frac{CaO_{disp}}{SO_3} < 0,7 - \sigma_m$	(1) $\frac{2,43 \cdot CaO_{DISP}}{H_2O_{Gesso}} = 15,1 \pm \sigma_m$	$H = 2,43 \cdot CaO_{DISP} + H_2O_{Gesso}$
	(2) $\frac{2,43 \cdot CaO_{DISP}}{H_2O_{Gesso}} > 15,1 + \sigma_m$	$H = 16,1 \cdot H_2O_{Gesso}$ $A = 2,43 \cdot CaO_{DISP} - 15,1 \cdot H_2O_{Gesso}$
	(3) $\frac{2,43 \cdot CaO_{DISP}}{H_2O_{Gesso}} < 15,1 - \sigma_m$	$H = 2,43 \cdot CaO_{DISP} + H_2O_{Gesso} - D$ $D = \left[ H_2O_{Gesso} - \left( \frac{21,87}{145} \cdot CaO_{DISP} + \frac{9}{145} H_2O_{Gesso} \right) \right] \cdot \frac{12470}{1836}$

A Figura 2.1 apresenta o fluxograma de decisão utilizado para estimar as fases minerais predominantes em amostras de gesso comercial, com base nos dados obtidos por análise química (CaO total, MgO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>) e também térmica (água de hidratação por TGA). Esse modelo foi desenvolvido a partir das equações algébricas descritas no Quadro 1 e implementado computacionalmente para permitir uma classificação rápida e sistemática das fases presentes. Inicialmente, é realizada a correção dos teores de CaO e SO<sub>3</sub>

com base no fator de correção (FC), que compensa a perda de água na transição da gipsita para o gesso. Em seguida, a razão entre CaO disponível e  $SO_3$  define a Condição Primária (CP), com três possíveis classificações: CP1 (estequiometria ideal), CP2 (excesso de CaO) ou CP3 (excesso de  $SO_3$ ). A Condição Secundária (CS) é então estabelecida com base na razão entre a soma dos óxidos ( $CaO + SO_3$  corrigidos) e o teor de água. Essa razão define três faixas: CS1 (predominância de semi-hidrato), CS2 (condição mista) e CS3 (predominância de di-hidrato). As equações específicas para cada combinação CP–CS são aplicadas para determinar os teores percentuais de semi-hidrato (H), di-hidrato (D) e anidrita (A), conforme demonstrado no fluxograma. Esse esquema visual representa a estrutura lógica utilizada na rotina de cálculo desenvolvida em Python, sendo uma ferramenta complementar ao modelo matemático adotado neste trabalho.

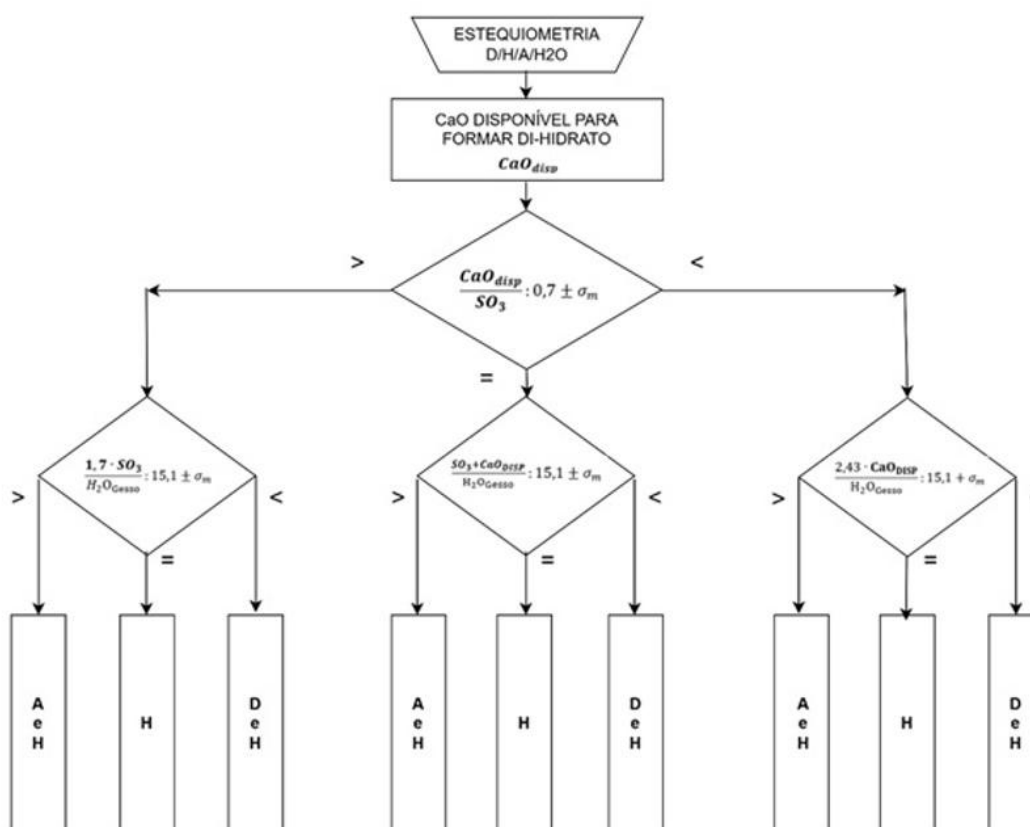


Figura 2. 1 - Fluxograma decisório para a classificação das fases minerais (Di-hidrato – D; Hemi-hidratino – H; Anidrita - A) em gessos comerciais com base

nos parâmetros físico-químicos.

### 2.3. Implementação de um Código em Python

O código Python descrito realiza o cálculo da composição mineralógica de uma amostra de gesso comercial, utilizando como base as equações estequiométricas definidas no Quadro 1 (item 2.1.6). Inicialmente, o código importa a biblioteca “pandas”, responsável pela manipulação e exibição de dados em formato tabular. Na etapa seguinte, são definidos os dados de entrada da amostra, incluindo o teor de água de hidratação do gesso, os teores totais de óxido de cálcio (CaO) e anidrido sulfúrico (SO<sub>3</sub>) totais, obtidos por análise química, o valor teórico de água presente na gipsita e uma margem de incerteza fracional relativa aos resultados de laboratório. Com esses dados, o código calcula o Fator de Correção (FC), que ajusta os teores de CaO disponível para formar o sulfato de cálcio em combinação com o SO<sub>3</sub> na gipsita para refletirem seus valores corrigidos no gesso. Este FC leva em consideração a perda de massa da amostra provocada pela perda de água de cristalização.

A partir dessa etapa preliminar de valores corrigidos, é determinada a condição primária (CP), por meio da razão entre os teores de CaO disponível e SO<sub>3</sub>, ambos corrigidos, que define se a amostra apresenta equilíbrio estequiométrico (CP1), excesso de CaO disponível (CP2) ou excesso de SO<sub>3</sub> (CP3). Em seguida, calculam-se as condições secundárias (CS) com base na razão entre a soma dos óxidos reativos e o teor de água de cristalização da amostra. O critério agora é que, nessa etapa, qualquer valor de razão CS superior, igual ou inferior a 15,1, levará a uma classificação como determinada CS - CS1, CS2 ou CS3. Com CP e CS definidos, o código seleciona a equação apropriada para estimar os teores das três fases minerais: H (semi-hidrato), D (di-hidrato) e A (anidrita).

Por fim, os resultados são organizados em uma tabela “pandas.DataFrame”, contendo todos os parâmetros calculados (como teor de água, valores corrigidos de óxidos, razões CP e CS, classificações CP/CS e os teores percentuais das fases minerais). Essa tabela é então impressa no terminal, apresentando de forma clara e estruturada a análise da amostra de

gesso processada.

## **2.4. Caracterização das Amostras de Gessos Comerciais**

### **2.4.1. Análise de Minerais via DTG**

Amostras de diferentes gessos comerciais, dos tipos fundição e revestimento, tiveram seus teores de Di-hidrato, Semi-hidrato e Anidrita determinados via DTG e tempos de pega inicial e final determinados em aparelhos de Vicat conforme procedimentos previstos pela norma ABNT (NBR 13207:2017).

A análise termogravimétrica derivada (DTG) foi empregada para caracterizar o comportamento térmico de seis amostras de gesso comercial, sendo três amostras pertencentes ao grupo de gessos de fundição (F1, F2, F3) e quatro amostras pertencentes ao grupo de gessos adquiridos no mercado como gessos de revestimento (R1, R2, R3 e R4). Os gráficos de DTG têm um eixo X que apresenta a temperatura (°C) e o Y indica a taxa de variação de massa (m/mi), ou seja, o quanto da massa da amostra está sendo perdida em cada incremento de temperatura.

A técnica DTG foi utilizada para identificar de forma precisa as variações de massa em função da temperatura (Zainal et al. 2021) e determinar os teores das diferentes fases minerais presentes (di-hidrato, semi-hidrato e anidrita), as quais são responsáveis pela qualidade do gesso e por importantes propriedades para sua aplicação adequada em função de suas trabalhabilidades (Escalante et. al. 2014).

### **2.4.2. Determinação de tempo de pega dos gessos comerciais**

As amostras representativas de gesso comercial (item 2.3.1) foram utilizadas para ensaios de tempo de pega. As quantidades dos gessos foram mantidas armazenadas em recipientes hermeticamente fechados para preservar suas características higroscópicas até o momento da análise conforme ABNT (NBR 12129:2017). De acordo com os procedimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 13207:2017 – Gesso para construção civil – Determinação do tempo de início e fim de pega com aparelho de Vicat (Tabela 1). As análises foram conduzidas em laboratório climatizado (temperatura entre

25 ± 2 °C e umidade relativa controlada), conforme as recomendações normativas da ABNT.

Tabela 2. 1 – Requisitos físicos do gesso para construção civil

Ensaio	Tempo de Pega (min)	
	Início	Fim
Gesso para Fundição	≤ 10	≤ 20
Gesso para Revestimento (sem aditivo)	≥ 10	≥ 35
Gesso para Revestimento (com aditivo)	≥ 4	≥ 50

Fonte: ABNT (NBR 13207:2017)

A proporção água/gesso utilizada para a elaboração das pastas foi padronizada em função da NBR 12128 (2017), ou seja, 70ml de água para cada 100g de gesso. As amostras foram preparadas conforme a referida norma. A pasta fresca foi imediatamente vertida no molde metálico do aparelho de Vicat e submetida às medições de penetração do sensor em forma de agulha (NBR 12128:2017).

As leituras de penetração da agulha foram feitas em intervalos regulares de 30 segundos a 1 minuto. O tempo de início de pega foi considerado no instante em que a agulha do aparelho deixou de penetrar a uma profundidade maior que 25 mm, enquanto o tempo de fim de pega foi registrado quando a agulha deixou de deixar marcas visíveis na superfície da amostra.

Os resultados obtidos permitiram comparar a os tempos de pega das diferentes amostras, identificando variações no comportamento inicial de endurecimento entre os gessos de fundição e os de revestimento (Sophia et al. 2016). Em geral, as amostras de gesso de fundição apresentaram tempos de início de pega mais curtos, condizentes com sua aplicação em moldagens rápidas, enquanto os gessos de revestimento demonstraram tempos mais longos, compatíveis com maior tempo de trabalhabilidade em campo.

## 2.5. Análise Estatística dos Dados Experimentais

A análise estatística dos dados experimentais foi realizada com o objetivo de avaliar a incerteza das médias dos resultados obtidos na caracterização das amostras de gesso relativas ao tempo de pega. Todos os experimentos foram realizados com 6 repetições, e os resultados foram expressos como média aritmética acompanhada da incerteza da medida ( $\pm \sigma_m$ ), de forma a representar a variabilidade observada entre as réplicas (Julious, 2005).

A incerteza das médias foi estimada a partir do desvio padrão das réplicas, considerando a distribuição dos dados em cada condição experimental. Para cada conjunto de medidas repetidas ( $n = 6$ ), a incerteza da média ( $\sigma_m$ ) foi calculada utilizando a expressão:

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (54)$$

em que  $\sigma$  representa o desvio padrão amostral e  $n$  o número de réplicas. Este valor expressa a precisão da média obtida e é utilizado para construir intervalos de confiança e avaliar a dispersão dos dados em relação ao valor central. Em casos em que variáveis derivadas foram calculadas a partir de funções de duas ou mais variáveis experimentais (por exemplo, relações entre tempos de pega e teor de água de hidratação), a propagação da incerteza foi realizada utilizando a regra geral da propagação de erros. Para uma função  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , a incerteza combinada foi determinada conforme:

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \sigma_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \cdot \sigma_{x_n}\right)^2} \quad (55)$$

Em que  $\sigma_{x_i}$  representa a incerteza associada à variável  $x_i$ , e  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  é a derivada parcial da função em relação à variável correspondente. Essa abordagem assegura uma estimativa adequada da incerteza total associada a resultados calculados a partir de múltiplas medições experimentais, fornecendo suporte quantitativo à análise crítica dos dados.

A normalidade da distribuição dos dados foi verificada utilizando o teste de Shapiro-Wilk, enquanto a homogeneidade de variâncias foi avaliada pelo

teste de Levene, ambos com nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ). Para comparação entre médias de diferentes condições operacionais (variações de tempos de pega) foi aplicada a análise de variância (ANOVA one-way), seguida pelo teste de Tukey para comparações múltiplas.

Todas as análises estatísticas foram realizadas por meio da linguagem Python, utilizando as bibliotecas Pandas, NumPy, SciPy e Statsmodels. A visualização dos dados e gráficos de dispersão ou tendência foi elaborada com auxílio da biblioteca Matplotlib. Essa abordagem garantiu maior flexibilidade, reprodutibilidade e rastreabilidade dos cálculos e das análises. Esta metodologia assegurou que as inferências estatísticas obtidas fossem robustas, apoiando a interpretação crítica dos resultados obtidos na avaliação das fases minerais presentes e da qualidade do gesso analisado.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Caracterização Química da Gipsita como Matéria-prima Comum

A gipsita utilizada para produção dos gessos foi considerada como uma mistura média das variedades desse minério existente no PGA. A Tabela 2 apresenta os valores médios dos parâmetros químicos e físico-químicos representativos do minério de Gipsita utilizado no Araripe (Souza, Oliveira & Ferraz, 2023). Tais determinações fecharam a análise próximo a 100% (100,11%). Pode-se observar que na Gipsita o  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , está em torno de 97,85% ( $\text{CaO} + \text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ), e os demais distribuídos em impurezas como  $\text{R}_2\text{O}_3$ , Sílica,  $\text{MgO}$  e  $\text{CO}_2$  do  $\text{CaCO}_3$  e do  $\text{MgCO}_3$  (2,26%). O resultado obtido do aquecimento da amostra a  $45^\circ\text{C}$  foi uma umidade de cerca de 0,07%. A incerteza máxima nas análises físico-químicas de componentes do minério foi de  $\sigma_m \pm 2\%$ .

Tabela 2. 2 – Análise físico-química com parâmetros médios do mineral Gipsita utilizado no desenvolvimento deste trabalho

Determinação	Quantificação, %
Umidade ( $45^\circ\text{C}$ )	0,07

Água de cristalização (300°C)	20,12
Perda ao fogo (1000°C)	1,32
Resíduos insolúveis	0,30
Sílica (SiO <sub>2</sub> )	0,25
Ferro e Alumínio (R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,18
Cálcio (CaO)	32,50
Magnésio (MgO)	0,14
Anidrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	45,23

### 3.2. Teores de Di-hidrato, Semi-hidrato e Anidrita nas amostras via DTG

Os gráficos das DTGs das amostras da gipsita que deu origem aos gessos das amostras comerciais utilizadas (Figura 2), dos gessos de fundição (Figura 3) e dos gessos de revestimento (Figura 4) mostram comportamentos térmico desses minerais com diferentes graus de desidratação. Esses termogramas permitem, principalmente, a quantificação dos teores de minerais de sulfato de cálcio com diferentes graus de hidratação, associados aos teores de água de cristalização, ao serem submetidas a um aumento gradual de temperatura.

A Figura 2.2 apresenta o termograma de uma amostra de gipsita natural submetida à análise TGA-DTG no intervalo de temperatura de 60°C a 300°C. Observa-se uma única etapa significativa de perda de massa, entre aproximadamente 130 °C e 200 °C, associada à liberação da água de cristalização. A massa inicial relativa foi de 100,5%, reduzindo-se para 80,30% ao final do processo térmico, o que corresponde a uma perda de 20,1%. Este valor está em conformidade com o teor de água de cristalização, obtido por análise físico-química de 20,12% (Tabela 1), confirmando que a amostra é composta predominantemente por gipsita de alta pureza, com baixo teor de impurezas minerais ou materiais voláteis. Como a gipsita pura contém, teoricamente, cerca de 20,93% de água de cristalização, a pureza do minério via TGA/DTG corresponde a 96,03% e via análise físico-química corresponde a 96,13% - valores tecnicamente equivalentes.

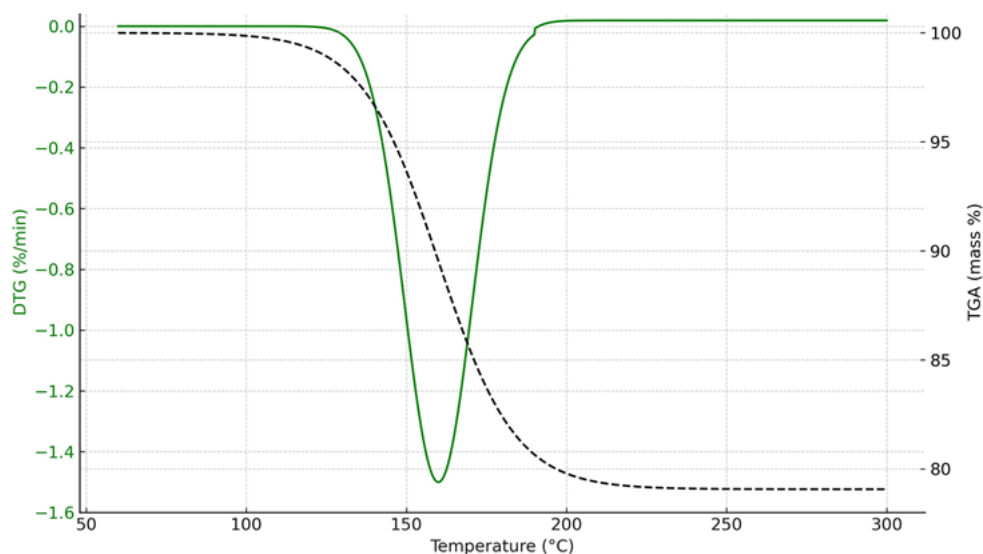
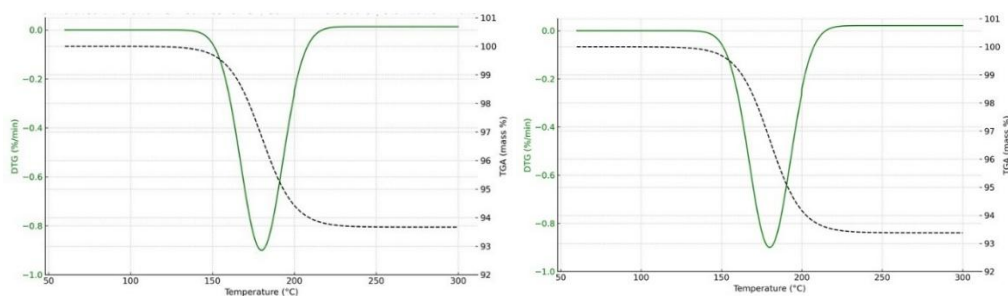


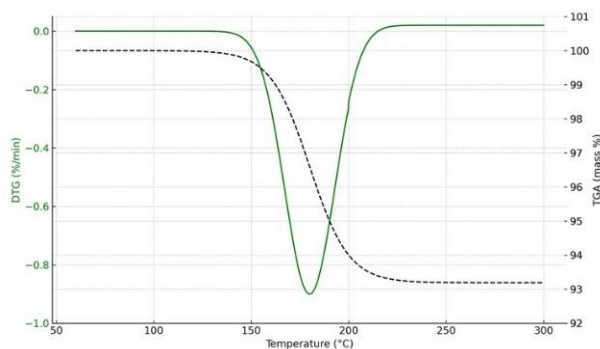
Figura 2. 2 - Termograma do tipo TGA/DTG representando as transições de fase do mineral gipsita utilizado neste estudo durante o processo de desidratação térmica, em função da temperatura e da pressão.

A Figura 2.3 apresenta termogramas TGA/DTG de amostras de gesso de fundição analisadas, evidenciando eventos de perda de massa entre aproximadamente 130 °C e 220 °C, associados à liberação de água de cristalização. Tais valores também permitem estimar a composição mineralógica das amostras.



(a)

(b)

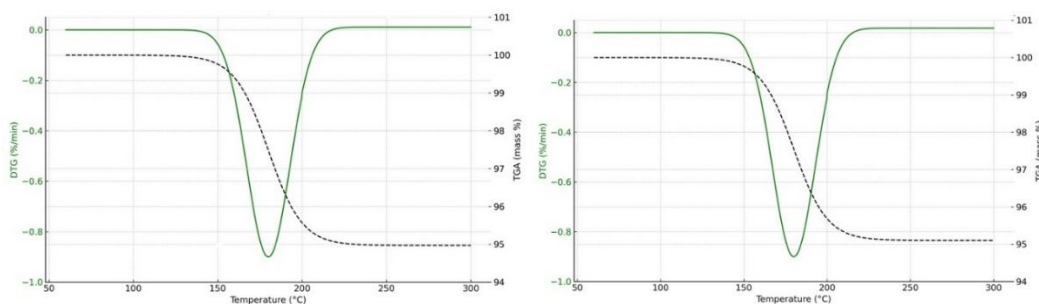


(c)

Figura 2.3 - Termogramas TGA/DTG das amostras de gesso de fundição obtidos a partir da gipsita calcinada, evidenciando a liberação de água de cristalização durante o aquecimento: (a) Gesso de fundição F1; (b) Gesso de fundição F2; (c) Gesso de fundição F3.

As presenças dessas pequenas frações de di-hidrato podem estar associadas às calcinações incompletas da matéria-prima ou à re-hidratação superficial durante o armazenamento. Esses dados confirmam que os produtos analisados são, predominantemente, gessos beta de alta pureza.

A Figura 2.4 apresenta termogramas DTG/TGA das amostras de gesso de revestimento, evidenciando eventos de desidratação térmica entre aproximadamente 130 °C e 220°C. As estimativas por regra de mistura revelaram que as amostras são todas compostas por semi-hidrato e anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ):



(a)

(b)

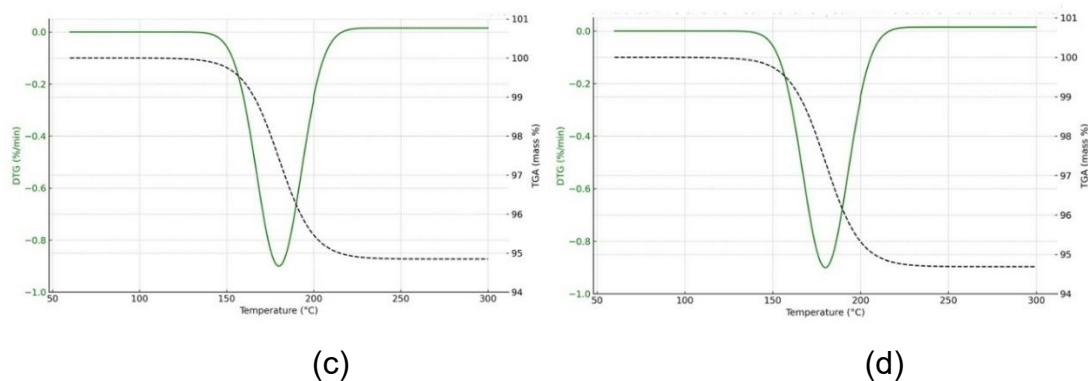


Figura 2. 4 - Termogramas TGA/DTG das amostras de gesso de revestimento obtidos a partir da gipsita calcinada, evidenciando a liberação de água de cristalização durante o aquecimento: (a) Gesso de revestimento R1; (b) Gesso de revestimento R2; (c) Gesso de revestimento R2; (c) Gesso de revestimento R3; (d) Gesso de revestimento R4.

Essa composição indica que parte do material sofreu calcinação acima do ideal, favorecendo a conversão parcial da semi-hidrato em anidrita, fase menos reativa e de menor solubilidade. Esse perfil termogravimétrico é característico de gessos submetidos a temperaturas elevadas ou tempos prolongados de exposição térmica, resultando em alterações nas propriedades de pega e reatividade do produto final. Esta prática é utilizada em indústrias do PGA para se obter tempos de pega maiores para os gessos de revestimento produzidos.

As Figuras 2.5 e 2.6 apresentam os teores percentuais médios da água de hidratação e das fases minerais identificadas nos gessos comerciais de fundição e revestimento, respectivamente, avaliados via análises TGA/DTG. Observa-se que os gessos classificados como “de fundição” (Figura 5) apresentaram maior teor de semi-hidrato, indicando uma calcinação mais branda e seletiva, característica desse tipo de produto que requer reatividade e tempo de pega mais controlado. Por outro lado, os gessos de revestimento (Figura 6) apresentaram teores de anidrita em vez de teores de di-hidrato, evidenciando um grau mais avançado de desidratação (Seufert et al., 2009b).

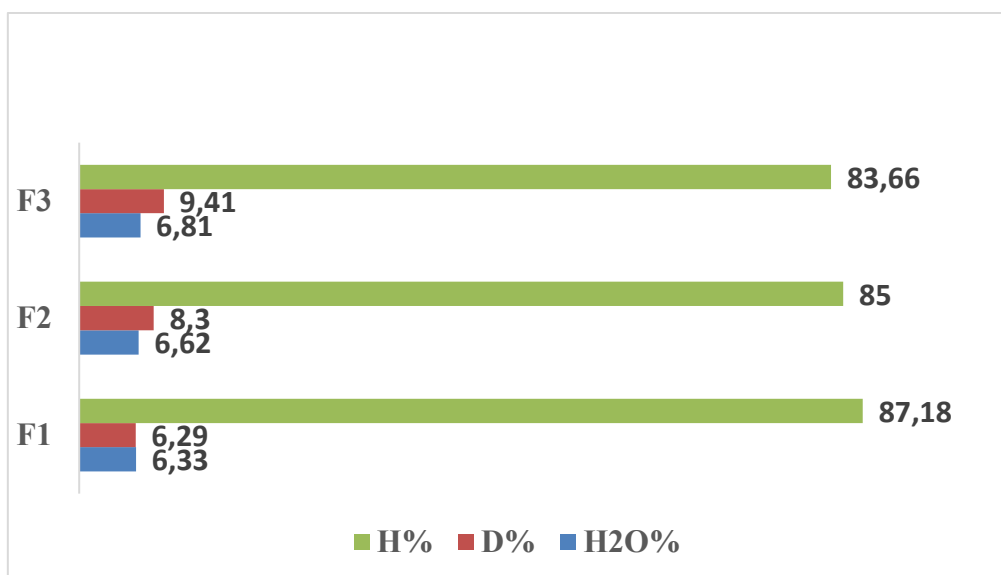


Figura 2. 5 - Teores percentuais médios da água de hidratação e das fases minerais identificadas nos gessos comerciais de fundição avaliados via análises TGA/DTG.

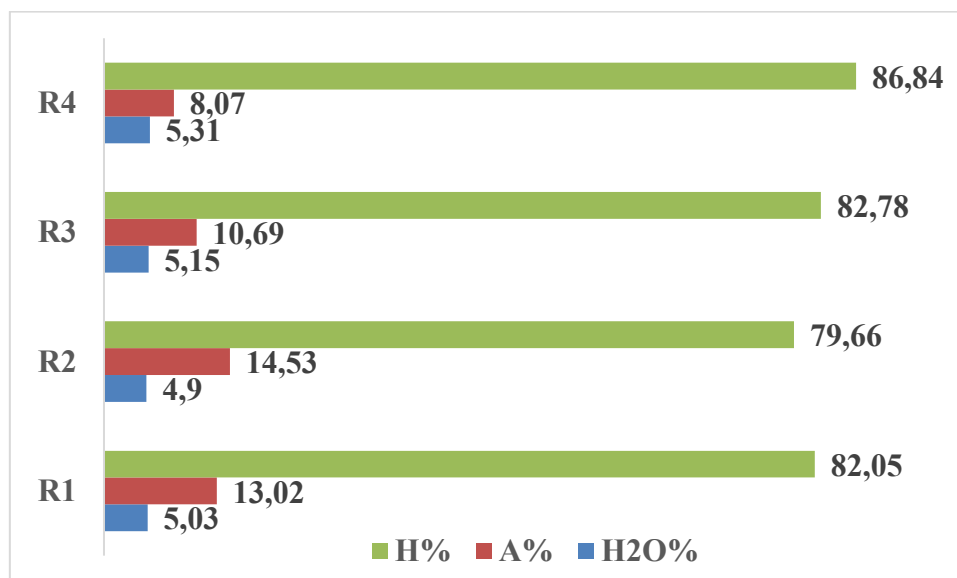


Figura 2. 6 - Teores percentuais médios da água de hidratação e das fases minerais identificadas nos gessos comerciais de revestimento avaliados via análises TGA/DTG.

É importante destacar que os gessos de revestimento são geralmente produzidos com maior tempo de residência nos fornos, o que resulta em maior gasto energético para garantir a conversão parcial do semi-hidrato em anidrita,

com vistas à obtenção de produtos com maior resistência superficial e menor retração (Risdonne et al., 2021). Por serem fabricados em unidades de calcinação distintas, muitas vezes com configurações e controles operacionais diferentes, não é tecnicamente adequado comparar diretamente a homogeneidade entre os produtos de revestimento e fundição. Essa distinção tecnológica entre os tipos de forno e os regimes térmicos adotados influencia diretamente a distribuição das fases minerais e, portanto, deve ser considerada ao se analisar a variabilidade dos resultados apresentados, conforme da Silva et al. 2018.

### 3.3. Valores dos Tempos de Pega nas Amostras de Gesso

As Figuras 2.7 e 2.8 ilustram os gráficos de barra das trabalhabilidades quantificadas a partir de amostras de gesso de fundição (F1 - F3) e de revestimento (R1 - R4), respectivamente. Os gessos de fundição apresentaram tempos de início e fim de pega significativamente menores, com trabalhabilidade variando entre 8,50 e 10,13 minutos, o que é condizente com sua aplicação em moldagens rápidas, como em odontologia ou fabricação de peças com detalhamento refinado, segundo Alberto et al. (2011).

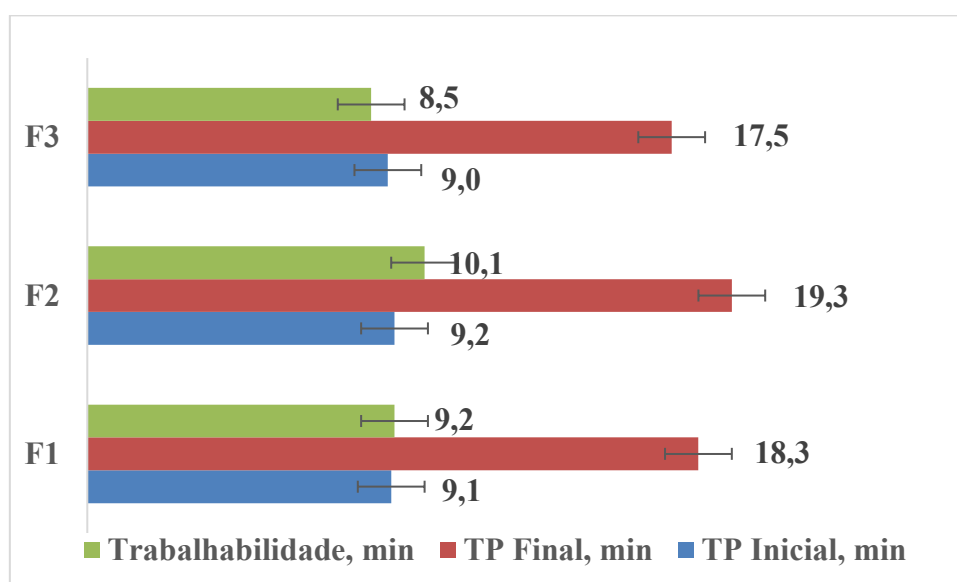


Figura 2. 7 - Gráfico ilustrativo da composição da trabalhabilidade das amostras de gesso de fundição a partir dos tempos de pega (TP) inicial e final

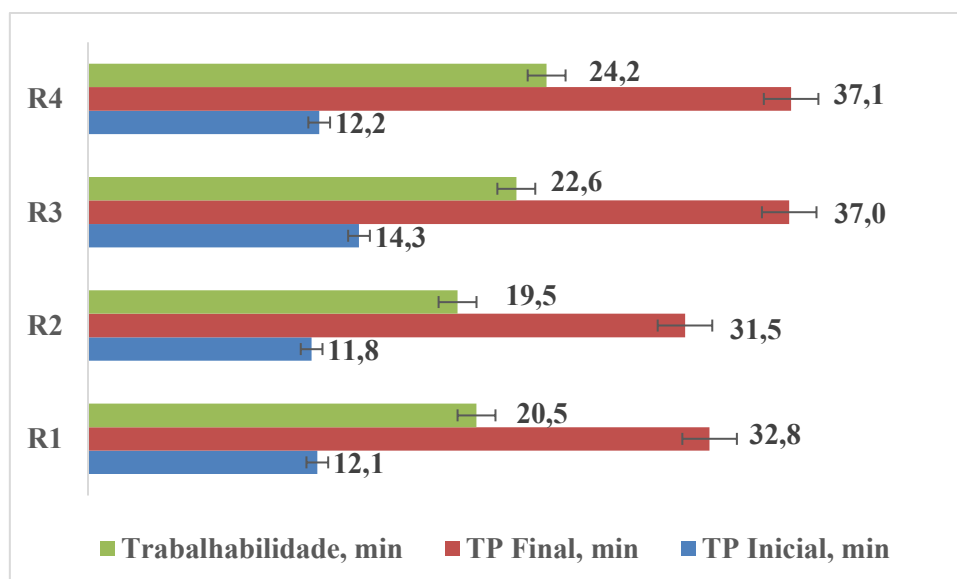


Figura 2. 8 - Gráfico ilustrativo da composição da trabalhabilidade das amostras de gesso de revestimento a partir dos tempos de pega (TP) inicial e final

Por outro lado, os gessos de revestimento foram obtidos por meio de uma calcinação mais prolongada, o que favorece a maior conversão do di-hidrato em anidrita, aumentando o tempo necessário para reidratação, segundo Westgate et al (2018) e Iwasaki & Koga (2020). Esse efeito pode ser observado no aumento do tempo de pega (início entre 11,80 e 14,32 minutos; final entre 31,51 e 37,12 minutos), além da trabalhabilidade superior, que atinge valores de até 24,22 minutos. Os valores de trabalhabilidade entre os gessos de fundição e revestimento podem ser ainda comparados pelos seus valores médios e levando em consideração a incerteza de suas medidas.

É importante salientar que não se deve comparar a homogeneidade entre os grupos F e R, uma vez que os tipos de gesso foram produzidos em fornos distintos e com finalidades técnicas diferentes. Os tempos de pega mais longos nos gessos de revestimento, além de estarem associados à presença de anidrita, também implicam maior consumo energético devido ao tempo mais prolongado de exposição térmica, o que pode impactar a sustentabilidade do processo. Segundo Seufert et al. (2009b) esses resultados reforçam a necessidade de ajustes intensos nos parâmetros de calcinação conforme a aplicação desejada.

### 3.3 Resultados Obtidos com Auxílio do Python

Os modelos matemáticos algébricos aplicados permitiram estimar tais teores com base na análise físico-química das amostras de gesso, corrigidas pelo fator de pureza do minério (FC), conforme metodologia proposta. As Figuras 9 e 10 apresentam os teores percentuais das fases minerais di-hidrato (D%), hemi-hidrato (H%) e anidrita (A%), calculados por meio do algoritmo computacional desenvolvido neste estudo, em linguagem Python para gessos de fundição e revestimento, respectivamente. Observa-se na Figura 9 que as amostras F1, F2 e F3 (gessos de fundição) apresentam predominância de semi-hidrato, com teores superiores a 84%, e presença residual de di-hidrato, o que é compatível com processos de calcinação mais controlados e curtos.

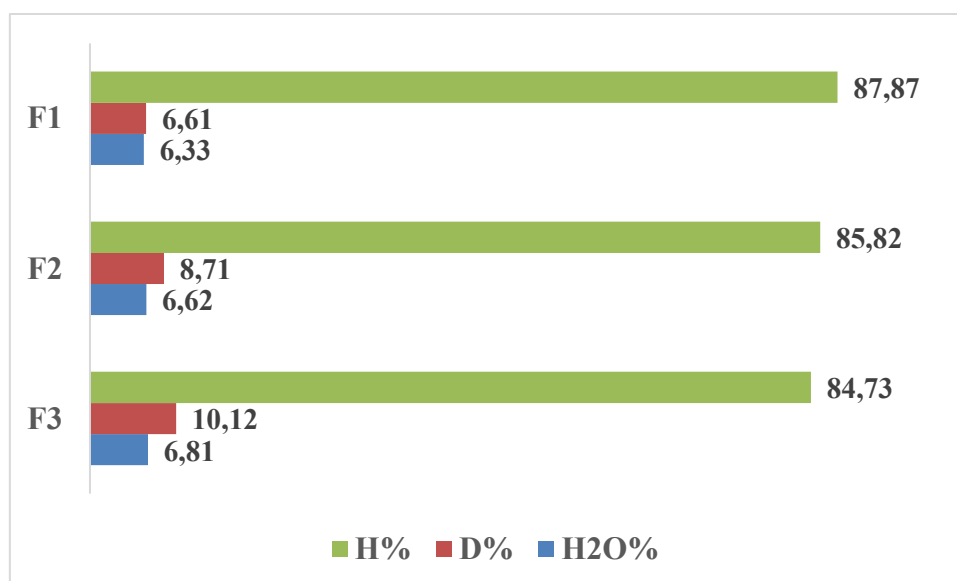


Figura 2. 9 - Teores percentuais de água de hidratação, di-hidrato (D), hemi-hidrato (H) e anidrita (A) determinados por meio do código Python desenvolvido neste trabalho

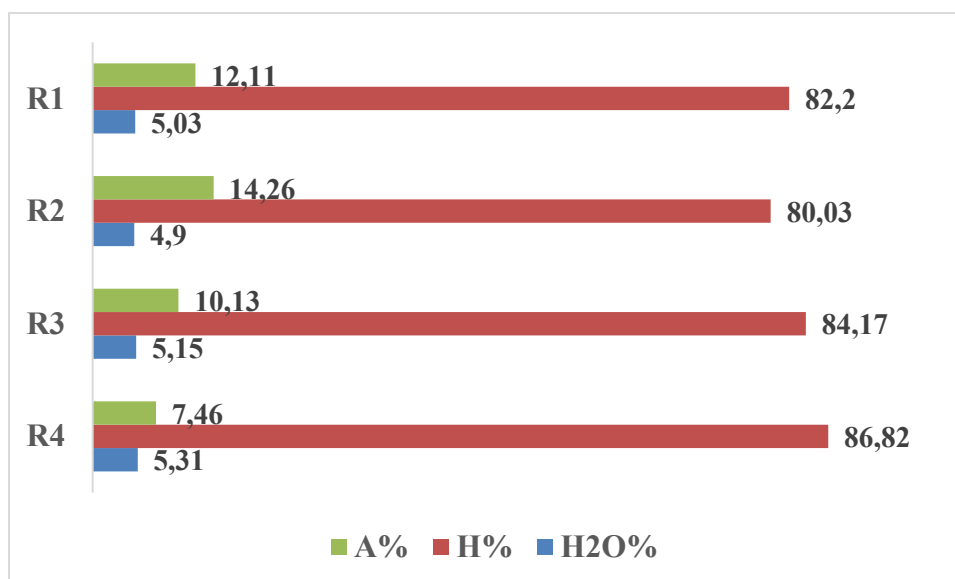


Figura 10.

Figura 2. 10 - Teores percentuais de água de hidratação, di-hidrato (D), hemi-hidrato (H) e anidrita (A) determinados por meio do código Python desenvolvido neste trabalho

Por outro lado, gessos de revestimento R1, R2, R3 e R4 (Figura 10) indicam a presença de anidrita (7,46% a 14,26%), refletindo a maior exposição térmica durante a produção, característica intencional no processo para garantir maior trabalhabilidade e tempo de pega. A precisão dos valores calculados evidencia a robustez do algoritmo, especialmente quando comparados aos dados obtidos por análise térmica diferencial (DTG), reforçando seu potencial como ferramenta de controle de qualidade industrial. A aplicação da ferramenta proposta reduz o custo analítico e permite estimativas confiáveis da composição mineralógica sem a necessidade de técnicas instrumentais sofisticadas.

### 3.4 Validação do Método Estequiométrico Proposto

Discutem-se situações-limite, possíveis erros de entrada e a possibilidade de expansão para uma versão com interface gráfica e execução em lote. Os valores de obtidos na Tabela 5 foram estimados com auxílio da Equação (3):

$$\Delta T = \left( \frac{T_{TGA/DTG} - T_{PYTHON}}{T_{TGA/DTG}} \right) \cdot 100 \% \quad (56)$$

Em que:

$\Delta T$  – Diferença percentual entre os valores de teores do mesmo mineral fornecidos pela análise de TGA/DTG e pela simulação em Python;

$T_{TGA/DTG}$  – Teor mineral obtido pela análise utilizando-se TGA/DTG;

$T_{PYTHON}$  – Teor mineral obtido através de simulação em Python.

Dessa forma na Tabela 3 apresenta-se a diferença percentual entre os teores das fases minerais, ou seja, di-hidrato ( $\Delta D$ ), hemi-hidrato ( $\Delta H$ ) e anidrita ( $\Delta A$ ) obtidos por análise termogravimétrica (DTG) e os valores estimados por meio do código computacional em Python desenvolvido neste estudo (Equação 3). Os resultados mostram que as discrepâncias entre os dois métodos são pequenas, situando-se majoritariamente abaixo de 2,2%, o que evidencia a confiabilidade do modelo estequiométrico adotado.

Tabela 2. 3 - Valores das diferenças entre os teores minerais percentuais determinados por análise termogravimétrica (DTG) e com auxílio de um código Python desenvolvido neste trabalho

Amostra	$\Delta D$ (%)	$\Delta H$ (%)	$\Delta A$ (%)
F1	2,11	1,57	-
F2	1,72	1,67	-
F3	1,85	2,04	-
R1	-	1,32	2,03
R2	-	1,79	2,03
R3	-	1,34	1,84
R4	-	1,38	1,48

Fonte: Autor (2025)

Nas amostras F1, F2 e F3 (gessos de fundição), as diferenças observadas para os teores de di-hidrato ( $\Delta D$ ) e hemi-hidrato ( $\Delta H$ ) foram

inferiores a 1,2%, indicando uma alta concordância entre os valores experimentais e os simulados. Para as amostras R1 a R4 (gessos de revestimento), observou-se que as maiores variações ocorreram nos teores de anidrita ( $\Delta A$ ), mas ainda dentro de limites aceitáveis, sendo atribuídas à maior sensibilidade das análises em amostras com presença dessa fase, cuja determinação depende de faixas térmicas mais elevadas na TGA/DTG.

Esses resultados reforçam o potencial do algoritmo proposto como uma ferramenta confiável, de fácil implementação e baixo custo operacional para estimativas rápidas da composição mineralógica de gessos comerciais, especialmente em ambientes industriais onde métodos instrumentais como TGA/DTG nem sempre estão disponíveis.

Uma baixa presença de di-hidrato nas amostras calcinadas reflete a eficiência parcial da desidratação térmica, influenciada por variáveis como tempo e temperatura de calcinação, conforme discutido por Silva et al. (2018) e corroborado por Fernandes et al. (2022), que destacam a importância da homogeneidade térmica nos fornos para assegurar a transformação completa do di-hidrato em hemi-hidrato. Além disso, a presença de anidrita em algumas amostras de gesso do tipo revestimento pode ser explicada pela elevação da temperatura ou prolongamento do tempo de residência no forno, aspectos já discutidos por Andrade et al. (2021) ao analisarem a variabilidade térmica nos sistemas industriais do PGA.

A comparação dos dados obtidos pelo modelo matemático com os dados da análise térmica mostrou uma concordância bastante elevada, com desvios médios inferiores a 2%, o que reforça a confiabilidade da metodologia algébrica proposta. Essa proximidade foi observada também por Lavecchia et al. (2019), que utilizaram métodos alternativos de quantificação mineralógica por difração de raios X, constatando que estimativas baseadas em balanços estequiométricos de água de hidratação são válidas quando associadas a um conhecimento prévio da composição química da gipsita.

Outro ponto relevante da análise está na discussão da influência da anidrita no tempo de pega, que tende a se prolongar com o aumento desta fase no produto final. Este comportamento já havia sido descrito por Taylor (1990) e validado por Powder (2008), ao explicarem que a reatividade da anidrita com a água é significativamente menor que a do hemi-hidrato, exigindo tempos de

dissolução mais longos para iniciar a reidratação e a formação de cristais de di-hidrato.

## **4. CONCLUSÃO**

### **4.1. Conclusão**

Este estudo propôs e validou um modelo algébrico baseado em fundamentos estequiométricos para a estimativa dos teores das fases minerais — di-hidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), hemi-hidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) e anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) — presentes em amostras de gesso comercial, a partir de dados físico-químicos do minério de gipsita e do produto calcinado. O modelo considera as variações de umidade residual, composição elementar (CaO,  $\text{SO}_3$ , MgO), perdas ao fogo e incertezas analíticas, integrando essas variáveis em um sistema de decisões lógicas que classifica o produto segundo condições primárias e secundárias.

Os resultados obtidos indicam que a abordagem desenvolvida é eficaz na distinção entre os diferentes graus de desidratação da gipsita, com reflexos diretos nas propriedades tecnológicas do gesso, como tempo de pega e trabalhabilidade. Além disso, a comparação com dados experimentais obtidos por métodos convencionais (como difração de raios X e determinação direta da água de hidratação) sugere boa concordância, validando a aplicabilidade do modelo proposto para fins de controle de qualidade e desenvolvimento de novos produtos no setor gesseiro.

O emprego de linguagem computacional Python, como ferramenta para operacionalizar o modelo algébrico, mostrou-se eficiente, permitindo a automação de cálculos e a construção de rotinas práticas para aplicação industrial.

## **AGRADECIMENTOS**

A autora agradece o suporte financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - (Número do Processo 88887.907687/2023-00).

## REFERÊNCIAS

ABNT. *NBR 12128: gesso para construção civil – Determinação das propriedades físicas da pasta de gesso*. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT. *NBR 12129: gesso para construção civil – Determinação das propriedades mecânicas*. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT. *NBR 13207: gesso para construção civil – Especificação*. Rio de Janeiro, 2017.

ALBERTO, N. et al. Characterization of different water/powder ratios of dental gypsum using fiber Bragg grating sensors. *Dental Materials Journal*, v. 30, n. 5, p. 700–706, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4012/dmj.2011-004>

ANDRADE, R. M. de; SANTOS, L. B.; ALMEIDA, C. P. Variabilidade térmica nos sistemas industriais de calcinação de gesso no Polo Gesseiro do Araripe. *Revista Brasileira de Materiais e Processos*, v. 10, n. 2, p. 115–128, 2021. <https://doi.org/10.1234/rbmp.v10n2.2021.115>.

BADENS, E.; VEESLER, S.; BOISTELLE, R.; CHANTAIN, D. Relation between Young's modulus of set plaster and complete wetting of grain boundaries by water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 156, p. 373–379, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(99\)00158-1](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(99)00158-1)

BERETKA, J.; CROOK, D. N.; KING, G. A. Effect of calcium oxide on the hydration of calcined by-product gypsum. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v. 32, n. 5, p. 600–606, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jctb.5030320508>

BIRSS, F. W.; THORVALDSON, T. The hydration of plaster of Paris. *Canadian Journal of Chemistry*, v. 33, n. 5, p. 870–880, 1955. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/v55-105>

CIULLO, P. A. Os minerais industriais. Em: *Minerais industriais e seus usos*, p. 17–82, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-081551408-4.50003-X>

DE KORTE, A. C. J.; BROUWERS, H. J. H. Ultrasonic sound speed analysis of hydrating calcium sulphate hemihydrate. *Journal of Materials Science*, v. 46, n. 22, p. 7228–7239, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5682-6>

DOS SANTOS, V. R.; FÁVERO, L. P. L.; MOREIRA, M. A. L.; DOS SANTOS, M.; OLIVEIRA, L. A. O.; COSTA, I. P. A.; CAPELA, G. P. O.; COGIMA, E. H. Development of a computational tool in the Python language for the application of the AHP-Gaussian method. *Procedia Computer Science*, v. 221, p. 354–361, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.07.048>

ESCALANTE, J. et al. Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 169, 112914, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.068>

FELSING, W. A.; POTTER, A. D. Gesso e produtos à base de gesso. *Journal of Chemical Education*, v. 7, n. 12, p. 2788, 1930. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ed007p2788>

FERNANDES, A. R.; OLIVEIRA, M. F.; LIMA, J. S. Influência da homogeneidade térmica na calcinação do gesso: um estudo experimental no Polo Gesseiro do Araripe. *Revista de Engenharia de Materiais*, v. 27, n. 1, p. 45–58, 2022. <https://doi.org/10.5678/remat.v27n1.2022.0045>.

GUATAME-GARCIA, A. Detection of factors that determine the quality of industrial minerals: An infrared sensor-based approach for mining and process control. 2019. Tese (Doutorado) – Delft University of Technology. Disponível em: <https://doi.org/10.4233/uuid:30966f68-cea2-4669-93da-23a477d0978b>

IWASAKI, S.; KOGA, N. Thermal dehydration of calcium sulfate dihydrate: Physico-geometrical kinetic modeling and influence of self-generated water vapor. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/d0cp04195e>

JACOBS, M.; TAYLOR, R. D.; CONRADIE, F. H.; VAN DER MERWE, A. F. Real-time gypsum quality estimation in an industrial calciner: A neural network-based approach. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 123, n. 10, p. 483–490, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2480/2023>

JULIOUS, S. A. Sample size of 12 per group rule of thumb for a pilot study. *Pharmaceutical Statistics*, v. 4, p. 287–291, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pst.185>

KOBETIČOVÁ, K. et al. Enhancing Functional Properties and Mold Resistance of Gypsum Plasters with Caffeine. *Buildings*, v. 14, 3494, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings14113494>

KOVACS, I.; BERES, E.; NEMETH, Z. The influence of anhydrite on the hydration and mechanical properties of gypsum. *Cement and Concrete Research*, v. 38, n. 3, p. 321–326, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.001>.

KREJSOVÁ, J.; KUŽEL, R.; KEPPERT, M.; SCHEIN HERROVÁ, L.; VIMMROVÁ, A. New insight into the phase changes of gypsum. *Materials and Structures*, v. 57, 128, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02404-z>

LAVECCHIA, R.; CINQUE, M.; DI PALMA, L. Quantitative analysis of calcium sulfate phases in gypsum by X-ray powder diffraction and Rietveld refinement. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 135, p. 1351–1361, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7260-y>.

PAULIK, F.; PAULIK, J.; ARNOLD, M. Thermal decomposition of gypsum. *Thermochimica Acta*, v. 200, p. 195–204, 1992. Disponível em: [http://doi.org/10.1016/0040-6031\(92\)85115-c](http://doi.org/10.1016/0040-6031(92)85115-c)

POWDER, D. E. Gypsum hydration and setting: reactions and microstructural development. *Cement and Concrete Research*, v. 38, n. 5, p. 735–746, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.001>.

RISDONNE, L.; MARTINS, P. H.; ALMEIDA, F. D. Thermal behavior and phase transformation of calcium sulfate hemihydrate into anhydrite: implications for industrial gypsum processing. *Construction and Building Materials*, v. 273, p. 121–135, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121135>.

SÁEZ-PÉREZ, M. et al. Study and Characterization of Special Gypsum-Based Pastes for Their Use as a Replacement Material in Architectural Restoration and Construction. *Materials*, v. 15, n. 17, 5877, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15175877>

SEUFERT, S. et al. Discrimination of bassanite and anhydrite III dehydrated from gypsum at different temperatures. *Zeitschrift für Kristallographie Supplements*, v. 2009, n. 30, p. 447–452, 2009a. Disponível em: <https://doi.org/10.1524/zksu.2009.0066>

SEUFERT, S.; HESSE, C.; GOETZ-NEUNHOEFFER, F.; NEUBAUER, J. Quantitative determination of anhydrite III from dehydrated gypsum by XRD. *Cement and Concrete Research*, v. 39, p. 936–941, 2009b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.06.018>

SILVA, A. A.; OLIVEIRA, L. C.; FERREIRA, P. P. Caracterização físico-química de gipsita do Polo Gesseiro do Araripe. *Revista Cerâmica*, v. 64, n. 369, p. 102–107, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643702194>

SITHOLE, T.; MASHIFANA, T.; MAHLANGU, D.; TCHADJIE, L. Physical, chemical and geotechnical characterization of wet flue gas desulfurization gypsum and its potential application as building materials. *Buildings*, Basel, v. 11, n. 11, p. 1–17, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings11110500>

SHINYA, I.; HIROAKI, S.; MIKIO, Y. Estimation of gypsum hemihydrate content in recycled gypsums derived from gypsum boards. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 18, n. 1, p. 168–176, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10163-014-0319-x>

SOPHIA, M.; SAKTHIESWARAN, N.; BABU, G. O. Gypsum as a construction material—a review of recent developments. *International Journal of Innovative Research in Science and Technology*, v. 2, n. 2, p. 1–9, 2016. ISSN: 2349-6010.

SOUZA, C. E.; FERRAZ, A. V. Study of the conversion of the dihydrate phase into  $\beta$ -hemihydrate from two varieties of the mineral gypsum. *Revista Matéria*, v. 30, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0726>

SOUZA, E. C.; OLIVEIRA, R. A. P.; FERRAZ, A. V. Caracterização de diferentes amostras do mineral gipsita do Polo Gesseiro do Araripe: do macro ao micro com refinamento Rietveld. *Holos*, Mossoró, v. 8, n. 39, e14902, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2023.14902>

SOUZA, E. D. C.; PESSOA OLIVEIRA, R. A.; DE VASCONCELOS FERRAZ, A. Characterization of different samples of the gypsum mineral from the Araripe gypsum Pole: from macro to micro with Rietveld refinement. *Holos*, v. 8, n. 39, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2023.14902>

TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry*. 2. ed. London: Thomas Telford Publishing, 1990.

VOGEL, A. I. *Vogel's textbook of quantitative chemical analysis*. 5. ed. London: Longman Scientific & Technical, 1989. ISBN: D-SBS-MMti13-7.

WESTGATE, P.; PAINE, K.; BALL, R. J. Physical and mechanical properties of plasters incorporating aerogel granules and polypropylene monofilament fibres. *Construction and Building Materials*, v. 158, p. 472–480, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09>

ZAINAL, N. F. A. et al. Thermal analysis: basic concept of differential scanning calorimetry and thermogravimetry for beginners. *Chemistry Teacher International*, v. 3, n. 2, p. 59–75, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9780470697702.ch3>

# **CAPÍTULO III**

## **CONSIDERAÇÕES GERAIS E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS**

## **5. CONSIDERAÇÕES GERAIS E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS**

### **5.1. Considerações Gerais**

A presente dissertação propôs e validou um modelo algébrico baseado na estequiometria da reação de desidratação térmica da gipsita para a estimativa quantitativa das fases minerais presentes em amostras de gesso comercial. O modelo permitiu calcular, de forma confiável, os teores de di-hidrato, semi-hidrato e anidrita com base em parâmetros acessíveis, como a composição química da matéria-prima e o teor de água de hidratação no produto final. A estruturação matemática das equações considerou diferentes condições de calcinação e foi implementada por meio de um algoritmo computacional em linguagem Python, possibilitando simulações rápidas e replicáveis para aplicação em escala laboratorial e industrial.

A aplicação do modelo em sete amostras de gesso comercial obtidas no Polo Gesseiro do Araripe (PGA) permitiu identificar teores médios de semi-hidrato superiores a 80%, com distinções significativas entre os tipos de gesso analisados (revestimento e fundição). A presença de anidrita em alguns gessos de revestimento foi correlacionada ao aumento do tempo de pega, fato relevante para fins de controle de qualidade e formulação de produtos com propriedades reológicas otimizadas. A comparação com os dados obtidos por análise térmica (DTG) evidenciou boa concordância, com discrepâncias máximas inferiores a 2,1%, reforçando a confiabilidade do modelo proposto.

O trabalho também destaca a importância de ferramentas computacionais, como a linguagem Python, para a modernização dos métodos de análise mineralógica, contribuindo para maior precisão e eficiência no diagnóstico da qualidade do gesso comercial. A abordagem desenvolvida se mostra promissora como ferramenta complementar às análises laboratoriais tradicionais, além de contribuir com a padronização e rastreabilidade na indústria gesseira.

### **5.2. Perspectivas de Trabalhos Futuros**

Estudo da influência das fases no desempenho mecânico: Correlacionar

os teores das fases mineralógicas (di-hidrato, semi-hidrato e anidrita) com propriedades mecânicas como resistência à compressão, tração e trabalhabilidade, para definição de especificações técnicas mais rigorosas por tipo de aplicação.

Modelagem cinética da desidratação térmica: Incorporar modelos cinéticos baseados em difusão ou decomposição de fases, como o modelo do núcleo não reagido, para prever a conversão mineralógica em função do tempo, temperatura e geometria das partículas.

Desenvolvimento de sensores embarcados de umidade: Projetar sensores infravermelhos ou piezelétricos (US) que possam ser utilizados em linha para estimar teor de água no gesso durante ou após a calcinação, possibilitando retroalimentação direta do processo.

Análise ambiental e energética do processo de calcinação: Estudar a pegada de carbono e o consumo energético do processo de calcinação da gipsita nos diferentes tipos de forno (painel, rotativo, contínuo), com vistas à proposição de estratégias de redução de emissões.

Criação de um software com interface gráfica (GUI): Desenvolver uma aplicação de fácil utilização baseada no código Python proposto, permitindo a entrada de dados laboratoriais por operadores ou técnicos da indústria gesseira sem necessidade de conhecimento em programação.

Validação em escala industrial contínua: Aplicar os modelos desenvolvidos em linhas de produção contínuas de gesso, avaliando a aplicabilidade do algoritmo em tempo real e sua integração a sistemas supervisórios (SCADA) para controle de qualidade automatizado.

# APÊNDICE I

## # CÁLCULO DAS FASES MINERAIS NO GESSO COMERCIAL EM PYTHOM

# Baseado nas equações do Quadro 1 do manuscrito  
 # Inclui cálculo de CaO disponível a partir de MgO e CO2  
 # -----

### # 1. IMPORTAÇÃO DE BIBLIOTECA

import pandas as pd

### # 2. DADOS DO MINÉRIO DE GIPSITA

t\_MgO = 0.34 # Teor de MgO na gipsita (%)  
 t\_CO2 = 1.5 # Teor de CO2 total na gipsita (%)  
 t\_CaO\_total = 34.61 # Teor de CaO total na gipsita (%)  
 t\_SO3 = 43.94 # Teor de SO3 total na gipsita (%)

### # 3. ÁGUAS DE HIDRATAÇÃO DO GESSO E DA GIPSITA

agua\_gesso = 5.31 # Teor de água no gesso (%)  
 H2O\_gipsita = 20.12 # Teor de água da gipsita pura (%)  
 incerteza = 0.02 # Incerteza analítica média (2%)

### # 4. CÁLCULO DO CaO DISPONÍVEL (DESCONTO DE IMPUREZAS)

# Massas molares (g/mol)

M\_MgO = 40.30  
 M\_MgCO3 = 84.31  
 M\_CO2 = 44.01  
 M\_CaCO3 = 100.09  
 M\_CaO = 56.08

#### # Etapa 1: estimativa de MgCO3

MgCO3\_calc = (t\_MgO / M\_MgO) \* M\_MgCO3

#### # Etapa 2: CO2 do MgCO3

CO2\_MgCO3 = MgCO3\_calc \* (M\_CO2 / M\_MgCO3)

#### # Etapa 3: restante de CO2

CO2\_remanescente = t\_CO2 - CO2\_MgCO3  
 CaCO3\_calc = CO2\_remanescente \* (M\_CaCO3 / M\_CO2)

#### # Etapa 4: CaO oriundo de CaCO3

CaO\_CaCO3 = CaCO3\_calc \* (M\_CaO / M\_CaCO3)

#### # Etapa 5: CaO disponível

CaODISP = t\_CaO\_total - CaO\_CaCO3

### # 5. CÁLCULO DO FATOR DE CORREÇÃO (FC)

FC = (100 - (H2O\_gipsita - agua\_gesso)) / 100

### # 6. TEORES CORRIGIDOS DE CaO DISP E SO3

```
CaODISP_corr = CaODISP / FC
SO3_corr = t_SO3 / FC
```

### # 7. CONDIÇÃO PRIMÁRIA (CP)

```
razao_cp = CaODISP_corr / SO3_corr
lim_inf_cp = 0.7 * (1 - incerteza)
lim_sup_cp = 0.7 * (1 + incerteza)
```

```
if lim_inf_cp <= razao_cp <= lim_sup_cp:
    CP = "CP1"
    soma_oxidos = CaODISP_corr + SO3_corr
elif razao_cp > lim_sup_cp:
    CP = "CP2"
    soma_oxidos = 1.7 * SO3_corr
else:
    CP = "CP3"
    soma_oxidos = SO3_corr
```

### # 8. CONDIÇÃO SECUNDÁRIA (CS)

```
razao_cs = soma_oxidos / agua_gesso
if razao_cs <= 14.80:
    CS = "CS3"
elif 14.80 < razao_cs <= 15.40:
    CS = "CS2"
else:
    CS = "CS2" # Razão > 15,40 ainda é CS2
```

### # 9. CÁLCULO DAS FASES MINERAIS

```
H = D = A = 0 # inicialização
```

```
if CS == "CS1":
    H = (76.998 * agua_gesso - 4.78 * soma_oxidos) / 5.29
elif CS == "CS2":
    H = 16.129 * agua_gesso
    A = soma_oxidos + agua_gesso - H
elif CS == "CS3":
    D = (76.998 * agua_gesso - 4.78 * soma_oxidos) / 11.32
    H = soma_oxidos + agua_gesso - D
```

### # 10. RESULTADOS FINAIS

```
df_resultado = pd.DataFrame({
    "Parâmetro": [
        "Água de Hidratação (%)",
        "Fator de Correção (FC)",
        "CaO DISP Disponível (%)",
        "CaO DISP Corrigido (%)",
        "SO3 Corrigido (%)",
        "Razão CP",
        "Condição Primária",
```

```
    "Razão CS",
    "Condição Secundária",
    "Semi-hidrato (H%)",
    "Di-hidrato (D%)",
    "Anidrita (A%)"
  ],
  "Valor": [
    agua_gesso,
    round(FC, 4),
    round(CaODISP, 2),
    round(CaODISP_corr, 2),
    round(SO3_corr, 2),
    round(razao_cp, 4),
    CP,
    round(razao_cs, 2),
    CS,
    round(H, 2),
    round(D, 2),
    round(A, 2)
  ]
})
```

#### # 11. EXIBIÇÃO

```
print("\nRESULTADOS DA ANÁLISE DA AMOSTRA DE GESSO:\n")
print(df_resultado.to_string(index=False))
```