

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE SANTA CATARINA - CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA  
BACHARELADO EM DESIGN**

**THALES JANDREY RESENDE**

**REINCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE GESSO NO PROCESSO PRODUTIVO  
CERÂMICO: um estudo de viabilidade e aplicações em design**

**FLORIANÓPOLIS, 2025**

**THALES JANDREY RESENDE**

**REINCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE GESSO NO PROCESSO PRODUTIVO  
CERÂMICO: um estudo de viabilidade e aplicações em design**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao curso de Bacharelado em  
Design do Câmpus Florianópolis do  
Instituto Federal de Santa Catarina para  
obtenção do título de Bacharel em Design.

Orientadora: Profa. Dra. Pâmela Teixeira  
Fernandes

**FLORIANÓPOLIS, 2025**

Ficha de Identificação da obra elaborada pelo autor, através do cadastro de ficha de identificação disponível no portal discente do Sistema Integrado de Gestão Acadêmica - SIGAA, do IFSC.

Resende, Thales Jandrey

Reincorporação de resíduo de gesso no processo produtivo cerâmico: um estudo de viabilidade e aplicações em design / Thales Jandrey Resende; Orientador(a): Pâmela Teixeira Fernandes. - Florianópolis, SC, 2025. 127 p.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis. Curso de Bacharelado Em Design.

Inclui referências.

1. Gesso Reciclado. 2. Design Sustentável. 3. Cerâmica. 4. Economia Circular. 5. Reaproveitamento de Resíduos. I. Fernandes, Pâmela Teixeira. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Curso de Bacharelado Em Design. III. Título.

**REINCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE GESSO NO PROCESSO PRODUTIVO  
CERÂMICO: um estudo de viabilidade e aplicações em design**

**THALES JANDREY RESENDE**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Design e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Design do Câmpus Florianópolis do Instituto Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 12 de dezembro, 2025.

Banca Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Pâmela Teixeira Fernandes  
Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Carla Arcoverde de Aguiar Neves  
Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC

---

Prof. Me. Allan Guimarães Borçato  
Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC

## RESUMO

Este trabalho, de natureza aplicada e exploratória, investigou o reaproveitamento de resíduos de gesso gerados no processo produtivo cerâmico do Laboratório de Modelagem II – Cerâmica do Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Florianópolis. Diante do impacto ambiental e das dificuldades logísticas do descarte adequado, o objetivo principal foi desenvolver e demonstrar a viabilidade técnica e estética da reinserção desse material em novas aplicações, culminando na produção de uma peça decorativa exemplar. Para tanto, o estudo adotou um método de projeto híbrido, combinando o MD3E (Método de Desdobramento em 3 Etapas), reconhecido por sua flexibilidade, com as etapas iterativas de Prototipar e Testar do *Design Thinking*. A experimentação abrangeu a calcinação do gesso descartado e sua aplicação em novos moldes, massas cerâmicas e esmaltes, utilizando análises estatísticas para validar os achados. Os resultados demonstraram que a calcinação a 150 °C por 2 horas é o parâmetro ideal de reciclagem. Comprovou-se que a produção de novos moldes é viável através da substituição parcial de até 20% de gesso comercial pelo reciclado, mantendo trabalhabilidade e resistência suficientes para uso em ateliê, apesar de a resistência absoluta ser inferior à norma. Na incorporação em massas e esmaltes cerâmicos, embora o material tenha fisicamente funcionado bem e produzido texturas de "cratera" visualmente exitosas, os testes revelaram um risco crítico de segurança. Constatou-se a degradação do sulfato em altas temperaturas e a conseqüente liberação de gases corrosivos ( $SO_2$ ), razão pela qual o seu uso é fortemente desaconselhado em etapas de queima em fornos elétricos sem exaustão adequada. Assim, a viabilidade técnica da reinserção concentra-se na produção de novos moldes, premissa materializada em caráter de prova de conceito em uma luminária decorativa que agrega valor ao resíduo. A originalidade da pesquisa reside na validação prática do gesso reciclado em um contexto acadêmico e artesanal, transformando um problema ambiental em uma solução de design sustentável, ao mesmo tempo que evidencia com rigor os limites técnicos e de segurança para sua aplicação.

Palavras-Chave: Gesso reciclado. Design sustentável. Cerâmica. Economia Circular. Reaproveitamento de resíduos.

## ABSTRACT

This applied and exploratory study investigated the reuse of plaster waste generated in the ceramic production process at the Modeling II - Ceramics Laboratory of the Federal Institute of Santa Catarina – Florianópolis Campus. Given the environmental impact and the logistical difficulties of proper disposal, the main objective was to develop and demonstrate the technical and aesthetic viability of reinserting this material into new applications, culminating in the production of an exemplary decorative piece. To this end, the study adopted a hybrid design method, combining the MD3E (3-Stage Deployment Method), recognized for its flexibility, with the iterative Prototyping and Testing stages of Design Thinking. The experimentation encompassed the calcination of discarded plaster and its application in new molds, ceramic bodies, and glazes, using statistical analyses to validate the findings. The results demonstrated that calcination at 150 °C for 2 hours is the ideal recycling parameter. It was proven that the production of new molds is viable through the partial substitution of up to 20% of commercial plaster with the recycled material, maintaining sufficient workability and strength for studio use, despite the absolute strength being below the standard norm. Regarding the incorporation into ceramic bodies and glazes, although the material performed well physically and produced visually successful "crater" textures, the tests revealed a critical safety risk. The degradation of sulfate at high temperatures and the subsequent release of corrosive gases ( $SO_2$ ) were observed, which is why its use is strongly discouraged in firing stages using electric kilns without proper exhaust systems. Thus, the technical viability of reinsertion is concentrated on the production of new molds, a premise materialized as a proof of concept in a decorative lamp that adds value to the waste. The originality of the research lies in the practical validation of recycled plaster in an academic and artisanal context, transforming an environmental problem into a sustainable design solution, while rigorously highlighting the technical and safety limits for its application.

Keywords: Recycled gypsum. Sustainable design. Ceramics. Circular economy. Waste repurposing

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>1.1 Justificativa.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2 Problema.....</b>	<b>11</b>
<b>1.3 Objetivos.....</b>	<b>11</b>
1.3.1 <i>Objetivo geral.....</i>	11
1.3.2 <i>Objetivos específicos.....</i>	11
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Cerâmica e design: contexto histórico-cultural e a relevância do gesso.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 A química do gesso.....</b>	<b>14</b>
2.2.1 <i>Processo de calcinação da gipsita.....</i>	15
2.2.2 <i>Processo de hidratação e endurecimento do gesso.....</i>	17
<b>2.3 Reciclagem e Reuso de Gesso: revisão das práticas e pesquisas existentes...18</b>	
2.3.1 <i>Estratégias de design sustentável: Ecodesign, Economia Circular e Ciclo de Vida.....</i>	19
2.3.2 <i>Panoramas gerais sobre reciclagem de gesso.....</i>	21
2.3.3 <i>Reaproveitamento do gesso reciclado em novos moldes ou como aglomerante base (Gesso com Gesso).....</i>	22
2.3.4 <i>Incorporação do gesso reciclado em argamassas, revestimentos e compósitos cimentícios.....</i>	25
2.3.5 <i>Uso do gesso reciclado na agricultura (correção de solos).....</i>	27
2.3.6 <i>Gesso reciclado em materiais geopoliméricos e outros compósitos de ligantes alternativos.....</i>	28
2.3.7 <i>Incorporação do gesso reciclado em produtos cerâmicos (adoquins, ladrilhos, blocos, massa cerâmica queimada).....</i>	29
2.3.8 <i>Uso do gesso reciclado em esmaltes cerâmicos.....</i>	31
<b>3 MÉTODOS.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 Tipo de Pesquisa.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2 O Método de Projeto (MD3E adaptado).....</b>	<b>33</b>
3.3 Procedimentos experimentais.....	36
3.3.1 <i>Preparação e Beneficiamento do Gesso Reciclado (GR).....</i>	37
3.3.2 <i>Caracterização do pó.....</i>	39
3.3.3 <i>Caracterização da pasta.....</i>	40
3.3.4 <i>Determinação das propriedades mecânicas.....</i>	44
3.3.5 <i>Incorporação do GR em Massas Cerâmicas.....</i>	47
3.3.6 <i>Ensaio de Absorção de Água (Massas cerâmicas e gesso).....</i>	52
3.3.7 <i>Incorporação do GR em Formulações de Esmaltes.....</i>	55
3.3.7.1 <i>Formulação dos Esmaltes Base.....</i>	57
3.3.7.2 <i>Formulação das variações.....</i>	60
3.3.7.3 <i>Preparação, aplicação e queima.....</i>	62
3.3.8 <i>Prototipagem de placa funcional de reciclagem de argila.....</i>	65
3.4 <i>Tratamento e Análise Estatística dos Dados.....</i>	68
3.5 <i>Produção de Peça Demonstrativa.....</i>	69
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>73</b>
4.1 <i>Gesso Reciclado para Novos Moldes.....</i>	73

4.1.1	Preparação e Beneficiamento do Gesso Reciclado (GR).....	73
4.1.2	Caracterização do Pó de Gesso (GR e GC).....	75
4.1.3	Caracterização da Pasta de Gesso (GR e Misturas).....	76
4.1.4	Propriedades Mecânicas do Gesso (GR e Misturas) e Análise Estatística.....	78
4.1.5	Absorção de água do Gesso (GC e Misturas).....	83
4.1.6	Viabilidade de Reutilização.....	84
4.2	Gesso Reciclado em Massas Cerâmicas.....	85
4.2.1	Análise da Estabilidade Dimensional e Retração Linear.....	85
4.2.2	Absorção de Água (AA).....	86
4.2.3	Análise da Variação Granulométrica do Chamote.....	87
4.2.4	Análise Estética e Comportamento na Queima.....	89
4.2.5	Viabilidade de Utilização de GR em Massas Cerâmicas.....	90
4.3	Gesso Reciclado em Formulações de Esmaltes Cerâmicos.....	91
4.3.1	Esmaltes Cratera.....	91
4.3.1	Esmaltes Lisos.....	94
4.3.3	Viabilidade de Utilização de GR em Esmaltes (e Massas Cerâmicas).....	96
4.4	Gesso Reciclado no Protótipo de Placa Funcional para Reciclagem de Argila.....	97
4.5	Incorporação do Gesso Reciclado no Processo Produtivo da Peça Demonstrativa..	98
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>101</b>
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	103
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>105</b>
	<b>APÊNDICE A – Resultado dos testes de mini-slump do gesso.....</b>	<b>114</b>
	<b>APÊNDICE B – Resultado dos ensaios de dureza do gesso.....</b>	<b>116</b>
	<b>APÊNDICE C – Resultado dos ensaios de resistência à compressão do gesso.....</b>	<b>118</b>
	<b>APÊNDICE D – Tabelas de análise estatística (ANOVA e Teste de Tukey) dos ensaios de resistência à compressão.....</b>	<b>121</b>
	<b>APÊNDICE E – Tabelas de análise estatística (Teste t de Student) dos ensaios de resistência à compressão do lote ótimo (150 °C/2h).....</b>	<b>126</b>
	<b>APÊNDICE F – Tabela de análise estatística (Teste t de Student) dos ensaios de absorção de água do lote ótimo (150 °C/2h).....</b>	<b>127</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A cerâmica, uma das mais ancestrais e constantes expressões da engenhosidade humana, há milênios molda o cotidiano e a cultura de diversas civilizações (Almeida, 2010; Sato, 2016). Mais do que meros objetos utilitários, suas peças carregam profundo significado simbólico e se estabelecem como um bem cultural imaterial, transmitindo saberes e tradições através das gerações (Almeida, 2010; Pinto, 2022). Em um cenário contemporâneo, a evolução tecnológica da cerâmica impulsiona sua constante reinvenção no campo do design de produto, onde a busca por novos papéis e soluções sustentáveis se alinha à sua capacidade histórica de inovar (Sato, 2016).

Nesse vasto e complexo universo da cerâmica, e de forma mais ampla na produção de materiais, o gesso desempenha um papel central, sendo um aglomerante<sup>1</sup> fundamental utilizado por milênios em diversas áreas. Registros históricos apontam seu uso em diversas aplicações há mais de 8000 anos no Oriente Próximo, durante o Neolítico Pré-Cerâmico B (Kingery; Vandiver; Prickett, 2013), e na Grécia e Roma antigas já era usado em detalhes arquitetônicos e moldes (University of Canterbury, [20--]).

O gesso é obtido a partir da calcinação da gipsita, que é sulfato de cálcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (Damasceno, 2013). Durante a calcinação, a gipsita perde 3/4 da água de cristalização, convertendo-se em sulfato de cálcio hemi-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ) (Damasceno, 2013). Esta forma calcinada, conhecida como gesso, tem várias utilizações, notadamente na construção civil, na área médica e, crucialmente para o design, na produção cerâmica.

Na produção de peças cerâmicas, o emprego de moldes de gesso é uma técnica tradicional e de vasta aplicação. Uma das técnicas mais conhecidas é a colagem de barbotina (*slip casting*), que consiste em preparar uma suspensão aquosa de pó cerâmico e vertê-la num molde de material poroso. O molde absorve o excesso de água da suspensão, formando uma camada sólida do material nas paredes do molde. Esse processo permite a produção de peças cerâmicas de formatos complexos, ocios ou sólidos, de maneira rápida e altamente replicável

---

<sup>1</sup> Os aglomerantes são materiais com propriedades ligantes, geralmente em forma de pó, que ao serem misturados com água formam uma pasta que endurece por processos devido às reações químicas ou por simples secagem.

(Gontijo, 2016). Entre os diversos materiais potenciais para a fabricação de moldes, o gesso começou a ser amplamente utilizado a partir do século XVIII, em razão de sua elevada porosidade, facilidade de moldagem e baixo custo (Cunha, 2019).

O gesso, contudo, embora versátil, é um material sensível ao modo de preparo e manuseio, o que, somado à sua característica de endurecimento rápido, frequentemente culmina na inutilização e descarte de parte do material durante o processo produtivo. No campo do design de produto e processos, essa geração de resíduos representa um ponto de intervenção crucial. Em geral, os resíduos de gesso demandam um descarte específico e não podem ser misturados com resíduos comuns ou entulho de construção civil. Isso se deve à sua natureza química, que em ambientes úmidos e com pouca ventilação (como aterros sanitários), pode gerar gás sulfídrico ( $H_2S$ , um gás tóxico e inflamável), que contamina o solo e lençóis freáticos (Damasceno, 2013). Considerando a relevância do gesso no ambiente de produção cerâmica artesanal, como o Laboratório de Modelagem II - Cerâmica do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) e ateliês, esse potencial problema ambiental do descarte não só se torna evidente, mas também se apresenta como uma oportunidade para o Design propor alternativas de sustentabilidade e economia, reinserindo um resíduo na cadeia produtiva e agregando valor.

## 1.1 Justificativa

De acordo com as resoluções nº 307/2002 (Brasil, 2002) e 431/2011 (Brasil, 2011) do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), o resíduo de gesso é classificado como um resíduo reciclável não inerte, que deve ser separado na fonte geradora e não deve ser descartado em áreas não licenciadas ou aterros sanitários comuns.

O descarte inadequado desses resíduos representa sérios problemas ambientais, uma vez que o gesso, quando exposto a umidade e condições anaeróbicas (cenário comum em aterros sanitários e lixões), sofre reações que liberam gás sulfídrico ( $H_2S$ , um composto tóxico e inflamável) além de contaminar o solo e lençóis freáticos com íons  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$  (Damasceno, 2013; Fernandes, 2016; John; Cincotto, 2003). A incineração de resíduos contendo gesso também é

desaconselhada, pois o sulfato se converte em dióxido de enxofre, comprometendo o controle de poluição atmosférica (Fernandes, 2016).

Apesar da clareza das normas, a escassez de iniciativas para reciclagem de gesso no Brasil dificulta seu descarte correto, especialmente em regiões distantes dos pólos produtores ou consumidores. Em Santa Catarina, por exemplo, os municípios da Grande Florianópolis carecem de local adequado à destinação do gesso, como uma estação de transbordo coberta. Os resíduos, quando recolhidos de forma adequada por construtoras, são encaminhados a municípios vizinhos, como Imbituba, onde indústrias de reciclagem utilizam o material para corretivos agrícolas de solo (Fernandes, 2016).

Mesmo nos processos de reciclagem do resíduo de construção e demolição (RCD), o gesso é um contaminante problemático. Sua presença impede a reutilização da fração mineral para a produção de agregados, pois o sulfato do gesso reage com aluminatos do cimento, gerando etringita, que "apresenta volume muito maior que os compostos originais, ocasionando altas tensões de expansão na matriz dos concretos" (Fernandes, 2016; John; Cincotto, 2003).

Diante da crescente preocupação com o impacto ambiental e a necessidade de otimizar o uso de recursos, este trabalho se insere nos princípios da economia circular e do ecodesign. A economia circular (Kirchherr et al., 2023; Hom, 2024) e o ecodesign (Pazmino, 2007) fornecem o alicerce conceitual para o desenvolvimento de alternativas que visam a manutenção do valor do material no ciclo produtivo, em vez de seu descarte, buscando demonstrar o potencial criativo e técnico do design na transformação de um problema ambiental em um recurso valioso.

Nesse cenário, os resíduos de gesso gerados no Laboratório de Cerâmica do Campus Florianópolis do IFSC, provenientes das aulas de design cerâmico, representam tanto um desafio ambiental quanto uma significativa oportunidade para a inovação no design. Este TCC propõe explorar o reaproveitamento desses resíduos de gesso descartados por meio de experimentação prática, buscando alternativas inovadoras para reintroduzir esse material em novos ciclos produtivos. Ao alinhar-se com os temas de ecodesign, sustentabilidade e economia circular, o estudo visa não apenas reduzir o desperdício e seus impactos negativos, mas também, de acordo com Frade e Ferroli (2022), gerar novas oportunidades para a valorização de resíduos por integração no processo cerâmico. Em última análise, o

projeto busca demonstrar o potencial criativo e técnico do design na transformação de um problema ambiental em um recurso valioso e em soluções inovadoras.

## **1.2 Problema**

Considerando os significativos impactos ambientais negativos causados pelo descarte inadequado do gesso e as dificuldades logísticas em sua destinação apropriada, surge a necessidade de explorar alternativas de reutilização desse material. Nesse cenário, o presente trabalho busca responder: Como o resíduo de gesso proveniente do processo produtivo cerâmico pode ser efetivamente reutilizado e transformado em um produto com viabilidade técnica e estética?

## **1.3 Objetivos**

Os objetivos deste trabalho foram desdobrados em uma meta abrangente e em etapas específicas a serem cumpridas, apresentadas a seguir.

### *1.3.1 Objetivo geral*

Através deste trabalho, pretende-se investigar, por meio de experimentações práticas, a viabilidade do reaproveitamento de resíduos de gesso gerados no Laboratório de Modelagem II – Cerâmica do IFSC Florianópolis, com vistas à sua reinserção em etapas do processo produtivo cerâmico.

### *1.3.2 Objetivos específicos*

1. Verificar a viabilidade da reutilização de resíduos de gesso através de processos de secagem e calcinação;
2. Analisar o comportamento e as propriedades do gesso calcinado incorporado em massas cerâmicas;
3. Investigar o potencial do gesso calcinado como componente em formulações de esmaltes cerâmicos;
4. Avaliar a viabilidade técnica e estética da aplicação do gesso reaproveitado na criação de uma peça demonstrativa, que exemplifique os métodos de reincorporação do material.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo estabelece a base conceitual e empírica para o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, será apresentada uma contextualização abrangente do tema, abordando o significado da cerâmica e o papel histórico e técnico do gesso. Em seguida serão detalhados os processos de transformação do gesso. Por fim, uma revisão das práticas e pesquisas existentes sobre a reciclagem e o reuso de gesso será explorada, organizada por áreas de aplicação.

### 2.1 Cerâmica e design: contexto histórico-cultural e a relevância do gesso

A cerâmica é um material que transcende as barreiras do tempo e das culturas, estabelecendo-se como uma das mais antigas e persistentes manifestações da criatividade e engenhosidade humana. De acordo com Lévi-Strauss (1986), "Há milênios, sob todas as suas formas – barro esmaltado ou não, faiança, porcelana – a cerâmica está presente em todos os lares, humildes ou aristocráticos" (Lévi-Strauss, 1986, p. 17). Essa onipresença a torna um "fio condutor" essencial para a compreensão das civilizações ancestrais, fornecendo aos arqueólogos subsídios consideráveis para identificar e explicar o *modus vivendi* de nossos antepassados (Almeida, 2010). Para Sato (2016), "A cerâmica escreve a história da humanidade desde as mais remotas culturas ancestrais da África e das Américas" (Sato, 2016, p. 20). Exemplos como as estatuetas de cerâmica de Dolni Vestonice, datadas de aproximadamente 24.000 a.C., são consideradas os primeiros registros conhecidos de tecnologia cerâmica (Sato, 2016).

Além de sua função utilitária, a cerâmica sempre carregou um profundo significado cultural e simbólico. De acordo com Almeida (2010), artefatos cerâmicos não apenas supriam necessidades básicas, como recipientes, mas também desempenhavam papéis ritualísticos, muitas vezes adornados com representações gráficas que ilustravam o cotidiano ou o universo mitológico das pessoas. Em diversas culturas, o ato de fazer cerâmica era imbuído de um caráter sagrado e misterioso. A cerâmica, portanto, manifesta-se como um bem cultural imaterial, transmitindo saberes e técnicas artesanais de geração em geração, como destacado

na olaria tradicional portuguesa, que possui “uma mensagem de sabedoria que passa do mestre oleiro para o aprendiz ao longo do tempo” (Pinto, 2022, p. 32).

A capacidade da cerâmica de expressar e reforçar a identidade cultural de uma nação é notável. Em Portugal, por exemplo, o azulejo se consolidou como um elemento fundamental do design de interiores e da arquitetura, contribuindo para uma identidade visual única e sendo amplamente utilizado desde o século XVI (Junqueira, 2021). Ainda segundo Junqueira (2021), o azulejo possui um “valor histórico associado à identidade visual portuguesa e um papel importante em termos produtivos e industriais” (Junqueira, 2021, p. 12). Similarmente, Altrock (1998) descreve como a arte e a espiritualidade islâmicas são simbolizadas nos suntuosos revestimentos cerâmicos que ornaram os edifícios dos povos turcos.

O progresso tecnológico da cerâmica, impulsionado por eventos como a Revolução Industrial e a popularização da porcelana chinesa no século XIX, a posicionou no cerne do desenvolvimento da produção seriada e no campo do design de produto, buscando “novos papéis além de servir a mesa, decorar as casas e protagonizar rituais” (Sato, 2016, p. 25).

Nesse vasto e complexo panorama da produção cerâmica, o gesso emerge como um material de importância central, especialmente na fabricação de moldes. Seu uso é ancestral, remontando ao Neolítico Pré-cerâmico B (aproximadamente 8.800 a.C. a 6.500 a.C), onde já era empregado em diversas aplicações, incluindo paredes e pisos arquitetônicos, vasilhames como jarros e tigelas, e na produção de objetos como esculturas e contas (Kingery; Vandiver; Prickett, 2013). Na indústria cerâmica contemporânea, o gesso consolidou-se como o principal material para moldagem, sendo crucial na formação e modelagem de uma vasta gama de produtos. De acordo com Wiss, Camp e Ladoo (1930), o gesso tem sido, por vários anos, o principal material utilizado na moldagem e conformação de produtos cerâmicos. Sua posição proeminente se deve a uma combinação de fatores como economia, adaptabilidade e as propriedades únicas de suas moldagens.

Os moldes de gesso são porosos, fáceis de manusear e de baixo custo, sendo universalmente empregados no processo de colagem de barbotina (Cunha, 2019; Gontijo, 2016), no qual “uma suspensão aquosa da matéria-prima em pó (barbotina) é vertida dentro do molde, que absorve o excesso de água da suspensão formando uma camada fina do material sólido sobre as paredes do molde” (Gontijo, 2016, p. 4). Essa capacidade de absorção de água, sem permitir o escoamento das

partículas em suspensão, é uma de suas maiores vantagens, garantindo a formação de peças verdes com microestruturas homogêneas e alta densidade, o que é determinante para a qualidade final do produto cerâmico (Cunha, 2019; Gontijo, 2016). A versatilidade do gesso permite sua aplicação em diversas ramificações da indústria cerâmica, abrangendo desde a fabricação de louças brancas, louças sanitárias, isoladores e grés, até unidades cerâmicas estruturais como terracota e formas refratárias especiais (Wiss; Camp; Ladoo, 1930). A habilidade de fabricar moldes finos e detalhados, o curto tempo de ajuste e a possibilidade de reutilização dos moldes também contribuem para seu amplo uso (Cunha, 2019).

Também muito difundida na construção civil (na forma de revestimento, componentes pré-moldados e chapas de gesso acartonado), a aplicação do gesso acarreta um significativo problema de resíduos. Segundo Damasceno (2013), o gesso apresenta rápida velocidade de endurecimento, fato que, aliado à aplicação manual e, muitas vezes, à baixa qualificação da mão de obra, resulta em elevado desperdício. Damasceno (2013) argumenta também que "O reduzido tempo de pega das pastas de gesso determina um tempo curto para aplicação do revestimento, gerando grandes perdas de material, em torno de 35%" (Damasceno, 2013, p. 17). Fernandes (2016) complementa que o desperdício do gesso é estimado em 45%, enquanto fabricantes de gesso em pó estimam perdas em torno de 30%. No Brasil, dados de 2016 apontam que a construção civil é responsável por um montante total de resíduos de gesso de 1,316 milhão de toneladas anuais, com as atividades de revestimento respondendo por 88% desse volume (Almeida; Soares; Matos, 2020; Fernandes, 2016). Já na indústria cerâmica de sanitários, o resíduo de gesso é decorrente do descarte de moldes, cuja eficiência diminui progressivamente com o uso, em razão da perda da capacidade de absorção da água da barbotina. A geração desse material situa-se entre 50 e 80 kg por tonelada de peças produzidas (Cabral Junior *et al.*, 2010).

## **2.2 A química do gesso**

O gesso é obtido principalmente através da calcinação da gipsita, que é a matéria-prima natural. A gipsita natural é um mineral de sulfato de cálcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). A calcinação é um processo de tratamento térmico que submete a gipsita a aquecimento em fornos para provocar a sua desidratação. Depois de

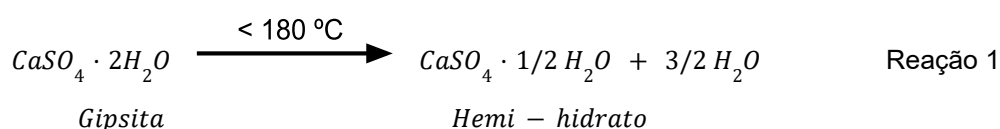
calcinado, o gesso em pó é utilizado através de sua hidratação (Bardella, 2011; Damasceno, 2013; Erbs, 2016; Fernandes, 2016; Savi, 2012).

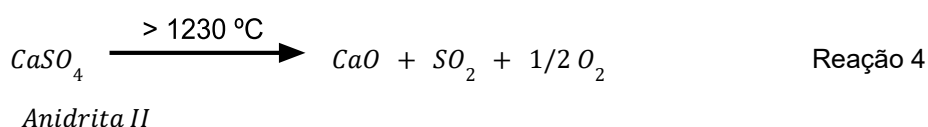
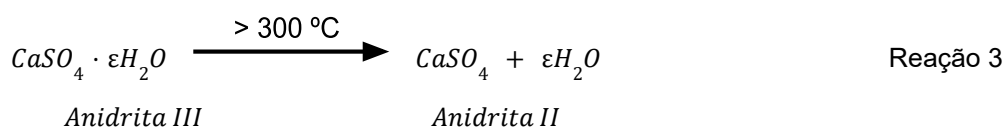
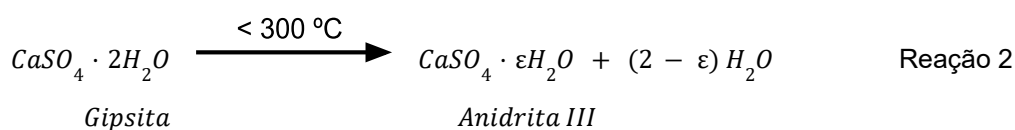
### *2.2.1 Processo de calcinação da gipsita*

A calcinação ocorre em etapas progressivas de desidratação de acordo com a temperatura, gerando diferentes formas de gesso:

- A. Di-hidrato (Gipsita -  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ): É a forma natural do mineral. Quando aquecida, a gipsita libera água. Inicialmente, a uma temperatura de até  $100^\circ\text{C}$ , ocorre a liberação da água livre existente no material (Fernandes, 2016).
  
- B. Hemi-hidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ): Este é o principal componente do gesso em pó comercial e a primeira espécie química formada na desidratação da gipsita. Ele é obtido quando a gipsita é aquecida a temperaturas entre  $100^\circ\text{C}$  e  $180^\circ\text{C}$ . Nesta etapa, a água fracamente combinada se desprende da gipsita, conforme a Reação 1 (Bardella, 2011; Erbs, 2016). A obtenção de uma maior porcentagem de hemi-hidratado no gesso produzido é crucial para sua qualidade, pois ele possui um maior poder aglomerante para uso, por exemplo, na construção civil (Bardella, 2011).
  - a. Hemi-hidrato alfa ( $\alpha$ ): Obtido pelo processo de calcinação por via úmida, em fornos sob pressão de vapor de água saturado (autoclaves). Este tipo de gesso é mais resistente e é utilizado em moldes de precisão e na odontologia. Os cristais formados são grandes e regulares (Savi, 2012).
  
  - b. Hemi-hidrato beta ( $\beta$ ): Obtido pelo processo de calcinação por via seca, sob pressão atmosférica ou fraca pressão. É o tipo de gesso mais utilizado na construção civil para a produção de placas, blocos ou pastas de revestimento. Seus cristais são pequenos e de formas irregulares (Savi, 2012).

- C. Sulfato Anidro Solúvel ou Anidrita III ( $\text{CaSO}_4 \cdot \epsilon \text{H}_2\text{O}$ ): Se a temperatura durante a calcinação se eleva para o intervalo de 180 °C a 300 °C, ocorre a formação da anidrita III. Este composto possui um teor de água de cristalização variável ( $\epsilon$ ), que geralmente fica entre 0,06 e 0,11. A formação da anidrita III a partir do hemi-hidrato é representada na Reação 2 (Bardella, 2011; Erbs, 2016). É muito reativa e age como acelerador de pega (Fernandes, 2016). Transforma-se em hemi-hidrato com a umidade do ar em um processo chamado "estabilização", que ocorre em até 12 horas de armazenamento em ambiente com 80% de umidade relativa do ar (Bardella, 2011).
- D. Sulfato Anidro Insolúvel ou Anidrita II ( $\text{CaSO}_4$ ): Quando a temperatura de calcinação ultrapassa os 300 °C, o sulfato anidro insolúvel, conhecido como anidrita II, é formado. Este processo de desidratação completa da gipsita é demonstrado na Reação 3 (Bardella, 2011; Erbs, 2016).
- Quando calcinada acima de 300 °C, reage lentamente com água, podendo levar até sete dias para hidratar (Fernandes, 2016).
  - Quando calcinada acima de 700 °C, é chamada de anidrita calcinada até a morte e hidrata-se somente após alguns meses (Fernandes, 2016).
- E. Anidrita I ( $\text{CaSO}_4$ ): Obtida pela calcinação da gipsita em temperaturas entre 1.100°C e 1.200°C. É considerada uma fase não pura, contendo óxido de cálcio devido ao início da dissolução térmica do  $\text{CaSO}_4$  acima de 800°C. Acima de 1230°C, a anidrita I se decompõe em óxido de cálcio e anidrido sulfuroso (Reação 4) (Fernandes, 2016).





Embora o material obtido no processo industrial não seja totalmente homogêneo devido às variações de temperatura dentro do forno, o gesso comercial geralmente contém os três compostos: hemi-hidratado beta e as anidritas III e II (em menores proporções) (Bardella, 2011).

### 2.2.2 Processo de hidratação e endurecimento do gesso

O gesso (hemi-hidrato) é um aglomerante que, em contato com a água, forma uma pasta homogênea e trabalhável. O processo de hidratação é um fenômeno químico no qual o hemi-hidrato e a anidrita solúvel retomam a quantidade de água perdida durante a calcinação e são transformados novamente em di-hidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (Bardella, 2011; Damasceno, 2013; Erbs, 2016).

Caracterizada por ser altamente exotérmica (dá-se com liberação de calor), a hidratação do hemi-hidrato ocorre em 4 etapas (Damasceno, 2013; Fernandes, 2016):

1. Dissolução: O pó de hemi-hidrato entra em contato com a água, as superfícies são molhadas e ocorre a dissolução, formando um sistema iônico saturado de íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  (Bardella, 2011; Damasceno, 2013; Fernandes, 2016).

2. **Indução:** Após a dissolução inicial, ocorre um período de estabilização onde os hidratos existentes se organizam em um arranjo cristalino. Neste período, os hidratos primários constituem os "germes de nucleação". Fatores como a relação água/gesso, agitação, tempo de mistura, temperatura da água e impurezas afetam este período (Bardella, 2011; Damasceno, 2013; Fernandes, 2016).
  
3. **Crescimento dos núcleos de cristalização (Período de Nucleação/Aceleração):** A partir de uma solução supersaturada, os íons de cálcio e sulfato se depositam sobre os núcleos, promovendo o crescimento de cristais entrelaçados em forma de agulhas. Com a formação contínua dos cristais, a pasta endurece e adquire resistência mecânica. Esta etapa é extremamente exotérmica (Bardella, 2011; Damasceno, 2013; Fernandes, 2016).
  
4. **Redução das reações (Período de Endurecimento):** Acontece uma redução gradativa dos constituintes anidros e da velocidade das reações de hidratação. O gesso ganha resistência até cerca de 20 horas, e depois o ganho de resistência ocorre por evaporação da água de amassamento (Bardella, 2011; Damasceno, 2013).

A reversibilidade das reações de transformação da gipsita em gesso (calcinação) e do gesso em gesso di-hidratado (hidratação) é o que torna a reciclagem do resíduo de gesso tecnicamente viável, podendo ser um ciclo contínuo (Erbs, 2016; Fernandes, 2016; Savi, 2012).

### **2.3 Reciclagem e Reuso de Gesso: revisão das práticas e pesquisas existentes**

Esta seção apresenta uma revisão aprofundada da literatura sobre a reciclagem e o reuso de resíduos de gesso, destacando as principais investigações e aplicações em diferentes contextos. Fundamentada nos pilares do Ecodesign e da Economia Circular, a discussão busca conectar a viabilidade técnica do reaproveitamento ao ciclo de vida dos materiais dentro do contexto do design cerâmico. Serão abordados panoramas gerais sobre a sustentabilidade do processo,

o reaproveitamento do gesso em novos moldes, sua incorporação em argamassas e compósitos cimentícios, o uso na agricultura, em materiais geopoliméricos, em produtos cerâmicos, como adoquins, ladrilhos e blocos e, por fim, em esmaltes.

### 2.3.1 Estratégias de design sustentável: Ecodesign, Economia Circular e Ciclo de Vida

A inserção da sustentabilidade no campo do design transcende a mera escolha de materiais de baixo impacto, exigindo uma abordagem sistêmica que considere todo o ciclo de vida do produto. Nesse sentido, o Ecodesign estabelece-se como uma metodologia que integra critérios ambientais ao desenvolvimento do projeto, visando a eficiência de recursos e a redução de desperdícios desde a concepção, implementando estratégias como a minimização do consumo de recursos, seleção de recursos e processos de baixo impacto, otimização da vida útil do produto, extensão da vida útil dos materiais, entre outras (Vezzoli; Manzini, 2008). No contexto cerâmico, o ecodesign pode se manifestar, por exemplo, na busca por processos que demandem menos energia, como a monoqueima, e na substituição de insumos virgens por subprodutos de processos anteriores.

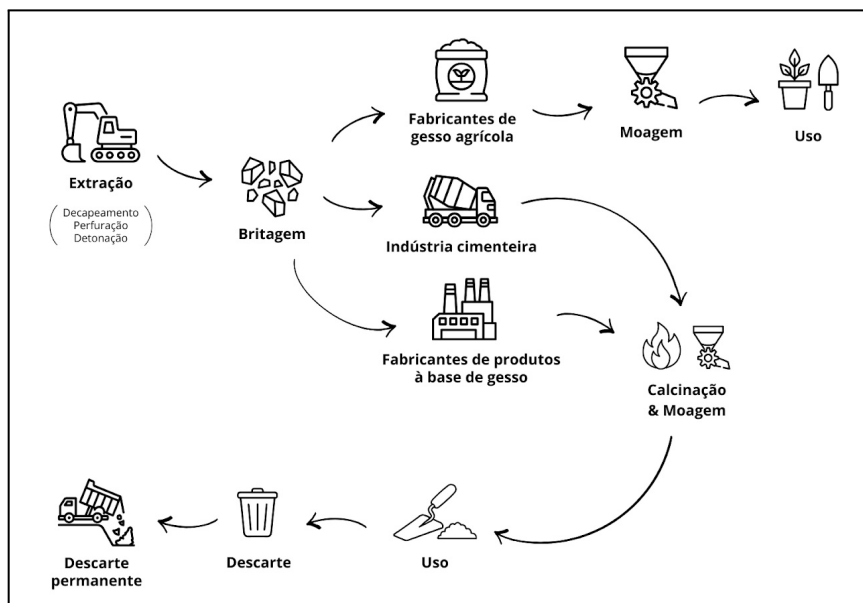
Essa prática converge para o conceito de Economia Circular, que propõe a transição do modelo linear de produção (extrair-produzir-usar-descartar) para um sistema cíclico, onde o resíduo é ressignificado como um "nutriente tecnológico" (McDonough; Braungart, 2013).

Segundo Kirchherr *et al.* (2023), a Economia Circular pode ser explicada como uma economia regenerativa que busca substituir o conceito de "fim de ciclo" pelos princípios fundamentais de reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar, os chamados 4Rs.

Ao tratar o molde de gesso velho não como entulho, mas como matéria-prima para novos moldes, massas e esmaltes, o designer promove um ciclo de vida fechado. A Análise de Ciclo de Vida (ACV), mesmo quando aplicada de forma qualitativa na escala laboratorial, permite identificar que a maior carga ambiental do gesso reside na extração e beneficiamento inicial; assim, a reinserção do material reciclado no processo cerâmico estende sua utilidade funcional e reduz a pegada ecológica da produção artesanal e industrial. A Figura 1 ilustra o ciclo de vida do gesso no chamado "berço ao túmulo", no qual o gesso é descartado após o uso, enquanto a Figura 2 introduz os resíduos de volta ao processo produtivo através das

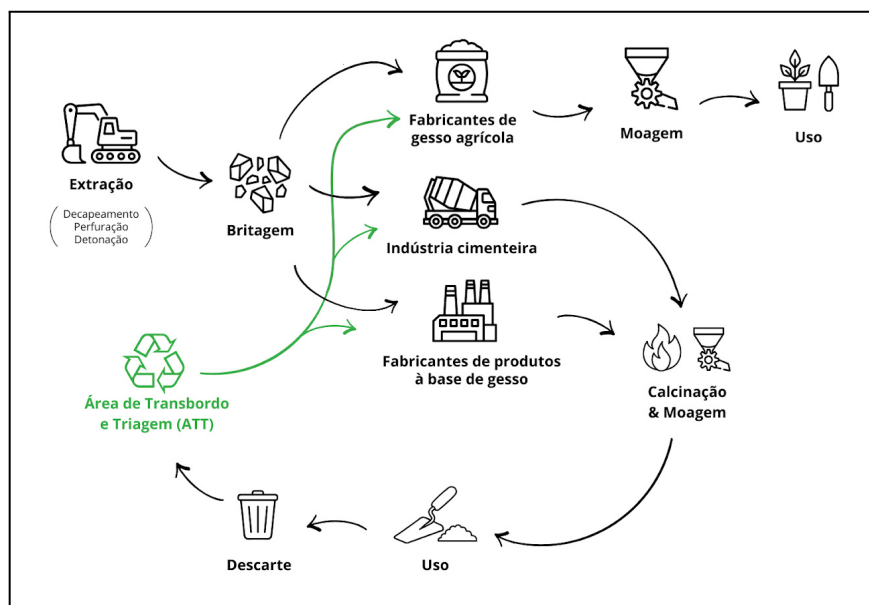
Áreas de Transbordo e Triagem (ATT), transformando o ciclo de vida do gesso no chamado “berço ao berço”.

Figura 1 – Ciclo de vida do gesso do berço ao túmulo”



Fonte: Adaptado de Silva Neto et al. (2015).

Figura 2 – Ciclo de vida do gesso do berço ao berço



Fonte: Adaptado de Silva Neto et al. (2015).

### *2.3.2 Panoramas gerais sobre reciclagem de gesso*

A gestão de resíduos da construção civil representa um desafio ambiental significativo, impulsionando a busca por soluções sustentáveis. Nesse cenário, a reciclagem do gesso emerge como uma alternativa promissora. Levantamentos bibliográficos, como os realizados por Oliveira e Polisseni (2013) e Cavalcante, Rodrigues e Santana (2021), concluem que o processo de reciclagem e gestão dos resíduos de gesso é técnica, econômica e ecologicamente viável. Essa perspectiva é reforçada pela capacidade de o material ser reintegrado na cadeia produtiva, minimizando os impactos ambientais e otimizando o uso de recursos (Cavalcante; Miranda, 2011; Cavalcante; Rodrigues; Santana, 2021; Oliveira; Polisseni, 2013).

Diversos estudos apontam as principais aplicações comprovadas para o gesso reciclado. Na indústria cimenteira, ele pode atuar como uma adição para controlar o tempo de pega do cimento (Cavalcante; Miranda, 2011; Cavalcante; Rodrigues; Santana, 2021; Oliveira; Polisseni, 2013). No setor agrícola, o gesso reciclado é viável como corretivo de acidez do solo (Cavalcante; Miranda, 2011; Cavalcante; Rodrigues; Santana, 2021; Oliveira; Polisseni, 2013), contribuindo para melhorias no terreno. Além disso, a própria indústria de transformação do gesso e o setor da construção civil podem se beneficiar da reinserção desse resíduo. Especificamente na construção, o gesso reciclado pode ser utilizado em argamassas, revestimentos e placas, demonstrando, inclusive, resistência de aderência satisfatória (Cavalcante; Miranda, 2011).

As pesquisas também enfatizam que o gesso reciclado possui índices de segurança satisfatórios e é considerado mais vantajoso ecologicamente do que a produção a partir de matéria-prima virgem (Cavalcante; Rodrigues; Santana, 2021). Para que suas propriedades se equiparem às do gesso comercial, é crucial que os processos de calcinação e moagem sejam executados com precisão (Cavalcante; Rodrigues; Santana, 2021). No contexto brasileiro, alternativas viáveis de reuso e reciclagem para os resíduos de gesso da construção civil foram identificadas, reforçando a viabilidade técnica e econômica dessas práticas e alinhando-se aos princípios da construção sustentável (Cavalcante; Miranda, 2011).

### *2.3.3 Reaproveitamento do gesso reciclado em novos moldes ou como aglomerante base (Gesso com Gesso)*

A reutilização do gesso descartado em sua função original de aglomerante, seja para novos moldes ou componentes, é uma das vias mais promissoras da economia circular no setor. Diversos estudos práticos se dedicam a otimizar a reciclagem do gesso hidratado para que o material recuperado mantenha ou até melhore suas propriedades em comparação ao gesso virgem.

O processo de reciclagem tipicamente envolve a moagem e a calcinação (desidratação térmica) do resíduo de gesso, convertendo-o de volta à forma com propriedades aglomerantes. Os parâmetros adotados nesses processos, como temperatura e tempo de calcinação, são determinantes para a qualidade final do gesso reciclado (RGP).

Damasceno (2013) e Camarini, Lima e Pinheiro (2016) investigaram a reciclagem de resíduos de gesso de revestimento e de obras, respectivamente. Ambos os estudos indicaram que os gessos reciclados apresentaram bom desempenho. Na pesquisa de Damasceno (2013), as condições ideais de reciclagem foram temperatura de calcinação de 160 °C, tempo de residência de 8 horas e relação água/gesso de 0,70, resultando em material compatível com o gesso comercial. A adição do gesso reciclado a pastas de gesso comercial (CGP) demonstrou aumento significativo na resistência à compressão, sendo viável para uso em fundição e revestimentos internos com 100% de resíduo. Já Camarini, Lima e Pinheiro (2016) analisaram o RGP calcinado em temperaturas de 120 °C, 150 °C e 200 °C por períodos de 1 a 24 horas. Este estudo concluiu que o processo é economicamente e ambientalmente vantajoso, e que o RGP calcinado a 150 °C teve o melhor desempenho geral, apesar de tempos de pega mais curtos.

A pesquisa de Fernandes (2016) sobre resíduos de gesso de construção (placas e revestimento) utilizou calcinação a 140 °C, 170 °C e 200 °C por 1, 2 e 4 horas. O estudo apontou que os gessos com melhor desempenho foram os calcinados a 200 °C por duas horas (gesso de placa) e quatro horas (gesso de revestimento). Notavelmente, as propriedades químicas e microestruturais do RGP foram semelhantes às do gesso comercial, e algumas amostras atenderam à norma europeia para resistência à compressão e tração na flexão, mesmo que a maioria não atingisse a norma brasileira.

Erbs (2016) investigou a qualidade do gesso reciclado de chapas de gesso acartonado e gesso comum ao longo de cinco ciclos de reciclagem. O processo envolveu trituração, moagem, calcinação, hidratação e testes de corpos de prova. O estudo demonstrou a viabilidade técnica da reciclagem cíclica, com amostras de gesso acartonado reciclado atendendo aos critérios de tempo de pega até o quarto ciclo e atingindo boa resistência à compressão até o terceiro ciclo.

Para a produção de giz a partir de resíduos de gesso, Padilha Neto (2019) desenvolveu metodologias baseadas em secagem e calcinação. Os gessos reciclados apresentaram endurecimento muito rápido devido à presença de anidrita III, resultando em uma estrutura de giz pouco porosa e muito dura. O autor sugere a estabilização do gesso reciclado em ambiente úmido para converter a anidrita III em hemi-hidrato, buscando maior porosidade para aumentar a maciez do giz.

Bardella (2011) avaliou a reutilização de resíduos de gesso da construção civil, explorando a influência da temperatura de calcinação (150 °C, 180 °C e 200 °C por 24 horas) e da finura da moagem, adotando duas finuras distintas (material passante em peneira de 3mm e 0,8 mm). O estudo concluiu que o gesso reciclado tinha propriedades semelhantes ao gesso comercial. Embora a resistência à compressão do RGP fosse geralmente inferior ao comercial, a resistência à tração na flexão do RGP foi superior. A moagem se mostrou crucial para as propriedades da pasta no estado fresco, evitando fissuras de retração.

A pesquisa de Rossetto *et al.* (2015) analisou especificamente a influência do tempo de calcinação (1h, 2h, 3h, 4h, 5h e 6h) a uma temperatura constante de 150 °C no gesso reciclado (RGP). Os resultados indicaram que o RGP calcinado a 150 °C apresentou bom desempenho no estado endurecido, com os melhores resultados de resistência à compressão (13,28 MPa) e dureza superficial (45,73 MPa) sendo obtidos com 3 e 6 horas de calcinação, respectivamente. No entanto, o RGP teve um tempo de pega curto e baixa trabalhabilidade, sugerindo a necessidade de aditivos para aplicações em revestimentos, embora seja viável para componentes.

Shiyo, Nagels e Shangali (2020) investigaram a reciclagem de moldes de gesso descartados da área médica. O processo envolveu moagem, lavagem, secagem e pulverização, seguido de aquecimento para evaporar a água cristalina. O gesso reciclado demonstrou ser mais forte em resistência à compressão (2407 KN/m<sup>2</sup> para 1:1 água/gesso) do que o gesso virgem (1807 KN/m<sup>2</sup>), sem diferenças

significativas na trabalhabilidade. As conclusões apontam para a possibilidade de reciclagem contínua sob condições controladas, resultando em peças fundidas mais fortes e trabalháveis.

O estudo de Brito *et al.* (2019) focou na avaliação do gesso reciclado de peças pré-moldadas, utilizando moagem e calcinação a 150 °C por 5 horas. O RGP foi classificado como gesso fino, mas sua massa unitária foi inferior ao normativo, e a resistência à compressão não atendeu à NBR 13207. O tempo de pega o classificou como gesso para fundição, atendendo à norma. Os autores sugerem que o método de moagem ou o tipo de gesso coletado podem ter influenciado a menor resistência, e levantaram a questão da necessidade de revisão da norma brasileira.

Ayele e Balasubramanian (2017) também investigaram a reciclagem de moldes de gesso, com o objetivo de avaliar a relação entre tempo e temperatura de calcinação com o tempo de pega, absorção de água e resistência resultantes. Utilizando temperaturas de 140 °C a 150 °C e tempos de 2 a 3 horas, os autores determinaram condições ótimas que resultaram em gesso reciclado com tempo de pega de 15 minutos, absorção de água de 0,25 cm/minuto e resistência à compressão de 5,7010 MPa. A resistência à compressão geralmente aumentou com a porcentagem de gesso reciclado.

A produção de placas de forro com gesso reciclado foi avaliada por Savi (2012), que fez o processo de calcinação a 170 °C por 2 horas. O estudo demonstrou a viabilidade técnica, com placas de gesso reciclado apresentando características compatíveis ou até superiores ao gesso comercial puro em misturas. A massa unitária do gesso reciclado foi significativamente menor, o que pode ser uma vantagem em termos de leveza.

Alguns estudos antigos já investigavam a produção de gesso a partir de moldes descartados. Singh e Bose (1946) observaram que o gesso recalcinado levou mais tempo para pegar, mas apresentou maior dureza e menor expansão do que o gesso fresco, podendo ser misturado com gesso novo para moldes de fundição, resultando em maior porosidade e dureza. Já Lokuliyana, Perera e Gunawardane (1988) concluíram que a temperatura de queima mais adequada para obter gesso a partir de gesso usado é 180 °C por duas horas, resultando em propriedades físicas e químicas muito semelhantes às do gesso comercial.

Estudos mais abrangentes sobre a reciclabilidade do gesso reforçam essas descobertas. Geraldo *et al.* (2017) e Camarini e Pinheiro (2015) corroboram que o

gesso reciclado, quando reprocessado em condições controladas, possui alto potencial de reciclabilidade. Ele pode ser reintroduzido no mercado com desempenho mecânico superior ao do gesso comercial original (Geraldo *et al.*, 2017), e suas características principais são mantidas ao longo de múltiplos ciclos de reciclagem (Camarini; Pinheiro, 2015). A pesquisa de Turial *et al.* (2020), uma revisão bibliográfica, também aponta que o gesso acartonado reciclado tem propriedades promissoras, podendo ser equiparadas às do comercial com métodos de moagem eficientes e temperatura de calcinação ideal.

Adicionalmente, em uma revisão sobre métodos de reciclagem de resíduos de gesso, El-barbary, Nhabih e Salman (2023) destacam que o gesso reciclado pode apresentar desempenho similar ao gesso comercial. Isso permite sua reutilização, contribuindo significativamente para a redução do consumo de gipsita natural. Essa revisão enfatiza ainda a importância crucial do controle de temperatura e tempo de aquecimento, bem como a prevenção de contaminação, para obter um material reciclado de boa qualidade (El-barbary; Nhabih; Salman, 2023).

Em resumo, a vasta pesquisa nesse campo valida a capacidade de reprocessar o gesso descartado para que ele funcione novamente como aglomerante, produzindo moldes e componentes. As propriedades desses materiais reciclados podem variar de comparáveis a superiores às do gesso virgem, embora o controle preciso dos parâmetros de calcinação e moagem seja fundamental, e o uso de aditivos possa ser necessário para otimizar a trabalhabilidade e o tempo de pega em certas aplicações.

#### *2.3.4 Incorporação do gesso reciclado em argamassas, revestimentos e compósitos cimentícios*

Além de sua reinserção como aglomerante base, o gesso reciclado também tem sido amplamente investigado como um componente valioso em argamassas, revestimentos e compósitos cimentícios, oferecendo uma alternativa sustentável para a indústria da construção civil.

A substituição de agregados tradicionais por resíduos de gesso em argamassas de reboco foi avaliada por Catalin *et al.* (2023). O estudo demonstrou que a adição de 10% e 15% de resíduos de construção como substitutos de agregados diminuiu a densidade aparente da argamassa no estado fresco, mas

manteve-a acima de 2000 kg/m<sup>3</sup>. A consistência aumentou proporcionalmente à quantidade de resíduos, o que sugere uma melhoria na trabalhabilidade, enquanto a tendência de segregação diminuiu. Contudo, as resistências mecânicas (compressão e flexão) foram afetadas negativamente, com reduções de 11,09% e 22%, respectivamente, quando 15% de resíduo foi substituído. Apesar disso, o estudo concluiu que o uso de resíduos de gesso tem potencial para substituir até 15% dos agregados, garantindo o uso prático em argamassas de reboco (Catalin *et al.*, 2023).

A aplicação de resíduos de gesso em argamassas para assentamento de blocos cerâmicos também foi investigada por Ferreira, *et al.* (2015). Este estudo avaliou as características físicas e mecânicas de misturas contendo gesso e resíduo de cerâmica vermelha. A pesquisa alcançou seu objetivo de desenvolver uma mistura com boa trabalhabilidade para assentar blocos cerâmicos, com a mistura contendo 30% de resíduo cerâmico (GR30) apresentando os melhores resultados em resistência à compressão, dureza, permeabilidade e capilaridade. O GR30 obteve valores de resistência à compressão superiores aos mínimos exigidos pelas normas brasileiras para blocos de vedação (Ferreira, *et al.*, 2015).

Em relação aos compósitos à base de cimento para a produção de blocos não queimados, Molina *et al.* (2023) estudaram as propriedades de blocos de construção não queimados, utilizando tanto gesso comercial quanto gesso residual processado, e fosfogesso neutralizado em misturas com cimento Portland. Os autores concluíram que, para aumentar a resistência à compressão de cerâmicas não queimadas em uma mistura de cimento Portland e resíduo de gesso, a introdução de material fibroso de vários tipos, como fibras de vidro, seria benéfica (Molina *et al.*, 2023).

Além dessas aplicações específicas, Cavalcante e Miranda (2011), em sua revisão teórica sobre a gestão de resíduos de gesso, identificaram que a reciclagem do resíduo como aglomerante (após moagem e calcinação a baixa temperatura) e o uso em argamassas de gesso com resistência de aderência satisfatória são alternativas tecnicamente possíveis e economicamente viáveis na construção civil (Cavalcante; Miranda, 2011).

Em suma, a incorporação de gesso reciclado em argamassas, revestimentos e compósitos cimentícios tem se mostrado uma estratégia promissora para o setor da construção. Embora desafios como a redução de resistências em algumas proporções ou a necessidade de aditivos possam surgir, as pesquisas indicam um

vasto potencial para o desenvolvimento de materiais construtivos mais sustentáveis, reduzindo a dependência de matérias-primas virgens e o impacto do descarte de resíduos de gesso.

### 2.3.5 *Uso do gesso reciclado na agricultura (correção de solos)*

Uma das aplicações mais promissoras e ecologicamente relevantes para o gesso reciclado (GR) é na agricultura, como corretivo de solos. Essa utilização oferece uma alternativa sustentável para o descarte de resíduos da construção civil e contribui diretamente para a melhoria da produtividade agrícola e a saúde do solo.

Estudos teóricos, como o de Oliveira e Polisseni (2013), já indicavam o setor agrícola como uma das principais aplicações comprovadas para o gesso reciclado. A pesquisa de Rocha *et al.* (2018) aprofundou essa análise, revisando a literatura sobre a viabilidade do uso do gesso na agricultura sob aspectos econômicos e ambientais. Os autores concluíram que o gesso reciclado possui características semelhantes ao gesso em sua forma original e é considerado eficiente, de baixo custo e uma forma de evitar o descarte indevido no meio ambiente (Rocha *et al.*, 2018). Do ponto de vista econômico, o uso de gesso na agricultura proporciona maior possibilidade de aumento de culturas, com vantagens a longo prazo (Rocha *et al.*, 2018).

De acordo com Aragão Júnior *et al.* (2020), os resíduos de gesso (GR) apresentam características físico-químicas semelhantes às do gesso agrícola (GA), e sua aplicação demonstrou efeitos positivos no aumento da biomassa de culturas, superando o tratamento controle, sendo também eficaz na lixiviação de sais e sódio solúvel de solos salino-sódicos, agindo como fonte de cálcio para recuperação da sodicidade (Aragão Júnior *et al.*, 2020). Segundo Oliveira e Polisseni (2013), esses efeitos podem perdurar por longos períodos, entre 5 e 15 anos. Em suma, o uso de gesso reciclado na agricultura é uma alternativa de baixo custo que melhora a absorção de água e nutrientes, aumenta a produção agrícola e contribui para a sustentabilidade ambiental (Aragão Júnior *et al.*, 2020).

### 2.3.6 Gesso reciclado em materiais geopoliméricos e outros compósitos de ligantes alternativos

A busca por materiais de construção mais sustentáveis tem levado à investigação do gesso reciclado em formulações inovadoras, como os materiais geopoliméricos e outros compósitos com ligantes alternativos. Essas pesquisas buscam não só reutilizar o resíduo, mas também desenvolver produtos com propriedades aprimoradas e menor impacto ambiental.

Um estudo de Lazar *et al.* (2023) investigou o comportamento térmico do sulfato de cálcio di-hidratado durante a calcinação, visando usar o gesso desidratado na obtenção de um novo material inorgânico para a preparação de geopolímeros. Nesse trabalho, o gesso resultante da calcinação foi incorporado em materiais geopoliméricos, substituindo 5% e 10% de cinzas volantes. Os materiais obtidos demonstraram propriedades aprimoradas tanto no tempo de pega quanto na resistência à compressão (Lazar *et al.*, 2023).

Outra abordagem inovadora foi explorada por Moreno (2019), que estudaram a combinação de resíduo de gesso (RG) com resíduo de cerâmica vermelha (CV) e resíduo de poliestireno (PS) para a produção de novos compósitos. As formulações incluíram CV-PS na proporção de 50/50, CV-PS-RG na proporção 25/50/25, e RG-PS na proporção 50/50. A pesquisa revelou que o resíduo de gesso possuía um tamanho de partícula significativamente menor em comparação aos outros resíduos. As amostras com resíduo de cerâmica vermelha mostraram melhores resultados em densidade aparente, porosidade e absorção de água do que as amostras com gesso (Moreno, 2019).

Ainda dentro dos compósitos, Geraldo *et al.* (2015) investigaram a produção de tijolos de construção eco-amigáveis a partir de gesso (comercial e reciclado) e resíduos de cerâmica vermelha e porcelana, utilizando carregamento por pressão. As amostras, produzidas com baixa relação água/massa seca e prensagem uniaxial antes do tempo de pega, atingiram altas resistências à compressão (entre 12,3 e 33,9 MPa). Esses valores superam os mínimos exigidos por normas brasileiras para componentes de construção e gesso, e o gesso reciclado apresentou desempenho similar ao comercial, mesmo com menor quantidade de ligante. A compactação resultou em uma microestrutura densa e produtos adequados para aplicações como paredes internas e divisórias (Geraldo *et al.*, 2015).

Esses estudos demonstram que o gesso reciclado não se limita a aplicações tradicionais, mas pode ser um componente valioso no desenvolvimento de materiais compósitos de ligantes alternativos e geopoliméricos, contribuindo para a inovação e sustentabilidade na indústria de materiais.

### *2.3.7 Incorporação do gesso reciclado em produtos cerâmicos (adoquins, ladrilhos, blocos, massa cerâmica queimada)*

A integração do resíduo de gesso em massas cerâmicas para a produção de produtos queimados é uma área de pesquisa fundamental para a sustentabilidade da indústria cerâmica. Diferentes estudos investigam o potencial do gesso reciclado como aditivo ou substituto parcial de matérias-primas tradicionais, avaliando seu impacto nas propriedades físicas e mecânicas dos produtos finais.

Uma revisão bibliográfica realizada por Almeida, Soares e Matos (2020) já destacava os efeitos da utilização de resíduos, como gesso e granito, na indústria de cerâmica vermelha. O estudo apontou que a incorporação de até 20% de resíduos de gesso na produção de blocos de cerâmica se mostrou um substituto viável para a argila, mantendo as propriedades do produto dentro de limites aceitáveis. Além disso, a adição de 5% de resíduos, com queima a 950 °C, obteve os melhores resultados, indicando um impacto positivo em aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais (Almeida; Soares; Matos, 2020).

A pesquisa de Soken (2015) focou na incorporação de resíduo de gesso descartado da construção civil em massa de cerâmica vermelha para aplicação estrutural. Embora amostras com 1% e 2% de gesso apresentassem densidade aparente próxima à da amostra padrão a 1100 °C, concentrações mais elevadas (7,5% e 10%) mostraram resultados inferiores, sugerindo um teor ótimo de adição. De forma similar, Cipriano, Rezende e Ferraza (2019) avaliaram a incorporação de resíduo de gesso da indústria de placas a resíduos de argila para produzir cerâmica vermelha. Os resultados indicaram que a adição de gesso aumentou a porosidade, absorção de água e perda ao fogo, e reduziu a massa específica aparente dos corpos de prova sinterizados. No entanto, os melhores resultados foram obtidos com 5% de resíduo de gesso em massa cerâmica sinterizada a 800 °C, apresentando propriedades com diferença não significativa à argila pura (Cipriano; Rezende; Ferraza, 2019).

A viabilidade de incorporar resíduos de gesso em formulações para adoquim cerâmico foi investigada por Almeida *et al.* (2020), visando à redução do uso de matérias-primas naturais e ao desenvolvimento de produtos sustentáveis. Identificou-se que a formulação com 5% de resíduo de gesso apresentou características adequadas, com melhores propriedades tecnológicas nas amostras queimadas a 1100 °C. O produto final demonstrou potencial para uso em áreas externas de tráfego leve e como revestimento, sem alterar a estética ou coloração do adoquim, e ainda diminuiu a condutividade térmica, o que é benéfico para isolamento térmico (Almeida *et al.*, 2020). A incorporação de 5% de gesso e granito em adoquim cerâmico também mostrou os melhores resultados em comparação com proporções maiores, validando a viabilidade do uso desses resíduos em pavimentos, sem alterar as características de extrusão (Almeida, 2019).

Outras pesquisas exploraram o efeito do gesso como carga na cerâmica. Nawi e Badarulzaman (2014) estudaram o impacto da adição de resíduos de gesso na cerâmica. Uma das observações feitas foi que a adição de 2% a 10% em peso de resíduo de gesso aumentou a retração e a porosidade, mas o incremento da temperatura de sinterização melhorou a densidade, indicando que o gesso pode ser usado como carga (Nawi; Badarulzaman, 2014b). Os autores também concluíram que, embora o aumento do tamanho das partículas do resíduo de gesso eleve a porosidade e diminua a resistência, a sua adição continua sendo um método eficaz para reduzir o desperdício no setor cerâmico (Nawi; Badarulzaman, 2014a).

A incorporação de resíduo de gesso em compósitos cerâmicos utilizando argila e argilito da extração de gipsita foi investigada por Cipriano, Neves e Ferraz (2019). Os melhores resultados foram obtidos com compósitos contendo argilito e 5% de resíduo de gesso sinterizados a 1050 °C, com redução na absorção de água e aumento da resistência à flexão.

Por fim, Palhares *et al.* (2025) utilizaram lama de gesso (um resíduo da produção de Zinco) como substituto parcial na produção de ladrilhos cerâmicos. A adição de até 15% de lama de gesso manteve propriedades mecânicas e físicas aceitáveis. Maiores teores comprometeram a resistência estrutural devido ao aumento da porosidade e absorção de água, e a decomposição térmica do sulfato de cálcio liberou  $SO_2$  em temperaturas elevadas (acima de 1000 °C na mistura). No entanto, o estudo comprovou que a incorporação da lama de gesso na formulação

cerâmica é tecnicamente viável para ladrilhos de parede ou de baixo tráfego, com boa resistência a manchas e produtos químicos (Palhares *et al.*, 2025).

Em síntese, a pesquisa demonstra o vasto potencial do gesso reciclado como aditivo ou componente em produtos cerâmicos queimados. Embora os teores ideais variem entre os estudos e os produtos (frequentemente em torno de 5% a 20%), a sua incorporação contribui para a sustentabilidade, o desenvolvimento de materiais com propriedades específicas e a redução do descarte de resíduos.

### *2.3.8 Uso do gesso reciclado em esmaltes cerâmicos*

A aplicação de resíduos de gesso em formulações de esmaltes cerâmicos representa uma fronteira promissora para a valorização desse material, transformando um subproduto em um insumo com potencial para influenciar cor, textura e outras propriedades superficiais de peças cerâmicas. Embora a química dos esmaltes seja complexa, a pesquisa nessa área busca integrar a sustentabilidade com a estética e funcionalidade.

Um estudo investigou as mudanças na cor ou textura de um esmalte cerâmico pela adição de substâncias inorgânicas comuns, incluindo o gesso acartonado (drywall) (Balsiger, 1968). Os experimentos envolveram a adição de 10% do aditivo a esmaltes básicos de grés (transparente, fosco e semi-fosco) queimados em oxidação em cone seis. Os resultados foram variados, mas notou-se que a adição do gesso acartonado fez com que um esmalte opaco adquirisse um tom branco iridescente, enquanto um esmalte transparente se tornou branco translúcido (Balsiger, 1968). Isso demonstra o potencial do gesso em influenciar a aparência final do esmalte.

Pesquisas mais aprofundadas focaram na utilização de gesso vermelho (um subproduto da extração de dióxido de titânio) como componente em esmaltes. Zakaria, Kamarudin e Shamsuddin (2015) investigaram o potencial do gesso vermelho e da cinza volante como componentes de esmaltes em ladrilhos cerâmicos, visando produtos comercialmente viáveis. Uma formulação de esmalte padrão à base de óxido de zinco foi modificada, originando três variações de esmaltes: com gesso vermelho substituindo o carbonato de cálcio, com adição de cinza volante, e com uma combinação de ambos. As amostras foram queimadas a 1200 °C. Visualmente, a formulação de esmalte com 25,35% de gesso vermelho apresentou a

melhor aparência física (brilhante, marrom intenso e homogênea), enquanto a combinação de gesso vermelho e cinza volante produziu um esmalte marrom escuro, semi-brilhante, liso e homogêneo (Zakaria; Kamarudin; Shamsuddin, 2015).

Com uma abordagem similar, Kamarudin e Zakaria (2007) investigaram o uso do resíduo de gesso vermelho na produção de esmaltes cerâmicos, focando nas propriedades resultantes. Eles formularam 35 esmaltes com até 36% de gesso vermelho (que substituiu o  $\text{CaCO}_3$  da formulação básica) e os queimaram a  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ . Os esmaltes resultantes variaram de fosco a brilhante e de tons claros a escuros de marrom, com ou sem defeitos. Após inspeção visual, 5 formulações (com 27-36% de gesso vermelho) foram selecionadas para testes de dureza superficial, resistência química, e comportamento de *crazing*<sup>2</sup> (teste de tinta antes e depois do tratamento em autoclave a  $180\text{ }^\circ\text{C}$  e 5 bars por 2 horas). A dureza Mohs de 3.5 foi comum nas amostras testadas, indicando uma superfície macia, atribuída ao baixo teor de refratários e alto teor de fundentes (Kamarudin; Zakaria, 2007). No teste de *crazing*, embora nenhuma amostra apresentasse trincas antes do tratamento em autoclave, apenas um esmalte não permaneceu sem trincas após o tratamento, indicando uma correspondência na expansão térmica com o substrato. Em termos de resistência química, os esmaltes foram mais estáveis em meio ácido do que em meio básico. Imagens de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) confirmaram uma boa interação e ligação entre o esmalte e o corpo cerâmico. O estudo concluiu que o gesso vermelho tem potencial para ser usado na preparação de esmaltes comerciais, especialmente para ladrilhos de parede ou louças de mesa que não são submetidos a alta pressão, com teor de até 36% de peso seco (Kamarudin; Zakaria, 2007).

Em resumo, a utilização de gesso reciclado em esmaltes cerâmicos apresenta um caminho promissor para o desenvolvimento de produtos sustentáveis com novas características estéticas e funcionais. As pesquisas demonstram que, dependendo da composição do resíduo (como gesso acartonado ou gesso vermelho) e das condições de queima, é possível obter efeitos variados de cor, iridescência e textura, além de manter propriedades mecânicas e químicas satisfatórias para certas aplicações.

---

<sup>2</sup> *Crazing* (também conhecido como craquelamento) refere-se à formação de uma rede de pequenas fissuras ou rachaduras finas na superfície da peça esmaltada após a queima.

### **3 MÉTODOS**

Este capítulo detalha os métodos e ferramentas que guiaram este trabalho. Ele apresenta as abordagens de pesquisa, os materiais, equipamentos e os procedimentos experimentais e avaliativos utilizados para o reaproveitamento de resíduos de gesso no processo produtivo cerâmico.

#### **3.1 Tipo de Pesquisa**

A pesquisa desenvolvida caracteriza-se como aplicada, pois seu principal objetivo é resolver um problema prático específico (o descarte do resíduo de gesso) por meio do desenvolvimento de um processo de reincorporação desse material em novas aplicações no contexto cerâmico. De natureza experimental, o trabalho envolveu a manipulação de variáveis e a realização de testes práticos para observar e analisar os efeitos resultantes. Adicionalmente, é de caráter quali-quantitativa, combinando a obtenção e análise de dados mensuráveis (como propriedades físicas e mecânicas dos materiais) com a avaliação de aspectos não-mensuráveis, como a viabilidade estética e a qualidade visual da peça final. Quanto ao objetivo de conhecimento, a pesquisa é exploratória, buscando investigar o que pode ou não funcionar com o resíduo de gesso em diferentes aplicações e aprofundar o conhecimento sobre suas potencialidades de reuso.

#### **3.2 O Método de Projeto (MD3E adaptado)**

Para guiar o processo de desenvolvimento e experimentação deste trabalho, foi adotado o MD3E – Método de Desdobramento em 3 Etapas, proposto por Santos (2005) como um método aberto de projeto para o ensino de Design Industrial. O MD3E distingue-se por sua flexibilidade e não-linearidade, características que o tornam particularmente adequado para projetos que demandam exploração e adaptação constante, como o desenvolvimento de materiais e processos a partir de resíduos. Diferentemente de modelos fechados e pré-determinados, o MD3E permite que o projetista defina os caminhos e a sequência das atividades conforme as necessidades específicas de cada projeto (Santos, 2005).

A estrutura do MD3E se organiza a partir da definição de um problema de

projeto, e se desdobra em três etapas básicas (Pré-concepção, Concepção e Pós-concepção), das quais faz-se então um conjunto de desdobramentos mínimos para cada uma, de acordo com as necessidades do projeto. A Figura 3 ilustra a estrutura do MD3E com sugestões de desdobramentos mínimos.

Figura 3 – Estrutura do MD3E com sugestões de desdobramentos mínimos



Fonte: Adaptado de Santos (2005).

As etapas básicas são explicadas a seguir:

- **Pré-Concepção:** Nesta etapa, o foco é a compreensão do problema e o planejamento do projeto. Envolve atividades como a análise do problema, a definição da necessidade humana a ser atendida e o planejamento inicial do projeto (Santos, 2005). No contexto deste trabalho, essa fase compreendeu o aprofundamento na problemática do resíduo de gesso e a revisão bibliográfica das práticas e pesquisas existentes, além da definição dos requisitos para os materiais a serem desenvolvidos e a peça demonstrativa.
- **Concepção:** Dedicada à geração e seleção das possibilidades de solução. Inclui a definição dos caminhos criativos, a geração de alternativas e a seleção e adequação da melhor alternativa (Santos, 2005). Esta etapa é central para a experimentação com os resíduos de gesso.

- Pós-Concepção: Foca no detalhamento da solução, definição dos processos produtivos e aspectos mercadológicos (Santos, 2005). Para este TCC, envolveu o detalhamento da produção da peça demonstrativa, a análise final dos materiais e a discussão da viabilidade da reinserção do gesso.

A adaptabilidade inerente ao MD3E é um de seus maiores diferenciais. Essa característica permite moldar seus desdobramentos conforme a proposta do trabalho e integrar ferramentas de outros métodos, garantindo aos projetos a ênfase que for mais adequada para cada contexto (Santos, 2005). Dessa forma, para potencializar a natureza experimental e iterativa deste estudo, foram incorporadas as etapas de Prototipar e Testar, popularizadas pelo Design Thinking. A deliberada inclusão dessas fases promove um ciclo contínuo de fazer, avaliar e refinar que, principalmente dentro da etapa de Concepção do MD3E, otimiza a exploração das diferentes aplicações do gesso reciclado.

No decorrer dos ensaios e testes, a própria adaptabilidade do MD3E foi essencial para a condução da pesquisa, permitindo modificações metodológicas em resposta aos resultados preliminares. Constatou-se, por exemplo, que o tempo de início de pega padronizado pela NBR 12128 não traduz a trabalhabilidade do gesso reciclado, exigindo a descontinuação desse critério e a determinação de novos critérios de avaliação e aceitação. Similarmente, a limitação dos equipamentos disponíveis no laboratório impôs adaptações às normas técnicas (como a substituição do vácuo pela fervura na NBR ISO 10545-3). Tais modificações, baseadas na experiência prática e nos achados parciais, foram cruciais para trazer os ensaios de caracterização para a realidade prática do laboratório. Embora houvesse uma diminuição do rigor metrológico (que ditam os equipamentos a serem utilizados e a precisão requerida de aparelhos de medição, por exemplo — o que é essencial em um contexto industrial), o rigor metodológico foi garantido, mantendo a coerência e a validade da análise para o contexto do design de processos em um ateliê.

### 3.3 Procedimentos experimentais

Incorporando as fases de Prototipar e Testar, conforme o MD3E híbrido, a etapa de experimentação englobou a preparação do Gesso Reciclado (GR), sua mistura em diferentes proporções com Gesso Comercial (GC), a caracterização das suas propriedades, sua incorporação na formulação de diferentes massas cerâmicas e esmaltes, e a prototipagem de uma placa fucional para reciclagem de argila. O plano experimental desenvolvido na pesquisa envolveu ensaios físicos e mecânicos apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Relação de ensaios realizados durante o desenvolvimento da pesquisa

Caracterização	Ensaio	Método	Amostras	
			Tipo	Quantidade
Física do pó	Granulometria	ABNT NBR 12127	GC e GR	2 amostras
Física da pasta	Consistência	NBR NM 67	GC, GR e misturas	50 amostras
	Tempo de fim de pega	ABNT NBR 12128	GC, GR e misturas	6 amostras
Mecânica	Dureza	ABNT NBR 12129	GC, GR e misturas	108 corpos de prova
	Resistência à compressão	ABNT NBR 12129	GC, GR e misturas	108 corpos de prova
Absorção	Absorção de água	ABNT NBR ISO 10545-3	GC e misturas	6 corpos de prova

Fonte: Adaptado de Damasceno (2013).

Para o Gesso Comercial (GC) utilizado neste estudo como referência e para as misturas com o Gesso Reciclado (GR), foram empregadas diversas amostras disponíveis no laboratório, bem como uma nova aquisição:

- GCPA (Gesso Comercial - Pacote Aberto): Uma embalagem de gesso de 40 kg que já estava aberta e em uso no laboratório, com uma quantidade restante inferior a um quarto do pacote.

- GCPF (Gesso Comercial - Pacote Fechado): Dois pacotes fechados de 40 kg da mesma marca do GCPA.
- GC-N (Gesso Comercial - Novo): Gesso da marca Nacional, adquirido em pacotes de 1 kg.
- GCPF+N (Gesso Comercial - Mistura): Uma mistura preparada com 85% do GCPF e 15% do GC-N, desenvolvida para replicar a trabalhabilidade de uma das amostras (detalhes na Seção 3.3.3).

### 3.3.1 Preparação e Beneficiamento do Gesso Reciclado (GR)

Os procedimentos para a obtenção do Gesso Reciclado (GR) foram adaptados para o contexto do ateliê. Cerca de 30 kg de resíduo de gesso, predominantemente moldes descartados (Fig. 4), foram coletados e submetidos à limpeza superficial com esponja úmida para a remoção de resíduos de argila. Embora essa limpeza manual não tenha garantido a eliminação total das impurezas, reconhece-se que a presença de contaminantes residuais é uma variável inerente ao processo de reaproveitamento artesanal que será analisada na discussão dos resultados.

Figura 4 – Moldes de gesso descartados do Laboratório de Modelagem II – Cerâmica do IFSC



Fonte: Autoria própria.

A trituração e moagem do material foi realizada em duas etapas: inicialmente, os moldes foram quebrados em pedaços grosseiros com martelo. Em seguida, um volume de 4 kg foi processado em almofariz para a moagem fina, e o volume restante foi triturado no Laboratório de Materiais do IFSC, do Departamento Acadêmico da Construção Civil do IFSC, com o auxílio de um misturador intensivo da marca Simpson (Fig. 5). O pó resultante foi peneirado em uma peneira de 2 mm de abertura, definindo o tamanho máximo de partícula do GR de ateliê.

Figura 5 – Misturador intensivo Simpson



Fonte: Autoria própria.

O GR triturado foi submetido à secagem prévia no Laboratório de Modelagem II – Cerâmica do IFSC, no forno da marca Jung, modelo 45013 (Fig. 6), em uma temperatura entre 40 °C e 60 °C por 24 horas, para remover a água livre. A calcinação foi realizada em seis lotes de 3 kg de pó pré-seco, dispostos em camada de 1 cm em formas de alumínio e inox (Fig. 6). Os parâmetros definidos foram temperaturas de 150 °C e 200 °C combinadas com tempos de permanência de 2 h, 4 h e 8 h. A perda de massa de cada lote foi registrada após a calcinação para validação do processo de conversão em hemi-hidrato.

Figura 6 – Forno Jung (esq.) e gesso disposto em formas para a calcinação (dir.)



Fonte: Autoria própria.

### 3.3.2 Caracterização do pó

A caracterização granulométrica do pó foi planejada inicialmente com o objetivo de separar o Gesso Reciclado (GR) em uma granulometria similar à do Gesso Comercial (GC). Essa abordagem visava permitir uma comparação direta e mais controlada entre os materiais em ensaios posteriores, isolando ao máximo o efeito do material da variável granulométrica. Para tanto, foram conduzidos ensaios de granulometria tanto para o Gesso Comercial (GC), adotado como material de referência para essa comparação, quanto para o Gesso Reciclado (GR).

Os ensaios para a classificação das partículas por tamanho seguiram os princípios da ABNT NBR 12127 (Gesso para Construção Civil – Determinação das propriedades físicas do pó) (ABNT, 2017). Utilizou-se uma série de peneiras de tela de tecido metálico, padronizadas, com as seguintes aberturas: 0,840 mm; 0,425 mm; 0,210 e 0,125 mm (Fig. 7). As peneiras de abertura 0,425 mm e 0,125 mm foram usadas em substituição às peneiras de abertura 0,420 mm e 0,105 mm listadas na norma, devido à indisponibilidade destas.

Figura 7 – Peneiras granulométricas



Fonte: Autoria própria.

A análise granulométrica completa, que envolveu a passagem do pó por todas as peneiras da série, foi realizada exclusivamente para o Gesso Comercial (GC). Os resultados deste ensaio (apresentados detalhadamente na Seção 4.1) indicaram que o GC de referência possuía uma elevada finura, com mais de 90% do pó passante pela peneira de 0,125 mm.

No que se refere ao Gesso Reciclado (GR), uma tentativa inicial de beneficiamento para atingir uma finura comparável à do GC foi descontinuada. Esta decisão foi tomada pela constatação da inviabilidade prática de peneiramento em escala de ateliê para malhas tão finas, o que acarretaria em perdas excessivas de material e tempo. Dessa forma, para o GR, a granulometria máxima de 2 mm (obtida por um processo de peneiramento inicial) foi mantida e estabelecida como a variável de design e processo para os ensaios posteriores.

### 3.3.3 Caracterização da pasta

A etapa de caracterização da pasta de gesso foi crucial para estabelecer as proporções ideais de água/gesso ( $a/g$ ) e as proporções de mistura entre o Gesso Reciclado (GR) e o Gesso Comercial (GC) que garantissem a trabalhabilidade necessária para os processos de moldagem.

Inicialmente, foram realizados ensaios exploratórios baseados na norma ABNT NBR 12128 (Gesso para Construção Civil – Determinação das propriedades físicas da pasta) (ABNT, 1991a). Contudo, o ensaio para determinação da

consistência normal (que determina a relação água/gesso para uma fluidez da pasta adequada à manipulação), amplamente referenciada para o GC, foi deliberadamente omitida. Esta decisão se baseou na observação da literatura de referência, que indicava que o valor de razão a/g obtido por essa norma poderia resultar em uma pasta inadequada para a manipulação e moldagem em escala prática. Testes preliminares com o GR puro (GR100) utilizando razões a/g mais elevadas (entre 0,9 e 1,0) revelaram uma discrepância crítica: a pasta apresentava-se excessivamente viscosa para um fluxo adequado, mas, paradoxalmente, exibia um tempo de início de pega prolongado (o tempo decorrido entre o contato do gesso com a água e o início do processo de endurecimento do material), inviabilizando uma moldagem eficiente.

Diante dessa constatação e da discrepância entre fluidez e tempo de início de pega para o GR, o tempo de início de pega foi descartado como um critério confiável de trabalhabilidade para a pasta de gesso reciclado. A partir de então, a metodologia concentrou-se no teste *mini-slump* adaptado (baseado na NBR NM 67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone) (ABNT, 1998) para avaliar a fluidez das pastas de GR puro e das misturas de GR e GC. O objetivo era verificar se a fluidez alcançada com as razões a/g adaptadas era compatível com a do GC puro, utilizado como referência de fluidez.

O teste *mini-slump* foi conduzido utilizando um tronco de cone plástico (obtido a partir da adaptação de um copinho medidor de xarope de 50 ml com o fundo cortado) posicionado sobre uma placa de vidro nivelada. Uma folha milimetrada foi disposta sob a placa para facilitar a medição do espalhamento da pasta, definida como a média entre os dois diâmetros, horizontal e vertical.

Para a realização do ensaio, a quantidade de gesso foi fixada em 60 g, variando-se a quantidade de água conforme a razão a/g desejada. O procedimento de mistura e aplicação seguiu os seguintes passos: o gesso foi polvilhado sobre a água ao longo de 30 segundos; a mistura foi então deixada em repouso por 2 minutos (período de saturação); após esse repouso, a pasta foi misturada por 30 segundos. Em seguida, a pasta foi vazada no molde (tronco de cone) e deixada em repouso até completar 1 minuto a partir do início do vazamento. Finalmente, o molde foi retirado e aguardou-se mais 1 minuto antes de realizar a medição final do espalhamento. A Figura 8 ilustra o espalhamento de duas amostras.

Figura 8 – Espalhamento de amostras no teste de *mini-slump*

Fonte: Autoria própria.

Para o Gesso Comercial puro, a razão a/g de 0,70 foi adotada, por ser um valor amplamente reconhecido e utilizado por ceramistas para moldagem. O GCPA (Gesso Comercial - Pacote Aberto, conforme detalhado na Seção 3.3) foi inicialmente empregado para esta referência, estabelecendo um espalhamento de 90,5 mm no teste *mini-slump* como a referência de fluidez para a análise comparativa. Contudo, durante a fase de moldagem dos corpos de prova (que será explicada na Seção 3.3.4), verificou-se que a quantidade remanescente de GCPA seria insuficiente. Esta contingência levou a uma avaliação das demais amostras de Gesso Comercial disponíveis no laboratório: o GCPF (pacotes fechados da mesma marca do GCPA) e o GC-N (gesso novo, marca Nacional). Ensaios de *mini-slump* revelaram que o GCPF apresentava menor fluidez e tempo de pega reduzido em comparação ao GCPA, enquanto o GC-N mostrava-se mais fluido e com maior espalhamento. Para assegurar a continuidade do projeto com uma referência de trabalhabilidade consistente, uma nova mistura foi formulada: GCPF+N (85% GCPF e 15% GC-N). Testes *mini-slump* confirmaram que esta mistura replicava o comportamento e a fluidez do GCPA, sendo então adotada como o Gesso Comercial de referência para a preparação das misturas com GR e moldagem dos corpos de prova subsequentes.

As misturas de GR e GC foram estabelecidas em proporções de 20%, 40%, 60% e 80% de GR (GR20, GR40, GR60, GR80, respectivamente), complementadas com GC. Para essas misturas, foi definida uma progressão linear controlada de água, com um incremento fixo de 10% de água em relação à referência do GC por cada 20% de GR adicionado. Isso resultou nas seguintes razões a/g: 0,77 para

GR20; 0,84 para GR40; 0,91 para GR60; e 0,98 para GR80.

É importante salientar que cada uma dessas misturas (GR20, GR40, GR60, GR80), bem como o GR100, foi preparada para cada um dos seis lotes distintos de Gesso Reciclado (GR) – correspondendo aos GRs calcinados a 150 °C e 200 °C por períodos de 2, 4 ou 8 horas (Tabela 1). Além dos testes de fluidez conforme as razões a/g predefinidas, foram realizados ensaios adicionais de *mini-slump* para comparação direta: o GR20 foi testado com a razão a/g de 0,70 (a mesma do GC puro), e o GR80 foi testado com a razão a/g de 1,05 (a mesma do GR puro). Esses ensaios adicionais permitiram uma avaliação comparativa mais precisa do efeito da substituição parcial do GC por GR e do GR por GC, respectivamente.

Tabela 1 – Proporções e quantidades de GR, GC e água para as misturas estudadas

<b>Razão a/g</b>	0,70*	0,77	0,84	0,91	0,98	1,05*
<b>Proporção de GR</b>	0,2*	0,2	0,4	0,6	0,8	0,8*
<b>Massa de GR</b>	12 g	12 g	24 g	36 g	48 g	48 g
<b>Massa de GC</b>	48 g	48 g	36 g	24 g	12 g	12 g
<b>Massa de água</b>	42 g	46,2 g	50,4 g	54,6 g	58,8 g	63 g

Fonte: Autoria própria.

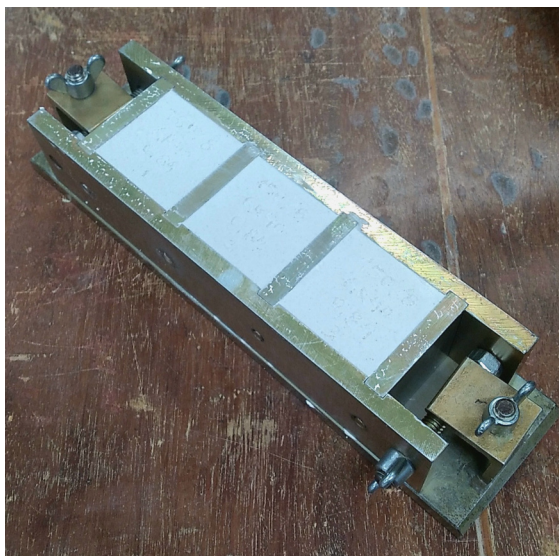
Diante dos desafios de tempo de pega e fluidez, o critério de aceitação de trabalhabilidade para a moldagem foi adaptado para o Critério de Trabalhabilidade Prática (CTP), baseado em dois fatores cruciais:

1. Fluidez de Vazamento (Qualitativo): A pasta deve apresentar um fluxo contínuo e homogêneo ao ser vertida no molde ou no Mini-Slump, sendo este o principal fator de aceitação para a aplicabilidade em moldes.
2. Produtividade: O Tempo de Fim de Pega (determinado conforme NBR 12128) (ABNT, 1991a) deve ser inferior a 45 minutos, garantindo a viabilidade produtiva do processo de moldagem em escala de ateliê.

### 3.3.4 Determinação das propriedades mecânicas

A avaliação das propriedades mecânicas foi uma etapa fundamental para quantificar o desempenho dos compósitos desenvolvidos e para compreender o impacto da incorporação do Gesso Reciclado (GR) nas características estruturais do material. Foram realizados ensaios de dureza superficial e de resistência à compressão conforme a norma ABNT NBR 12129 (Gesso para Construção Civil – Determinação das propriedades mecânicas) (ABNT, 1991b), utilizando os corpos de prova confeccionados em moldes metálicos (Fig. 9) a partir das pastas de gesso e suas misturas nas razões a/g definidas na Seção 3.3.3.

Figura 9 – Molde metálico para confecção de corpos de prova de gesso



Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova para os ensaios mecânicos foram moldados a partir do Gesso Comercial (GC), do GR puro (GR100) e das misturas de GR e GC. Para cada uma das misturas e para cada um dos seis lotes de GR calcinados (150 °C e 200 °C por 2, 4 ou 8 horas), foram preparados 3 corpos de prova cúbicos de 50 mm de lado, totalizando 108 corpos de prova.

As amostras de mistura do GR incluíram: GR20\* (razão a/g de 0,70, mesma do GC puro), GR20, GR40, GR80\* (razão a/g de 1,05, mesma do GR100) e GR100. É importante notar que, devido à quantidade limitada de Gesso Reciclado disponível (3 kg por lote, resultado da otimização do processo de calcinação em ateliê, que permitiu apenas 3 andares de prateleiras e uma altura máxima de pó de 1 cm por

bandeja para garantir a calcinação uniforme), optou-se por não moldar corpos de prova para as misturas GR60 e GR80.

Faz-se necessário destacar a origem do Gesso Comercial (GC) utilizado:

- As primeiras amostras de misturas (GR20\*, GR20, GR40) e os CPs de GC puro (GCPA) foram moldadas utilizando o GCPA (Gesso Comercial - Pacote Aberto).
- Após a insuficiência do GCPA, as amostras restantes de misturas (GR40, GR80\*, GR100) e os CPs de GC puro foram moldadas utilizando a mistura GCPF+N (85% GCPF e 15% GC-N), cuja trabalhabilidade foi ajustada para replicar a do GCPA, conforme detalhado na Seção 3.3.3.

Os corpos de prova foram desmoldados após o tempo de pega final (tempo decorrido desde o contato do pó de gesso com a água até o fim do processo de endurecimento) e submetidos a um processo de secagem controlada no forno do laboratório a 45 °C até atingirem massa constante (para este trabalho, considerou-se a massa constante quando, após duas pesagens subsequentes num intervalo de 2 horas, o peso final não alterou em mais do que 1%). Após a secagem, foram armazenados em um dessecador improvisado (Fig. 10), composto por um container plástico de 29 L com uma base elevada de policarbonato e 2 kg de sílica gel, selado com plástico e fita adesiva para evitar a reabsorção de umidade até o momento dos ensaios.

Figura 10 – Corpos de prova antes da secagem ao forno (esq.) e acondicionados no dessecador improvisado após a secagem ao forno (dir.)



Fonte: Autoria própria.

Os ensaios de dureza foram feitos na Máquina Universal de Ensaio EMIC (Fig. 11), com capacidade de carga de até 300 kN, disponível no Laboratório de Materiais do Departamento Acadêmico da Construção Civil do IFSC, e cada corpo de prova teve sua dureza superficial medida em 3 faces distintas. A norma preconiza o cálculo da dureza a partir da profundidade de impressão de uma esfera de aço duro de  $10,0 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$  de diâmetro, sob uma carga inicial de 50 N elevada a 500 N em 2 segundos, mantida por 15 segundos. Contudo, devido às limitações do equipamento em registrar precisamente a rampa de carregamento rápida de 50 N para 500 N em 2 segundos, foi utilizado um script de ensaio adaptado. Este script, desenvolvido para o mesmo propósito em um trabalho anterior conduzido no laboratório, permitiu a execução do ensaio de dureza com a máquina disponível, embora com uma modificação nos parâmetros de aplicação da carga em relação à norma. A equação 1 descreve a fórmula para determinação da dureza.

$$D = \frac{F}{\pi \times \phi \times t} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:  $D$  = Dureza, em  $\text{N/mm}^2$ ;

$F$  = carga, em N;

$\phi$  = diâmetro da esfera, em mm;

$t$  = média da profundidade, em mm.

Para os ensaios de compressão (Fig 11), os CPs foram submetidos a uma carga crescente e axial até a sua ruptura, e os valores de carga máxima foram registrados para o cálculo da resistência à compressão, de acordo com a equação 2.

$$R = \frac{P}{S} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:  $R$  = Resistência à compressão, em MPa;

$P$  = carga que produziu a ruptura do corpo de prova, em N;

$S$  = área de seção transversal de aplicação da carga, em  $\text{mm}^2$ .

Figura 11 – Máquina universal de ensaio (esq.) e teste de resistência à compressão (dir.)



Fonte: Autoria própria.

### 3.3.5 Incorporação do GR em Massas Cerâmicas

A incorporação do Gesso Reciclado (GR) em massas cerâmicas visa avaliar a influência do resíduo em propriedades como retração antes e após a queima, e estética geral da cerâmica já queimada, como coloração e presença ou não de defeitos. Nesta etapa, o GR foi adicionado a uma massa cerâmica formulada a partir de argilas recicladas do laboratório, juntamente com celulose e chamote.

Os insumos utilizados para a preparação das massas cerâmicas foram obtidos e beneficiados da seguinte forma:

- Argila Reciclada (AR): Utilizada como massa cerâmica base, a AR foi composta por uma mistura de argila vermelha (70%) e outras argilas diversas de alta temperatura (30%), ambas recicladas e disponíveis no laboratório (Fig. 12). As argilas secas foram inicialmente quebradas com martelo (separadamente) e, em seguida, moídas na mesma máquina utilizada para o beneficiamento do gesso (Fig. 12). O pó resultante de cada argila foi peneirado através de uma peneira de 2 mm. Após o peneiramento, os pós das duas argilas foram misturados na proporção de 70/30 para compor a AR.

- Chamote: Produzido a partir de peças cerâmicas biscuitadas<sup>3</sup> descartadas do laboratório. Essas peças passaram pelo mesmo processo de moagem das argilas. Para obter diferentes granulometrias, o pó resultante foi peneirado e separado por tamanho utilizando um conjunto de peneiras granulométricas, resultando nas seguintes frações: grão menor que 0,425 mm; grão entre 0,425 mm e 0,840 mm; grão entre 0,840 mm e 1 mm; e grão entre 1 mm e 2 mm.
- Celulose: A celulose foi preparada a partir de papel higiênico, batido com água em um liquidificador até formar uma polpa. Esta mistura foi então coada em uma tela com moldura de madeira (tipo tela de serigrafia ou para fabricação de papel reciclado, vide Figura 13) e espremida manualmente para remover o máximo de água possível. A massa de celulose utilizada nas formulações consistiu nesta polpa espremida, mas ainda úmida. Para incorporação nas formulações, a quantidade necessária de celulose foi novamente batida com água antes da adição dos ingredientes secos.
- Gesso Reciclado (GR): O Gesso Reciclado empregado nestas formulações cerâmicas difere do GR utilizado nas seções anteriores de caracterização do gesso puro e suas misturas. Para esta etapa, utilizou-se um GR obtido por calcinação a 900 °C, em um processo concomitante à queima de biscoito do laboratório. A granulometria utilizada para este GR foi a mesma das demais seções, ou seja, menor do que 2 mm.

Figura 12 – Argilas disponíveis para reciclagem (esq.) e sua moagem (dir.)



Fonte: Autoria própria.

<sup>3</sup> A chamada queima de biscoito é a primeira queima que transforma a argila em cerâmica, geralmente feita numa temperatura entre 700 e 1000 °C. Uma peça dita biscuitada é aquela que já passou pela queima de biscoito.

Figura 13 – Coagem da polpa de celulose



Fonte: Autoria própria.

As formulações desenvolvidas para a incorporação do GR estão detalhadas na Tabela 2, que especifica as proporções de argila base, celulose, chamote e GR. Para os cálculos das quantidades de cada insumo, optou-se por tomar como base 200 g de Argila Reciclada (AR), sendo as porcentagens dos demais insumos consideradas como um adicional em relação a este valor base. Para cada formulação, foram preparados 3 corpos de prova, totalizando 60 corpos de prova para esta etapa experimental. Todas as formulações foram preparadas de modo que os ingredientes secos (em pó) fossem polvilhados sobre a água enquanto se misturava constantemente com uma colher, garantindo uma hidratação e homogeneização adequadas da pasta. Cada uma das massas foi então colocada em um bloco de gesso para secar (Fig. 14) até atingirem uma umidade adequada para que fossem sovadas.

Tabela 2 – Formulações das argilas a serem testadas

<b>Categoria</b>	<b>Código</b>	<b>Descrição</b>	<b>Fibra (F) (%) [celulose]</b>	<b>Chamote (CH) (%) [fino]</b>	<b>Gesso Reciclado (GR) (%)</b>
Controle	P0	Controle (AR Pura)	0	0	0
Efeito Isolado	P1	Celulose Padrão	5	0	0
	P2	Celulose Alta	20	0	0
	P3	Chamote Padrão	0	10	0
	P4	Chamote Alto	0	20	0
	P5	Gesso Padrão	0	0	5
	P6	Gesso Alto	0	0	10
Paper Clay	P7	Paper Clay Clássico	5	10	0
	P8	Paper Clay + GR	5	0	5
	P9	Paper Clay Clássico + GR	5	10	5
	P10	Paper Clay Máx.	20	20	10
AR com Agregados Rígidos	P11	Chamote + GR	0	10	5
	P12	Chamote Alto + GR alto	0	20	10
Placa Funcional	P13	Celulose Alta + Chamote Alto	20	20*	0

\*Para esta formulação, usou-se o chamote extra-grosso

Fonte: Autoria própria.

Figura 14 – Argilas formuladas secando em bloco de gesso



Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova foram moldados a partir das massas cerâmicas formuladas utilizando a técnica de placa. Neste método, um bloco de argila homogênea foi "aberto" com o auxílio de um rolo de madeira, tendo sua espessura controlada por duas régua de madeira de 9 mm dispostas paralelamente como guias. Os corpos de prova foram então cortados da placa resultante com uma faca, nas dimensões aproximadas de 12 cm × 2,5 cm. Após o corte, foi realizada a marcação com régua, estabelecendo uma escala de 0 a 10 cm em intervalos de 1 cm em cada corpo de prova. Esta marcação serviu como referência para a avaliação da retração linear em diferentes estágios do processo.

Após a marcação, os corpos de prova foram dispostos sobre tábuas de madeira compensada forradas com jornal e deixados para secar ao ar livre até atingirem o ponto de osso<sup>4</sup> (Fig. 15). Juntamente com os corpos de prova para os testes de retração linear, foram modelados também 48 placas de teste (PT) que serviram para os testes de esmalte descritos na seção 3.3.7. Nessas placas, foram feitos vários furos finos com auxílio de uma ponta metálica, para acelerar seu processo de secagem.

Figura 15 – Corpos de prova secando (esq.) e em ponto de osso (dir.)



Fonte: Autoria própria.

Em seguida, os corpos de prova foram submetidos à queima de biscoito, realizada no forno elétrico a uma temperatura de 900 °C, seguindo um ciclo de queima padronizado. A retração linear dos corpos de prova foi avaliada em dois momentos críticos do processo, utilizando as marcações de 0 a 10 cm:

---

<sup>4</sup> Termo usado na cerâmica para designar o estágio de secagem em que a peça apresenta-se completamente seca, e já não pode mais ser deformada ao aplicar-se pressão em sua superfície.

1. Retração na Secagem: Medida após os corpos de prova atingirem o ponto de osso, em comparação com as dimensões no estado úmido.
2. Retração na Queima de Biscoito: Medida após a queima de biscoito, em comparação com as dimensões no estado seco (ponto de osso).

As medições foram realizadas com um paquímetro, e os resultados foram registrados para análise e comparação entre as diferentes formulações, permitindo avaliar a influência do GR, da celulose e do chamote na estabilidade dimensional das massas cerâmicas.

### *3.3.6 Ensaios de Absorção de Água (Massas cerâmicas e gesso)*

A capacidade de absorção de água dos corpos de prova (CPs) foi determinada tanto para os corpos de prova cerâmicos (após a queima de biscoito) quanto para os corpos de prova de gesso. O princípio do método baseou-se na ABNT NBR ISO 10545-3 (ABNT, 2020), que estabelece os ensaios para a determinação da absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente de placas cerâmicas. Contudo, devido à indisponibilidade de uma câmara de vácuo, conforme especificado pela norma para a impregnação por água, optou-se por métodos de saturação alternativos, adaptados para cada tipo de material, visando otimizar a impregnação da água nos poros. O procedimento geral envolveu a pesagem do CP seco e, subsequentemente, a pesagem do CP saturado e superficialmente seco.

A absorção de água nos corpos de prova cerâmicos foi determinada para todas as diferentes massas cerâmicas formuladas, totalizando 60 CPs. Para este ensaio, foi utilizada uma balança com capacidade de 500 g e precisão de 0,1 g.

O processo iniciou-se com a determinação da massa seca, onde os corpos de prova foram primeiramente secos no forno a 120 °C até a massa constante para garantir a completa remoção de toda a umidade residual. Atingida a massa constante, foram colocados no dessecador improvisado para resfriarem até a temperatura ambiente. Os três corpos de prova de cada formulação de argila foram então pesados conjuntamente, registrando-se o valor como a massa seca para

aquela formulação.

A saturação dos poros foi então realizada por ebulição. Os corpos de prova secos e pesados foram submersos em uma panela de inox com água da torneira, que foi levada à ebulição e mantida em ebulição suave por um período de 3 horas, assegurando a máxima impregnação de água nos poros. Concluído o período de ebulição, o conjunto (panela, água e CPs) foi deixado para resfriar naturalmente até a temperatura ambiente, garantindo que a água retida nos poros não evaporasse prematuramente.

Para a determinação da massa impregnada, os corpos de prova foram individualmente removidos da água após o resfriamento. O excesso de água da superfície de cada CP foi removido delicadamente com um pano de microfibra molhado (Fig. 16), uma técnica que evita a retirada de água dos poros internos. Em seguida, os três corpos de prova de cada formulação foram pesados conjuntamente, registrando-se o valor como a massa impregnada.

Figura 16 – CPs cerâmicos impregnados de água e secos superficialmente com um pano de microfibra molhado



Fonte: Autoria própria.

Finalmente, a porcentagem de absorção de água para cada formulação foi calculada utilizando a seguinte expressão:

$$E_v = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:  $E_v$  = porcentagem de absorção de água em relação à massa seca;

$m_1$  = massa dos CPs secos;

$m_2$  = massa dos CPs impregnados.

Para a determinação da absorção de água, optou-se por avaliar apenas a formulação de gesso reciclado que apresentasse o melhor desempenho estatístico nos ensaios de propriedades mecânicas prévios. Foram confeccionados 3 novos corpos de prova cúbicos para esta formulação otimizada, bem como 3 corpos de prova para o Gesso Comercial (GC), utilizado como referência, totalizando 6 CPs submetidos ao ensaio.

Após serem moldados, os CPs de gesso foram secos no forno entre 40 °C e 60 °C até a massa constante. Confirmada a massa constante, os CPs foram acondicionados no dessecador improvisado para resfriarem até a temperatura ambiente, então cada corpo de prova foi pesado individualmente para determinação da massa seca.

A saturação do gesso foi realizada por imersão a frio. Os corpos de prova secos e pesados foram submersos totalmente em um recipiente com água e mantidos por um período de 48 horas à temperatura ambiente, assegurando a impregnação da água nos poros. Os corpos de prova foram então removidos individualmente da água após o período de saturação, o excesso de água da superfície foi removido com um pano de microfibra molhado, e cada CP foi pesado individualmente, com o valor registrado como massa impregnada. A porcentagem de absorção de água para cada corpo de prova de gesso foi calculada pela mesma fórmula usada para os CPs cerâmicos (equação 3).

### 3.3.7 Incorporação do GR em Formulações de Esmaltes

Para investigar o impacto do gesso reciclado (GR) como um insumo adicional em esmaltes cerâmicos, foram desenvolvidas e testadas três bases de esmalte distintas: um esmalte base com efeito superficial de cratera (*Crater Underglaze*), um esmalte de cobertura com efeito superficial de cratera (*Top Crater Glaze*), e um esmalte liso. As receitas de esmaltes foram inicialmente baseadas em formulações previamente reportadas por Ceramic Arts Daily (2013), contudo, foram adaptadas com a substituição de alguns insumos por materiais disponíveis no laboratório. Devido a essas adaptações, tornou-se imperativo variar as proporções de certos insumos dentro das bases para uma avaliação abrangente dos resultados, mitigando o risco de que uma fórmula não testada previamente pudesse gerar um esmalte inadequado. Para cada base, o GR foi adicionado em porcentagens específicas, além da formulação base de 100%, para avaliar seus efeitos diretos sobre a estética e o comportamento do esmalte. Todas as formulações foram aplicadas sobre placas de teste cerâmicas biscoitadas e então queimadas à temperatura de 1060 °C. A decisão de realizar a queima em baixa temperatura<sup>5</sup> fundamentou-se no comportamento físico-químico do sulfato de cálcio. Sabendo-se que a degradação térmica completa deste composto e a expressiva liberação de dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) ocorrem teoricamente em temperaturas superiores a 1200 °C, formulou-se a hipótese de que um ciclo térmico mais brando a 1060 °C evitaria a volatilização do resíduo, buscando mitigar a emissão de gases tóxicos.

Os insumos utilizados nas formulações de esmalte, com suas respectivas funções, foram detalhados no Quadro 2.

---

<sup>5</sup> Na área da cerâmica, as ditas queimas de baixa temperatura compreendem uma faixa de temperaturas que geralmente vai de 950 a 1100 °C. Já as ditas queimas de alta temperatura são aquelas geralmente acima de 1220°C.

Quadro 2 – Lista de insumos usados nas formulações de esmalte e suas funções

Insumo	Tipo Químico Principal	Função Principal no Esmalte (a 1060 °C)
Frita F-3134	Vidro Pré-fundido	Principal fundente e formador de vidro, reduz a temperatura de fusão do esmalte e confere brilho.
Albita	Feldspato de Sódio	Fundente secundário, fonte de alumina e sílica. Contribui para a fusão e durabilidade.
Calcita	Carbonato de Cálcio	Fundente (especialmente em temperaturas médias/altas), agente gaseificador (libera CO <sub>2</sub> em queima), opacificante.
Talco	Silicato de Magnésio	Fundente (em temperaturas médias/altas), agente de matificação, fonte de magnésia. Reduz escorrimento.
Caulim	Argila (Silicato de Alumínio Hidratado)	Fonte de Alumina (estabilizador, aumenta viscosidade) e Sílica (formador de vidro). Agente suspensivo e de adesão.
Quartzo	Sílica	Principal formador de vidro, aumenta a refratariedade e a durabilidade.
Borax	Tetraborato de Sódio	Fundente potente em baixas temperaturas, reduz a viscosidade do esmalte, aumenta o brilho.
Bentonita	Argila de Montmorilonita	Agente suspensivo potente (impede decantação) e agente de adesão (liga o esmalte seco à peça).
Carbeto de Silício (SiC)	Carbeto de Silício	Agente gaseificador (libera gases na queima, criando bolhas/crateras).
Óxido de Zinco	Óxido de Zinco	Fundente (em pequenas quantidades), opacificante, modificador de brilho/textura, pode influenciar cores.
Dióxido de Titânio	Dióxido de Titânio	Opacificante potente (branco), induz cristalização (efeitos de matificação ou cristalinos).
Óxido de Ferro	Óxido de Ferro	Colorante (tons de amarelo, marrom, vermelho, preto), pode atuar como fundente em altas % e matificante.
Óxido de Cromo	Óxido de Cromo	Colorante (tons de verde, alguns marrons/pretos), pode induzir matificação e opacidade.
Óxido de Cobre	Óxido de Cobre	Colorante (tons de verde, azul, turquesa, vermelho em redução), fundente.
Óxido de Cobalto	Óxido de Cobalto	Colorante potente (tons de azul), usado em pequenas quantidades.
Gesso Reciclado (GR)	Sulfato de Cálcio	Talvez atue como fundente, opacificante, e/ou texturizador (dependendo da granulometria e temperatura).

Fonte: Adaptado de Ceramic Arts Daily (2013).

Foram formuladas um total de sete receitas base de esmalte: três variações para o *crater underglaze* (U1, U2, U3), uma única variação para o *top crater glaze* (T1) e três variações para o esmalte liso (L1, L2, L3). Os cálculos de massa necessária para cada formulação foram feitos considerando o uso de 30g de esmalte para cada placa de teste (PT), totalizando 45 PTs (Fig. 17). Destes, 29 PTs foram confeccionados a partir da massa P0 (argila base sem GR), 8 PTs da massa P7 (*paper clay* clássico) e 8 PTs da massa P9 (*paper clay* com 5% de GR). Essa distribuição de massas cerâmicas para os CPs visou avaliar o comportamento dos esmaltes (com e sem GR em sua composição) sobre massas com e sem a adição de GR, incluindo as massas de *paper clay* (P7 e P9), que foram escolhidas com o intuito de deixar mais leve a peça demonstrativa criada ao final do trabalho. A seguir será feito o detalhamento de cada uma das formulações de esmalte base e as posteriores variações de aditivos e procedimento de esmaltação.

Figura 17 – Placas de teste para esmaltação



Fonte: Autoria própria.

### 3.3.7.1 Formulação dos Esmaltes Base

A formulação do esmalte base de cratera (*crater underglaze*) foi desenvolvida para atuar como uma camada de base que interage com o esmalte de cobertura, intensificando o efeito de cratera. As variações desta base foram estabelecidas com o objetivo de investigar o impacto da calcita (que age como agente gaseificador e fundente) e do quartzo (que atua como formador de vidro e estabilizador). O carbetto

de silício (SiC) foi mantido constante em 2% em peso, funcionando como o principal agente gaseificador. As proporções detalhadas dos insumos estão apresentadas na Tabela 3. Para fins de adaptação e simplificação dos cálculos a partir da receita original, a formulação base resultou em 105 partes, sendo a adição de 2% de carvão de silício calculada em relação a essa nova base de 105 partes.

Dentre as três variações de base para o *crater underglaze*, a variação U2 estabeleceu um ponto médio, utilizando 12.5% de calcita e 27.5% de quartzo. A variação U1 foi desenvolvida com um teor elevado de calcita e reduzido de quartzo, em comparação com U2, com o objetivo de investigar um efeito gaseificador e fundente mais pronunciado. Por sua vez, a variação U3 foi elaborada com menos calcita e mais quartzo, visando o desenvolvimento de uma base mais estável.

Tabela 3 – Formulação das 3 variações base do esmalte *crater underglaze*

Base (105)	Variações		
	U1	U2	U3
Frita 3134	25	25	25
Calcita	15	12.5	10
Talco	15	15	15
Caulim	15	15	15
Bentonita	5	5	5
Quartzo	25	27.5	30
Borax	5	5	5
<b>Adicional</b>			
SiC (2%)	2.1	2.1	2.1

Fonte: Autoria própria.

O esmalte de cobertura para cratera (*top crater glaze*) foi formulado para ser a camada superior que interage com o *underglaze*, desenvolvendo as crateras e definindo a cor final. Os valores da base foram fixos, e as proporções dos insumos estão listados na Tabela 4.

Tabela 4 – Formulação do esmalte top *crater glaze*

<b>Base (100)</b>	<b>T1</b>
Frita 3134	52
Caulim	11
Quartzo	37
<b>Adicional</b>	
SiC (1%)	1

Fonte: Autoria própria.

A formulação do esmalte liso foi desenvolvida para produzir um acabamento uniforme à temperatura de 1060 °C. As variações desta base foram elaboradas com o objetivo de explorar o impacto de diferentes proporções de fundentes, como a frita e a albita, e estabilizadores/opacificantes, como o talco e o óxido de zinco. As proporções detalhadas dos insumos para cada variação estão apresentadas na Tabela 5. Para fins de adaptação e simplificação dos cálculos a partir da receita original, a formulação base resultou em 108 partes para L1, 101.5 partes para L2 e 95 partes para L3, sendo as porcentagens da bentonita como aditivo calculadas em relação a essas bases de 101.5 (L2) e 95 (L3). Na variação L1, não foi adicionada bentonita.

Dentre as três variações de base para o esmalte liso, a variação L2 estabeleceu um ponto médio e equilibrado em termos de fusão e estabilidade. A variação L1 foi desenvolvida com um aumento nos teores de fundentes (frita e albita) e agentes de fusão, visando um esmalte mais fluido e com maior brilho. Por sua vez, a variação L3 foi elaborada com uma redução nos teores de fundentes e um aumento nos componentes mais refratários, buscando um esmalte mais estável e viscoso, com menor tendência ao escorrimento.

Tabela 5 – Formulação das 3 variações base do esmalte liso

Base	Variações		
	L1 (108)	L2 (101.5)	L3 (95)
Frita 3134	55	50	45
Albita	20	17.5	15
Calcita	10	7.5	5
Talco	5	7.5	10
Caulim	5	6.5	8
Quartzo	5	6.5	8
Borax	5	4	3
Zinco	3	2	1
<b>Adicional</b>			
Bentonita (2%)	-	2.03	1.9

Fonte: Autoria própria.

### 3.3.7.2 Formulação das variações

A distribuição das formulações de esmalte sobre as placas de teste foi planejada para permitir uma avaliação abrangente dos efeitos dos aditivos. O esquema de distribuição é explicado a seguir e detalhado no Quadro 3, no qual é atribuído um número identificador para cada placa de teste (PT).

- **Bases de Esmalte sem Aditivos/Colorantes:** Cada uma das sete receitas base de esmalte (3 *Underglaze*, 1 *Top Glaze*, 3 Liso) foi testada em sua forma pura. No Quadro 3, estão identificados com o código **U1, U2, U3, T1, L1, L2 e L3**;
- **Adição de GR:** Cada base de esmalte foi testada com a adição de GR em duas concentrações: 5% e 10% (em relação ao peso da base de 100%). No Quadro 3, estão identificados com o código **GR5 e GR10**;
- **Adição dos Colorantes:** Cada base de esmalte foi testada com duas variações de colorantes (branco e acinzentado para os esmaltes de cratera;

azul e verde para o esmalte liso). No Quadro 3, a adição dos colorantes para o branco está identificada com o código **A**, o acinzentado está identificado com o código **B**, a cor verde com o código **C**, e a cor azul com o código **D**;

- **Adição de GR + Colorantes:** Cada base de esmalte foi testada com a adição de 5% de GR combinada com as duas variações de colorantes;
- **Combinações de Cratera:** A combinação de uma camada de *crater underglaze* com uma camada de *top crater glaze* foi testada nas seguintes condições: sem aditivos, com as variações de colorantes e com a adição de 5% de GR mais as variações de colorantes. No Quadro 3, o esmalte da primeira camada e o da segunda camada estão identificados por uma barra separadora (/).

Quadro 3 – Distribuição das formulações de esmalte entre as placas de teste

nº	Underglaze	nº	Top glaze	nº	Liso	nº	Under+Top
1	U1	14	T1	21	L1	34	U2 / T1
2	U2	15	T1-GR5	22	L2	35	U2A / T1A
3	U3	16	T1-GR10	23	L3	36	U2A / T1B
4	U1-GR5	17	T1A	24	L1-GR5	37	U2B / T1B
5	U1-GR10	18	T1B	25	L1-GR10	38	U2B / T1A
6	U2-GR5	19	T1A-GR5	26	L2-GR5	39	U2A-GR5 / T1A-GR5
7	U2-GR10	20	T1B-GR5	27	L2-GR10	40	U2A-GR5 / T1B-GR5
8	U3-GR5			28	L3-GR5	41	U2B-GR5 / T1B-GR5
9	U3-GR10			29	L3-GR10	42	U2B-GR5 / T1A -GR5
10	U2A			30	L2C		
11	U2B			31	L2D		
12	U2A-GR5			32	L2C-GR5		
13	U2B-GR5			33	L2D-GR5		

Fonte: Autoria própria.

Adicionalmente, 3 corpos de prova (número 43, 44 e 45, feitos das massas P0, P7 e P9) foram esmaltados com um esmalte cratera comercial, servindo de referência comparativa para a avaliação dos esmaltes após a queima.

### 3.3.7.3 Preparação, aplicação e queima

Com o planejamento das aplicações de cada variação de esmalte, detalhado no Quadro 3, foi possível calcular a quantidade exata de insumos para as formulações base e variações, considerando que seria necessário 30 g de esmalte base (seco) para cada placa de teste (PT). Ao todo, foram preparados 90 g de esmalte base para os esmaltes U1, U3, L1 e L3, 480 g para o esmalte U2, 420 g para o esmalte T1, e 210g para o esmalte L2. Os colorantes e suas formulações estão listados no Quadro 4, e seu peso foi calculado em relação aos 30 g de esmalte base para cada PT.

Quadro 4 – Formulação dos colorantes

Código da cor	Cor	Insumo	Proporção
A	Branco	Óxido de Titânio	5%
		Óxido de Zinco	5%
B	Acinzentado	Óxido de Titânio	5%
		Óxido de Ferro Vermelho	1%
C	Verde	Óxido de Cromo	1%
		Óxido de Cobre	1%
D	Azul	Óxido de Zinco	10%
		Óxido de Cobalto	3%

Fonte: Autoria própria.

Com a definição de todos os insumos a serem utilizados e suas quantidades, os esmaltes foram então preparados e aplicados como descrito a seguir:

1. **Pesagem dos Insumos Base:** As sete receitas base foram preparadas inicialmente. Os componentes de cada base foram pesados individualmente com o auxílio de uma balança de precisão de 0,01 g (Fig. 18);

2. **Mistura a Seco:** Os pós secos de cada formulação base foram misturados manualmente em um recipiente por 3 minutos para garantir uma distribuição uniforme;
3. **Separação e Adição de Aditivos:** As quantidades da fórmula base foram então separadas em copos plásticos, considerando 30 g de esmalte base por placa de teste (PT), os esmaltes que seriam testados em mais de uma PT foram multiplicados de acordo. Para cada um desses copos contendo a quantidade da fórmula base, foram pesados e adicionados os insumos adicionais correspondentes (GR e/ou colorante). O óxidos de cromo, cobre e cobalto foram pesados em uma balança com precisão de 0.0001 g (Fig. 18), devido às menores quantidades requeridas para os testes de cor;
4. **Granulometria do GR:** Para os esmaltes lisos, o GR foi passado por uma peneira com abertura de malha de 0,425 mm antes de ser incorporado, visando otimizar a dispersão de partículas finas e promover um acabamento mais homogêneo. Nos esmaltes de cratera, por outro lado, foi utilizado o GR com granulometria menor que 2 mm, com o intuito de investigar a possível contribuição de grãos maiores para a textura e o efeito gerado pelo esmalte;
5. **Adição de Água:** Água da torneira foi adicionada lentamente a cada mistura de pós, sob agitação constante, até atingir uma consistência adequada para imersão (semelhante a um iogurte);
6. **Aplicação:** As placas de teste (PT) foram previamente limpas com uma esponja úmida com água e vinagre. Os esmaltes então foram aplicados por imersão das placas. Para cada PT, o processo de imersão foi realizado em duas etapas: uma primeira submersão de 2 a 3 segundos para cobrir toda a superfície da placa, seguida de uma segunda imersão até a metade da altura da primeira camada. Esta técnica permitiu que cada PT apresentasse uma área com uma única camada de esmalte e outra com duas camadas, viabilizando a análise da influência da espessura do esmalte depositado. Cada PT foi identificada individualmente na base não esmaltada com seu

código numérico em óxido de ferro preto (aplicado como uma pasta densa). A Figura 19 mostra as placas de teste após a aplicação do esmalte e antes da queima.

Figura 18 – Balança com 0,01 g de precisão (esq.) e balança com 0,0001 g de precisão (dir.)



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Placas de teste após aplicação do esmalte



Fonte: Autoria própria.

Após a aplicação, as peças esmaltadas foram submetidas a um período de secagem de 24 horas no forno a 100 graus, com a portinhola de ventilação aberta para garantir o escape do vapor d' água liberado. O forno foi então programado para atingir a temperatura de 1060 °C. Um patamar de 20 minutos foi mantido na temperatura máxima para promover a maturação e o desenvolvimento dos efeitos dos esmaltes. O resfriamento do forno ocorreu de forma natural até a temperatura ambiente antes da retirada das peças.

### 3.3.8 Prototipagem de placa funcional de reciclagem de argila

A concepção de uma placa funcional para reciclagem de argila surgiu espontaneamente durante as fases finais do projeto, como uma resposta prática aos desafios observados no processo de reincorporar argilas descartadas no ateliê. Graças à flexibilidade inerente ao método MD3E híbrido adotado, foi possível integrar esta nova vertente de pesquisa ao escopo, demonstrando a capacidade da metodologia em se adaptar a descobertas e necessidades emergentes.

O principal intuito por trás deste protótipo é aprimorar o método convencional de reciclagem de argila, que tradicionalmente utiliza blocos de gesso para absorver o excesso de água da barbotina. Embora eficaz, o contato direto entre a argila e o gesso pode, ocasionalmente, levar à contaminação acidental da argila reciclada por partículas de gesso, o que é indesejável para futuras aplicações cerâmicas.

A placa funcional proposta visa mitigar esse risco através de uma estrutura integrada:

1. A placa cerâmica porosa atua como uma barreira permeável, isolando a argila a ser reciclada do gesso absorvente.
2. Uma mistura de Gesso Reciclado (GR) e Gesso Comercial (GC) – na proporção ótima a ser definida pelos resultados deste trabalho – é vertida na parte inferior da placa cerâmica, criando uma estrutura sólida e integrada entre o gesso (que retira o excesso de água) e a placa cerâmica (que filtra e protege a argila).

Para o desenvolvimento desta placa funcional, foi pensada uma formulação cerâmica específica com o objetivo de otimizar sua porosidade, garantindo alta capacidade de absorção, ao mesmo tempo em que se controlava a retração e minimizava o empenamento durante as etapas de secagem e queima. Placas de grandes dimensões e superfície plana são notoriamente suscetíveis a deformações como o empenamento, o que exigiu uma abordagem cuidadosa na escolha da massa. Adicionalmente, a placa foi concebida com um design modular, incluindo encaixes de sobreposição entre as peças cerâmicas. Esta decisão estratégica evitou

os desafios técnicos de moldar e queimar uma única placa cerâmica de grandes dimensões. A modularidade permite a montagem de um bloco de reciclagem com o tamanho necessário para o laboratório (aproximadamente 60 cm×72 cm), replicando a capacidade dos blocos atuais de reciclar até 20 kg de argila úmida por vez, mas com a segurança adicional da barreira cerâmica.

Para a confecção dos módulos da placa funcional, a formulação escolhida foi a P13, cujos detalhes de composição estão especificados na matriz de formulações da Seção 3.3.5. Especificamente para este protótipo, foram utilizadas as seguintes quantidades de insumos: 3,5 kg de Argila Reciclada (AR), 700 g de celulose e 700 g de chamote extra grosso (granulometria entre 1 mm e 2 mm, conforme detalhado na Seção 3.3.5). A massa foi preparada primeiramente batendo a celulose em água e colocando-a em um balde de 12 litros, a mistura seca de AR e chamote foi polvilhada aos poucos sobre a água com celulose e misturada com o auxílio de um misturador de tinta acoplado a uma furadeira (Fig. 20).

Figura 20 – Preparação da massa cerâmica para confecção do protótipo de placa funcional



Fonte: Autoria própria.

A modelagem foi realizada através da técnica de placa, a mesma empregada na preparação dos corpos de prova da Seção 3.3.5. Um bloco de argila homogênea foi aberto com um rolo de madeira, utilizando régua de madeira de 9 mm como guia para controlar a espessura. Foram produzidas duas placas com a formulação P13. Uma vez abertas, as placas foram cortadas com uma faca nas dimensões de 26,7 x 22,2 cm, adotadas com previsão de uma retração linear de aproximadamente 10%

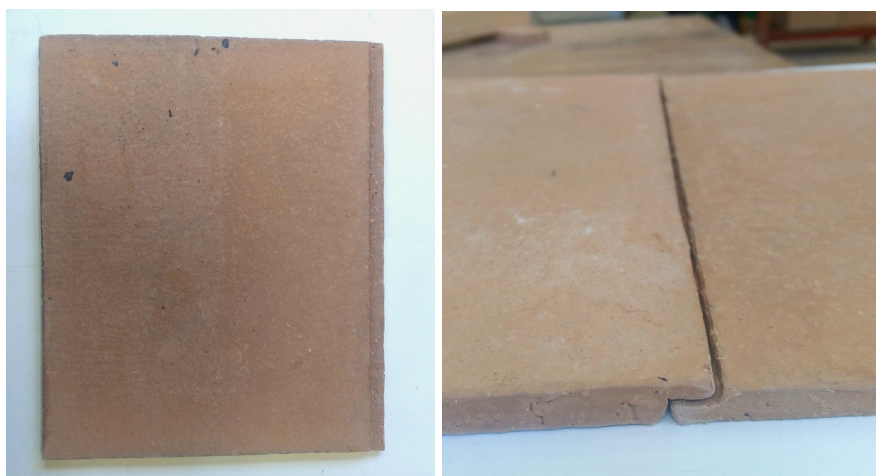
para que as dimensões finais se aproximem de 24 x 20 cm. Este dimensionamento foi planejado para que um novo bloco de reciclagem no laboratório pudesse ser composto por 6 módulos interligados.

Para o controle e comparação das propriedades, foi também modelada uma placa de controle de AR pura, utilizando 2 kg de Argila Reciclada (AR) sem aditivos. Esta placa servirá de referência para avaliar a retração, o empenamento e a capacidade de absorção do protótipo funcional em comparação com a argila comum.

Após serem cortadas nas dimensões desejadas, as placas foram submetidas a um processo de secagem cuidadosamente controlado para minimizar deformações. Foram dispostas entre duas chapas de madeira compensada forradas com jornal, e peso adicional foi aplicado sobre as chapas superiores. Durante a secagem, as chapas de madeira úmidas eram sistematicamente trocadas por chapas secas, garantindo uma secagem uniforme e evitando o empenamento.

Quando as placas atingiram o ponto de couro<sup>6</sup>, foi realizado um corte com uma faca em uma seção da espessura de uma das faces laterais de cada placa, para criar assim o sistema de encaixe de sobreposição entre os módulos da placa cerâmica. A Figura 21 mostra uma placa modelada e o corte de encaixe entre placas em detalhe.

Figura 21 – Placa modelada (esq.) e detalhe do encaixe de sobreposição das placas (dir.)



Fonte: A autoria própria.

---

<sup>6</sup> Termo usado na cerâmica para designar o estágio de secagem em que a peça, embora ainda contenha alguma umidade, adquiriu firmeza suficiente para ser manuseada sem deformação e para permitir trabalhos como corte, junção de partes e brunimento. Nesse ponto, a argila já não é mais plástica, mas ainda não está completamente seca.

Concluída a secagem, as placas foram submetidas à queima de biscoito a 900 °C. Uma vez resfriadas à temperatura ambiente, confeccionaram-se contenções retangulares de papelão ao redor de suas faces laterais para a moldagem dos blocos de gesso. Para evitar que a argila porosa extraísse prematuramente a água da pasta de gesso, as placas foram previamente submersas em água por 30 minutos até atingirem a saturação. Com os perímetros devidamente isolados pelo papelão e as bases saturadas, procedeu-se ao vazamento: a placa de controle recebeu a pasta de gesso comercial puro, enquanto a placa da formulação P13 recebeu a mistura contendo 20% de GR. A Figura 22 ilustra a etapa de vazamento da pasta, o conjunto após o endurecimento e o protótipo final desenformado.

Figura 22 – Molde sendo preenchido (esq.), molde preenchido (centro) e protótipo pronto (dir.)



Fonte: Autoria própria.

### 3.4 Tratamento e Análise Estatística dos Dados

Os dados quantitativos obtidos nos ensaios de resistência mecânica à compressão foram submetidos a tratamento estatístico para garantir a confiabilidade das conclusões. Inicialmente, realizou-se a triagem dos dados brutos conforme as diretrizes da norma ABNT NBR 12129 (Gesso para Construção Civil – Determinação das propriedades mecânicas) (ABNT, 1991b), descartando-se os corpos de prova que apresentaram desvio superior a 15% em relação à média do seu respectivo lote. Para manter o balanceamento do delineamento experimental necessário para as análises computacionais, os valores discrepantes excluídos foram substituídos pela média aritmética dos corpos de prova remanescentes do mesmo grupo. A análise estatística foi dividida em duas etapas metodológicas:

1. **Otimização dos Parâmetros de Calcinação:** Para determinar a influência do tempo e da temperatura de calcinação, aplicou-se a Análise de variância (ANOVA) de fator duplo com repetição para cada combinação temperatura-tempo de cada proporção de mistura de GR, ou seja, GR20\* (razão a/g de 0,70, mesma do GC puro), GR20, GR40, GR80\* (razão a/g de 1,05, mesma do GR100) e GR100. Nos casos em que a ANOVA indicou diferença estatisticamente significativa, utilizou-se o teste *post-hoc* de Tukey (baseado na Diferença Honestamente Significativa, HSD) para o agrupamento e ranqueamento das médias, definindo assim os parâmetros ideais de reciclagem.
2. **Viabilidade das Proporções de Mistura:** Após a definição dos parâmetros ideais (temperatura-tempo) de calcinação, o desempenho das diferentes proporções de mistura com gesso comercial foi comparado ao gesso comercial puro (grupo controle). Para isso, empregou-se o Teste *t* de Student para amostras independentes, avaliando a significância das perdas de resistência em relação ao grupo controle. Adicionalmente, avaliou-se o impacto do ajuste da relação água/gesso na resistência média.

Todas as análises foram realizadas considerando um nível de significância de 5% ( $\alpha=0,05$ ), utilizando planilhas eletrônicas (Google Sheets) e ferramentas de análise de dados (XLMiner Analysis ToolPak).

### 3.5 Produção de Peça Demonstrativa

Com o intuito de aplicar e valorizar as texturas de cratera desenvolvidas, bem como explorar o potencial do gesso reciclado (GR) em aplicações práticas, foi concebida e executada a produção de uma luminária de mesa. A peça, inspirada na forma de uma esponja do mar fixada em uma base rochosa, buscou uma analogia estética com a textura de cratera, remetendo a formas orgânicas e naturais presentes na natureza.

A etapa inicial consistiu na produção de um molde cilíndrico de gesso. Utilizou-se 1 kg de gesso contendo 80% de gesso comercial (GC) e 20% de gesso reciclado (GR) calcinado a 150 °C por 2 horas, e uma razão água/gesso de 0,77. O

processo de confecção do molde iniciou-se com a formação de uma parede cilíndrica a partir de uma folha de acetato enrolada, que foi então fixada a uma placa de vidro, com as frestas seladas utilizando argila para criar uma contenção para o vazamento inicial do gesso. Primeiramente, o gesso foi vazado dentro deste cilindro de acetato para formar um fundo de gesso de 2 cm de altura, que serviria como base do molde. Em seguida, na abertura de um copo plástico, que atuaria como modelo para o interior do molde, fixou-se um disco de papel cartão com diâmetro maior que a abertura do copo, selado com argila. Este disco teve a função de criar um "pescoço" para o vazamento de barbotina, estendendo-se além da altura original do copo, uma prática comum em moldes para colagem por barbotina, que faz com que a barbotina extra forme uma espessura de parede uniforme na peça final. O copo plástico, já preparado, foi posicionado e centralizado sobre a base de gesso previamente vazada, dentro da parede cilíndrica de acetato, e o restante da mistura de gesso com GR foi então vazado, completando a formação do molde cilíndrico. A estrutura para confecção do molde e o molde pronto são ilustrados na Figura 23.

Figura 23 – Estrutura de confecção (esq.) e molde cilíndrico pronto (dir.)



Fonte: Autoria própria.

Com o molde de gesso pronto, procedeu-se à preparação da massa de *paper clay* com gesso reciclado. Foi preparada uma barbotina de *paper clay* utilizando a formulação P9, com 1 kg de argila reciclada em pó (AR), 50 g de celulose, 100 g de chamote fino, e 50 g de GR calcinado a 900 °C. Parte dessa barbotina foi imediatamente vazada no molde cilíndrico de gesso confeccionado na etapa anterior, com o objetivo de produzir cilindros ocios que formariam a estrutura principal da

esponja (Fig. 24). A parte restante da barbotina foi colocada sobre um bloco de gesso para secar até atingir o ponto de plasticidade adequado para a sova e modelagem manual. Com a massa de *paper clay* já seca e sovada, foi confeccionada uma placa através da técnica de abertura de placa. A partir desta placa, foram modelados outros cilindros menores, e uma base principal que foi colocada sobre um molde de formato semiesférico (Fig 24), também formulado com 20% de Gesso Reciclado (GR), visando adquirir uma forma tridimensional onde os cilindros seriam fixados, mimetizando uma base rochosa para a "esponja do mar". Todos os cilindros foram "amassados" e trabalhados para adquirirem uma forma mais orgânica antes de serem fixados à base (Fig. 24). A estrutura assim montada seria a peça onde os esmaltes de cratera seriam posteriormente aplicados, buscando realçar a textura superficial.

Figura 24 – Produção do cilindro por meio do molde cilíndrico com GR (esq.) e estrutura da peça demonstrativa sobre molde semiesférico com GR (dir.)



Fonte: Autoria própria.

Concluída a modelagem da estrutura em forma de esponja do mar, que serviria como cúpula, foram confeccionadas duas bases distintas: uma contendo texturas e elementos que remetem a corais, e outra sem tais ornamentos (Fig. 25).

Figura 25 – Duas bases diferentes para a cúpula da luminária



Fonte: Autoria própria.

Após a secagem da cúpula e das duas bases, realizou-se a queima de biscoito a 900 °C. Em seguida, aplicou-se o esmalte cratera na superfície externa da cúpula e o esmalte liso na parte interna. Nas bases, utilizou-se um engobe comercial na face externa com a finalidade de modificar a coloração original da cerâmica vermelha. Por fim, as peças foram submetidas a uma segunda queima a 1060 °C. O registro visual das peças finalizadas encontra-se no capítulo de Resultados e Discussões.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos nas etapas experimentais detalhadas no Capítulo 3 – Métodos. Os achados são analisados em profundidade, confrontando-os com as expectativas iniciais do projeto e com a literatura científica pertinente, a fim de validar a proposta de reaproveitamento do resíduo de gesso em diferentes aplicações no contexto cerâmico. A estrutura segue a ordem dos procedimentos experimentais, abordando a preparação e caracterização do gesso reciclado, sua incorporação em massas cerâmicas, esmaltes e matrizes cimentícias, bem como o desenvolvimento de uma placa funcional e de uma peça demonstrativa.

### 4.1 Gesso Reciclado para Novos Moldes

#### 4.1.1 *Preparação e Beneficiamento do Gesso Reciclado (GR)*

A etapa inicial do processo de reaproveitamento do gesso envolveu a coleta, limpeza e beneficiamento dos moldes descartados no Laboratório de Modelagem II – Cerâmica do IFSC. Cerca de 30 kg de resíduo de gesso, predominantemente moldes, foram submetidos à limpeza superficial com esponja úmida. Conforme observado, a presença residual de argila nos moldes era perceptível após este procedimento, especialmente naqueles que apresentavam maior idade de uso ou geometrias mais complexas, com relevos e reentrâncias acentuadas. Embora a limpeza manual não tenha garantido a remoção total das impurezas, esta variabilidade foi considerada uma característica inerente ao contexto de reaproveitamento em ateliê.

A trituração do material foi realizada em duas etapas distintas. Inicialmente, os moldes foram grosseiramente quebrados com martelo. Para um volume menor (aproximadamente 4 kg), a moagem fina foi concluída em almofariz. Este processo, quando realizado manualmente para grandes volumes, mostrou-se consideravelmente desafiador em termos de tempo e esforço. Tal constatação sugere que, para um contexto de ateliê sem equipamentos industriais de trituração, o acúmulo excessivo de gesso descartado deve ser evitado, recomendando-se a moagem manual progressiva do resíduo à medida que ele é gerado, para posterior estocagem e calcinação em lotes maiores. O volume restante do gesso triturado foi

processado no Laboratório de Materiais do Departamento Acadêmico da Construção Civil do IFSC, com o auxílio de um misturador intensivo. O pó resultante de ambos os métodos de trituração apresentou uma aparência razoavelmente homogênea. O peneiramento subsequente em uma peneira de 2 mm de abertura revelou-se eficaz na padronização da granulometria máxima do GR, resultando em um pó visualmente mais uniforme.

A calcinação do GR foi realizada em seis lotes, buscando a conversão do di-hidrato de gesso em hemi-hidrato. A perda de massa percentual de cada lote, em função das variáveis de temperatura e tempo de permanência, foi registrada conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Perda de massa na calcinação

<b>Temperatura de calcinação (°C)</b>	<b>Tempo de calcinação (h)</b>	<b>Massa inicial (g)</b>	<b>Massa calcinada (g)</b>	<b>Perda de massa (g)</b>	<b>Perda de massa (%)</b>
150	2	3000	2545,2	454,8	15,2
150	4	3000	2519,3	480,7	16,0
150	8	3000	2486,5	513,5	17,1
200	2	3000	2500,2	499,8	16,7
200	4	3000	2434,9	565,1	18,8
200	8	3000	2500,2	499,8	16,7

Fonte: Autoria própria.

A análise desses resultados revela que as perdas de massa registradas (entre 15,2% e 18,8%) estão alinhadas com as faixas tipicamente esperadas para a calcinação de gesso di-hidratado a hemi-hidratado, que, segundo estudos de Damasceno (2013) e Fernandes (2016), variam entre 15% e 20% para condições similares. Essa convergência de dados sugere a viabilidade do método de calcinação adotado no ateliê para a conversão pretendida.

Observou-se uma variação inesperada onde os lotes calcinados a 200 °C por 2 horas e por 8 horas apresentaram a mesma perda de massa (16,7%). Essa similaridade sugere uma possível interferência de variáveis não totalmente controladas, como a umidade residual do gesso triturado antes da calcinação. Um controle mais rigoroso da umidade inicial poderia revelar diferenças mais acentuadas

na perda de massa em função do tempo de permanência à temperatura mais elevada, uma vez que a conversão deveria ser mais completa com tempos mais longos, resultando em maior perda de água. No entanto, o intervalo geral das perdas de massa ainda reforça a formação do hemi-hidrato, conforme os objetivos propostos.

#### 4.1.2 Caracterização do Pó de Gesso (GR e GC)

A caracterização granulométrica foi inicialmente planejada com o intuito de padronizar a finura do Gesso Reciclado (GR) em níveis comparáveis aos do Gesso Comercial (GC), servindo este último como referência. Para o GC, uma amostra de 50g foi submetida à análise, revelando os seguintes percentuais de material passante pelas peneiras, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Granulometria de uma amostra de 50g de GC

<b>Abertura da peneira (mm)</b>	<b>Massa passante (g)</b>	<b>Massa passante (%)</b>
0.840	50.00	100.0
0.425	49.90	99.8
0.240	48.95	97.9
0.125	45.50	91.0

Fonte: Autoria própria.

Os resultados demonstram a elevada finura do Gesso Comercial de referência, com a totalidade da amostra passando pela peneira de 0,840 mm e mais de 91% do material sendo passante pela peneira mais fina de 0,125 mm.

Em contrapartida, a tentativa de caracterização e beneficiamento do Gesso Reciclado (GR) para atingir uma finura comparável à do GC foi descontinuada. Um ensaio inicial com uma amostra de 50g de GR revelou que 10g ficaram retidos na peneira de 0,840 mm. Ao prosseguir para a peneira seguinte (0,425 mm), o tempo demandado para o ensaio aumentou drasticamente devido à obstrução frequente das aberturas da malha pelos grãos do GR, o que atrasava significativamente a passagem do material. Além disso, a soma do material retido nas peneiras de 0,840

mm e 0,425 mm já representava mais de 25% da massa total da amostra.

Diante da inviabilidade prática desse processo em escala de ateliê, que resultaria em perdas excessivas de material e um tempo de processamento proibitivo, a granulometria máxima de 2 mm (obtida pelo peneiramento inicial) foi mantida e estabelecida como a variável de design e processo para os ensaios subsequentes. Essa decisão, embora implicasse uma diferença granulométrica significativa em relação ao GC, alinha-se com a proposta do trabalho de desenvolver processos adaptáveis à realidade de um ateliê. A manutenção de uma granulometria mais grosseira para o GR pode influenciar diretamente suas propriedades de pasta e mecânicas, aspectos que serão explorados nas seções seguintes.

#### *4.1.3 Caracterização da Pasta de Gesso (GR e Misturas)*

A caracterização da pasta de gesso foi um passo fundamental para estabelecer as proporções ideais de água/gesso (a/g) e de mistura entre o Gesso Reciclado (GR) e o Gesso Comercial (GC), visando garantir a trabalhabilidade necessária para os processos de moldagem.

Inicialmente, ensaios exploratórios baseados na NBR 12128 (ABNT, 1991a) para determinação de início e fim de pega, utilizando o aparelho de Vicat, revelaram uma limitação crítica do GR puro (GR100). Para razões a/g entre 0,9 e 1,0, a pasta de GR apresentava-se excessivamente viscosa, dificultando significativamente o vazamento para o molde e o preenchimento completo, o que resultava em peças com crateras e falhas superficiais. Paradoxalmente, este comportamento de baixa fluidez era acompanhado por um tempo de início de pega prolongado, inviabilizando uma moldagem eficiente. Diante dessa discrepância entre fluidez e tempo de pega, o tempo de início de pega foi descartado como um critério confiável de trabalhabilidade para o gesso reciclado, levando à adoção do teste mini-slump adaptado.

Para o Gesso Comercial (GC) de referência, o teste mini-slump com razão a/g de 0,70 resultou em um espalhamento de 90,5 mm para o GCPA (Gesso Comercial - Pacote Aberto). A mistura GCPF+N (85% GCPF e 15% GC-N), desenvolvida para replicar essa trabalhabilidade após a escassez do GCPA, demonstrou um espalhamento de 87 mm com a mesma razão a/g, confirmando sua adequação como material de referência.

A avaliação das misturas de GR e GC nas proporções de GR20, GR40, GR60

e GR80, com suas razões a/g adaptadas (0,77; 0,84; 0,91; 0,98, respectivamente), indicou que as formulações GR20 e GR40 apresentaram os resultados mais satisfatórios em termos de espalhamento e, crucialmente, de fluidez contínua e homogênea da pasta no momento do vazamento. As observações qualitativas durante o teste mini-slump corroboraram que estas misturas possuíam uma consistência adequada para a manipulação e moldagem. A tabela completa com os dados de espalhamento e fluidez de todas as formulações e lotes calcinados está disponível no Apêndice A.

Ensaio adicionais foram realizados para compreender o impacto da substituição mútua de GR e GC na trabalhabilidade:

- As misturas GR20\* (GR20 com a/g de 0,70, a mesma do GC puro) mostraram-se inadequadas para moldagem. Apresentaram uma redução expressiva no espalhamento e na fluidez, com valores variando entre 60,5 mm (para o lote GR150/2h) e 76 mm (para o lote GR200/8h). Isso evidencia que a substituição de apenas 20% do GC por GR, sem o ajuste da razão a/g, deteriora significativamente a trabalhabilidade da pasta.
- Em contraste, as misturas GR80\* (GR80 com a/g de 1,05, a mesma do GR puro) revelaram uma melhora significativa na fluidez e espalhamento em comparação com o GR100 puro. Enquanto apenas dois dos lotes de GR100 (GR200/2h e GR200/8h) apresentaram fluidez satisfatória, a mistura GR80\* demonstrou trabalhabilidade aceitável para todos os lotes de GR calcinado. Este resultado sugere que a adição de 20% de GC ao GR puro, sem alterar a razão a/g do GR, é capaz de compensar algumas das suas deficiências de fluidez, melhorando significativamente a trabalhabilidade da pasta.

Tais achados demonstram claramente que tanto a substituição de GC por GR quanto a de GR por GC têm um impacto significativo na trabalhabilidade da pasta. O GR, com sua granulometria mais grosseira e impurezas residuais, requer maior quantidade de água para atingir uma fluidez mínima, e mesmo assim pode apresentar características de pega e viscosidade menos previsíveis que o GC.

Em relação ao Critério de Trabalhabilidade Prática (CTP), as misturas GR20 e GR40 foram consideradas as mais promissoras em termos de fluidez de vazamento.

#### 4.1.4 Propriedades Mecânicas do Gesso (GR e Misturas) e Análise Estatística

A dureza superficial foi avaliada com base no procedimento adaptado, conforme detalhado na Seção 3.3.4. Reconhece-se que os valores obtidos (tabela completa disponível no Apêndice B) são valores nominais inflados, pois o relatório de ensaio gerado pelo script do procedimento adaptado distorce os dados como se a força aplicada ao corpo de prova fosse os 500 N ditados pela norma, o que, na prática, não ocorreu devido à limitação do equipamento. Consequentemente, os dados de dureza devem ser descartados como valores absolutos em N/mm<sup>2</sup>. No entanto, eles são utilizados para análise comparativa relativa entre as formulações, permitindo determinar as tendências de ganho e perda de dureza em função da incorporação do Gesso Reciclado (GR).

O Gesso Comercial de referência (GC) apresentou um valor de 61,71 MPa. A análise revelou uma clara tendência de queda de desempenho da dureza diretamente proporcional ao aumento da porcentagem de Gesso Reciclado (GR) na mistura. As únicas formulações que apresentaram um desvio menor que 5% em relação à dureza do GC foram as misturas GR20\* e GR20 (para todos os lotes de calcinação), e a GR40 (com exceção dos lotes 200/4 e 200/8). Esta queda de dureza é atribuída, em grande parte, à maior necessidade de água para compensar a baixa densidade e irregularidade do GR, o que resulta em maior porosidade do material endurecido.

Esta tendência foi mais evidente ao analisar a formulação GR20\* (substituição de 20% de GC por GR sem aumento da razão a/g), que apresentou um leve aumento na dureza em comparação à referência. Contudo, como verificado nos ensaios de mini-slump, essa pasta não possui trabalhabilidade aceitável para moldagem, o que valida a correlação entre a dureza e a baixa relação a/g da mistura.

Quanto à resistência à compressão (cuja tabela completa está disponível no Apêndice C), a resistência mínima exigida pela NBR 13207 (ABNT, 1994) para o gesso de construção é de 8,4 MPa. A análise da resistência à compressão dos Gessos Comerciais (GC) isolados revelou uma alta variabilidade em função da marca, do armazenamento e do teor de água, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Resistência à compressão dos gessos disponíveis no laboratório

<b>Amostra de gesso comercial</b>	<b>Razão água/gesso</b>	<b>Resistência (MPa)</b>
GCPF	0.7	9.528
GCPF	0.75	8.281
GCPA (pó superficial)	0.7	10.42
GCPA (pó homogeneizado)	0.7	8.163
GC-N	0.7	3.346
GCPF+N	0.7	8.215

Fonte: Autoria própria.

Foi observado que o Gesso Comercial - Pacote Aberto (GCPA) apresentava uma significativa variação interna, com o pó superficial (aquele mais exposto ao ar ambiente) registrando a resistência mais alta (10,420 MPa). Esta resistência elevada, comparada ao GCPA homogeneizado (8,163 MPa) e ao GCPF (9,528 MPa), é atribuída à pré-hidratação parcial do gesso nas camadas superficiais devido à exposição prolongada à umidade do ar.

Esta pré-hidratação causa a formação de microcristais de gesso di-hidratado, que atuam como pontos de nucleação para o crescimento de novos cristais na mistura. Isso acelera o processo de endurecimento e confere uma resistência inicial superior ao material. No entanto, o pó superficial era inconsistente e, ao ser misturado para homogeneização, a resistência média do GCPA caiu abaixo do mínimo normativo de 8,4 MPa.

Diante da necessidade de um gesso comercial estável e da insuficiência do GCPA, a mistura de 85% de Gesso Comercial - Pacote Fechado (GCPF) com 15% de Gesso Comercial Novo (GC-N) foi criada para replicar a trabalhabilidade do pó em uso. Esta mistura (GCPF+N) obteve 8,215 MPa, validando sua adoção como Gesso Comercial de referência (controle) para as análises estatísticas subsequentes. O baixo resultado do GC-N (3,346 MPa) ilustra a ampla variação de propriedades mecânicas entre diferentes marcas.

Para determinar os melhores parâmetros de reciclagem, os resultados de resistência das misturas foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) de dois fatores (tempo e temperatura). Como mostrado na Tabela 9, nas formulações com altos teores de substituição (100% e 80% de Gesso Reciclado), a ANOVA bifatorial

indicou efeito significativo ( $p < 0,05$ ) do tempo, da temperatura e da interação tempo×temperatura, o que infere em diferenças estatisticamente significativas entre as condições de calcinação.

Tabela 9 – Parâmetros estatísticos da ANOVA avaliando o efeito do tempo e da temperatura de calcinação nas misturas com altos teores de gesso reciclado (100% e 80%)

Amostra	Fonte de variação	gl (graus de liberdade)	QM (quadrado médio)	F (estatística F de Fisher)	p-valor (nível de significância)
GR 100% a/g=1.05	Temperatura	1	0.38	12.14	0.0045
	Tempo	2	0.37	11.56	0.0016
	Temperatura x tempo	2	0.45	14.31	0.0007
	Resíduo	12	0.03	-	-
GR 80% a/g=1.05	Temperatura	1	0.31	9.62	0.0092
	Tempo	2	0.71	21.91	0.0001
	Temperatura x tempo	2	0.38	11.85	0.0014
	Resíduo	12	0.03	-	-

Fonte: Autoria própria.

Conseqüentemente, aplicou-se o teste *post-hoc* de Tukey (HSD - valor honestamente significante) para o agrupamento das médias, cujos resultados estão sumarizados na Tabela 10. O teste confirmou que as amostras calcinadas a 150 °C por 2 h apresentaram o melhor desempenho, isolando-se no grupo de maior significância estatística (Grupo A), os demais tratamentos não diferem-se estatisticamente entre si (Grupo B).

Tabela 10 – Agrupamento pelo teste de Tukey (HSD) para otimização dos parâmetros de calcinação do gesso reciclado (condições de 80% e 100%)

Parâmetros de calcinação	GR100% a/g=1.05		GR80% a/g=1.05	
	Resistência média [MPa]	Grupo Tukey	Resistência média [MPa]	Grupo Tukey
150 °C / 2 horas	3.81	A	3.76	A
150 °C / 8 horas	3.25	B	3.25	B
200 °C / 2 horas	3.03	B	3.05	B
200 °C / 8 horas	2.85	B	2.88	B
200 °C / 4 horas	3.11	B	2.86	B
150 °C / 4 horas	2.81	B	2.58	C

Nota: Dados em grupos de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ; HSD\_100% = 0.488 MPa; HSD\_80% = 0.494)

Fonte: Autoria própria.

Nas misturas mais diluídas (40% e 20%), a predominância da matriz do gesso comercial mascarou as variações da calcinação, resultando em empates estatísticos ( $p > 0,05$ ) entre os lotes. Dessa forma, o ciclo de 150 °C por 2 h foi consolidado como o padrão ideal para o projeto, por apresentar superioridade técnica nas condições críticas e maior eficiência energética (menores temperatura e tempo). As tabelas completas da ANOVA e teste de Tukey encontram-se detalhadas no Apêndice D.

A incorporação do Gesso Reciclado (GR) exigiu o aumento da relação água/gesso (a/g) para compensar a perda de fluidez. Conforme evidenciado pela Tabela 11, o Teste *t* de Student revelou que este ajuste de água resultou em uma redução estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ) da resistência à compressão em todas as formulações com trabalhabilidade aceitável, quando comparadas ao controle. Em contrapartida, a mistura GR20\*, formulada com a mesma relação a/g do gesso puro, apresentou um desempenho mecânico excelente e estatisticamente equivalente ao do controle ( $p > 0,05$ ). Este achado é condizente com a literatura, visto que estudos como os de Rossetto et al. (2015), Camarini, Lima e Pinheiro (2016) e Shiyo, Nagels e Shangali (2020) sugerem que o GR pode apresentar desempenho mecânico comparável ou até superior ao gesso virgem em baixas

proporções de substituição. Contudo, conforme já mencionado anteriormente, a fluidez inadequada dessa formulação inviabiliza o uso prático. Tal constatação corrobora a tese de que o gesso reciclado possui a capacidade de atingir resistências equiparáveis às do gesso comercial, e que a perda de resistência não é uma falha intrínseca do resíduo, mas sim uma consequência direta e inevitável do excedente de água exigido para que a pasta atinja uma trabalhabilidade viável no ateliê.

Tabela 11 – Avaliação estatística (Teste t) e da viabilidade técnica das misturas contendo diferentes quantidades do lote otimizado (150 °C/2 h)

<b>Formulação</b>	<b>a/g (razão água/gesso)</b>	<b>Resistência média [MPa]</b>	<b>p-valor (nível de significância)</b>	<b>Desvio relativo à norma (8.4 MPa) [%]</b>
GC Controle	0.7	8.22	-	2.18
GR20*	0.7	8.45	0.6844	0.63
GR20	0.77	6.75	0.0256	19.64
GR40	0.84	5.44	0.0037	35.20
GR80*	1.05	3.76	0.0004	55.20
GR100	1.05	3.81	0.0005	54.60

Fonte: Autoria própria.

Ao aplicar um critério técnico de tolerância de projeto de desvio máximo de 25% em relação à resistência mínima normativa de 8,4 MPa (estipulado pela NBR 13207) (ABNT, 1994), observou-se que a formulação GR20 do lote 150°C/2h, apesar da queda estatística confirmada pelo teste t, foi a única com desvio tolerável, alcançando uma resistência média de 6,75 MPa. Este desempenho comprova que a substituição de até 20% do gesso comercial pelo resíduo calcinado a 150 °C por 2h mitiga significativamente a perda de resistência, caracterizando-se como a formulação mais viável e segura para a reintrodução em processos que exijam maior integridade estrutural. A tabela completa com todos os resultados inferenciais do Teste t encontra-se no Apêndice E.

#### 4.1.5 Absorção de água do Gesso (GC e Misturas)

A medição da absorção de água (AA) foi conduzida nos corpos de prova de gesso, com o intuito de caracterizar a porosidade da matriz e avaliar a funcionalidade do material para a confecção de moldes e componentes absorventes. O ensaio, realizado por saturação em imersão a frio por 48 horas, revelou que o Gesso Comercial (GC) de referência possui uma porosidade significativa, registrando uma absorção média de 44,3%. Este valor é coerente com a finalidade do gesso como molde de colagem, que exige alta porosidade para a remoção eficiente da água.

Com base nos resultados estatísticos prévios, que definiram o ciclo de 150 °C por 2 h como o parâmetro otimizado de reciclagem, o ensaio de Absorção de Água (AA) focou na validação da formulação viável GR20 (substituição de 20% do GC pelo resíduo). Os resultados obtidos demonstraram que a inserção do gesso reciclado não comprometeu a porosidade da matriz. A formulação otimizada apresentou uma AA de 45,6%, enquanto a referência do GC puro registrou 45,1%. A análise inferencial (Teste *t* de Student) confirmou que não há diferença estatística significativa entre os dois materiais ( $p > 0,05$ ). Essa manutenção estatisticamente comprovada da capacidade de absorção consolida-se como um indicador robusto de viabilidade técnica para o material, garantindo que o molde reciclado terá a mesma eficiência de sucção capilar que um molde comercial. A Tabela 12 apresenta os dados referentes à absorção dos corpos de prova testados, e os dados completos do Teste *t* podem ser verificados no Apêndice F.

Tabela 12 – Absorção de água dos corpos de prova de gesso

Formulação	Corpo de prova	Massa seca (g)	Massa impregnada (g)	Absorção de água (%)	Absorção média (%)	p-valor
GC Controle	1	136.9	198.0	44.6	44.3	-
	2	136.3	195.7	43.6		
	3	136.0	196.9	44.8		
GR20 (150 °C / 2h)	1	128.2	187.1	45.9	45.6	0.0585
	2	128.7	186.6	45.0		
	3	128.1	187.0	46.0		

Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.6 Viabilidade de Reutilização

A viabilidade de reutilização do Gesso Reciclado (GR) foi determinada pela síntese dos resultados experimentais e inferenciais, balanceando as exigências normativas com as necessidades práticas do ateliê. O estudo confirmou que, para viabilizar a moldagem, o ajuste da relação água/gesso foi fundamental. A adoção da progressão linear de água permitiu a criação de pastas (como a GR20 e GR40) que apresentaram fluidez e trabalhabilidade adequadas, conforme evidenciado pelas observações qualitativas do ensaio de *mini-slump*.

Adicionalmente, a análise da Absorção de Água (AA) consolidou a funcionalidade do material otimizado. O lote eleito como ideal, GR20 (150/2h), registrou uma absorção de 45,6%, valor que, submetido ao teste *t* de Student, provou ser estatisticamente equivalente ( $p > 0,05$ ) à referência do Gesso Comercial puro (44,3%). Este achado comprova que o GR, mesmo possuindo uma granulometria distinta, mantém a rede capilar e a alta porosidade necessárias para a absorção eficiente de umidade, garantindo a velocidade de colagem da barbotina ou argila na superfície do molde.

O principal desafio à viabilidade concentrou-se na resistência absoluta. Como comprovado estatisticamente, a necessidade de um maior teor de água para garantir a fluidez penalizou o desempenho mecânico ( $p < 0,05$ ). Embora a mistura GR20 (150/2h) não tenha atingido o requisito mínimo de 8,4 MPa ditado pela NBR 13207 (ABNT, 1994), o valor alcançado de 6,75 MPa enquadra-se com segurança dentro da margem de tolerância de projeto (perda máxima de 25%). Este nível de resistência residual valida o material para a aplicação proposta, sendo estruturalmente suficiente para suportar as tensões de desmoldagem e manuseio rotineiro em moldes que não possuem função estrutural primária.

Portanto, apoiada pelas análises de variância (ANOVA) e testes de comparação de médias, conclui-se que a formulação GR20 calcinada a 150 °C por 2 horas apresenta o melhor balanço entre trabalhabilidade, desempenho mecânico e manutenção da capacidade de absorção. Somando-se a isso o excelente custo-benefício energético do seu ciclo térmico, os resultados validam o primeiro objetivo específico da pesquisa, atestando a viabilidade técnica da reinserção do Gesso Reciclado no ciclo produtivo do ateliê como substituto parcial para a confecção de moldes híbridos.

## 4.2 Gesso Reciclado em Massas Cerâmicas

Esta seção apresenta os resultados da caracterização de 20 formulações de argila, investigando o impacto da Celulose, Chamote e Gesso Reciclado (GR) na estabilidade dimensional e porosidade do corpo cerâmico.

### 4.2.1 Análise da Estabilidade Dimensional e Retração Linear

Os resultados da retração linear, medidos do estado úmido até a queima de biscoito (Tabela 13), revelaram tendências complexas influenciadas tanto pelos aditivos quanto pela variabilidade do processo de ateliê:

- **Chamote e gesso como estabilizadores:** Contrariando parcialmente a expectativa de que todos os agregados (Celulose e Chamote) controlariam a retração, a formulação P12 (Chamote Alto + GR Alto) apresentou o menor valor de retração total (10,24%), indicando que a combinação de altas concentrações de GR e chamote é um método eficaz para estabilizar a massa. Da mesma forma, P6 (GR Alto) obteve retração inferior ao controle (11,37% vs. 11,50% de P0), sugerindo que o GR, mesmo em granulometria grosseira, pode atuar como um agregado estabilizador.
- **Impacto da celulose e da água:** Formulações com celulose (P1, P2) e a placa funcional P13 (com 20% de Celulose) apresentaram retração total significativamente maior que o controle P0, sendo P13 o pior desempenho (15,86%). Este achado contradiz a função estabilizadora da celulose, e pode ser atribuído a alguns fatores críticos do processo: (1) As massas com celulose demandaram maior quantidade de água para serem preparadas. Como o teor de umidade dos corpos de prova não foi uniformizado como ponto de partida, as massas com mais água podem ter sofrido uma maior retração na secagem. (2) A variabilidade do processo, incluindo a secagem ao ar livre sem pesos sobre os CPs e a interferência do ar condicionado, pode ter causado uma secagem não uniforme, potencializando empenamentos.

- **Memória da argila e empenamento:** A placa funcional P13 (e outras formulações) sofreu empenamento significativo. Esta deformação é decorrente da "memória" da argila durante o manuseio e ao estresse na modelagem. Além disso, a presença do chamote extra-grosso na P13 distorceu as arestas durante o corte com a faca, possivelmente introduzindo tensões e fragilizando o CP, o que pode também ter aumentado a suscetibilidade ao empenamento.

Tabela 13 – Retração linear das argilas formuladas

Argila	Retração na secagem	Retração pós biscoito
P0	5.60	5.90
P1	6.67	6.90
P2	7.53	7.93
P3	7.47	7.80
P4	6.03	6.43
P5	6.27	6.40
P6	5.60	5.77
P7	5.93	6.13
P8	5.80	6.07
P9	6.07	6.53
P10	5.87	6.13
P11	5.57	5.93
P12	4.97	5.27
P13	7.73	8.13

Fonte: A autoria própria.

#### 4.2.2 Absorção de Água (AA)

A Absorção de Água (AA) foi medida após a queima de biscoito para determinar a porosidade da matriz. Conforme a Tabela 14, os resultados sugerem que a adição de Celulose (F) é o agente mais eficaz na criação de porosidade, pois sua queima deixa vazios na massa.

O índice de absorção de água de 28,26% obtido pela formulação P13 após a queima de biscoito demonstra boa adequação técnica para a fabricação da placa de

reciclagem de argila. Essa elevada porosidade é um requisito fundamental para otimizar a sucção capilar da água da barbotina, acelerando o processo de secagem. Paralelamente, observou-se que a incorporação do Gesso Reciclado (GR) nas formulações P5 e P6 apresentou um impacto negligenciável na absorção, indicando que o resíduo não interfere de forma negativa na funcionalidade da peça.

Tabela 14 – Absorção de água das argilas formuladas

<b>Argila</b>	<b>Aditivos</b>	<b>Absorção após biscoito (%)</b>
P0	Argila sem aditivos	17.61
P1	Celulose (5%)	21.28
P2	Celulose (20%)	26.69
P3	Chamote (10%)	18.92
P4	Chamote (20%)	20.73
P5	GR (5%)	17.75
P6	GR (10%)	17.76
P7	Celulose (5%) + Chamote (10%)	22.44
P8	Celulose (5%) + GR (5%)	20.60
P9	Celulose (5%) + Chamote (10%) +GR (5%)	21.60
P10	Celulose (20%) + Chamote (20%) +GR (10%)	26.82
P11	Chamote (10%) +GR (5%)	18.36
P12	Chamote (20%) +GR (10%)	19.72
P13	Celulose (20%) + Chamote extra grosso (20%)	28.26

Fonte: Autoria própria.

#### *4.2.3 Análise da Variação Granulométrica do Chamote*

Esta subseção apresenta os resultados dos ensaios de retração e absorção de água para as massas com diferentes frações granulométricas de chamote. O objetivo era investigar a influência do tamanho da partícula na estabilidade dimensional e porosidade da argila.

A Tabela 15 apresenta os resultados de retração para as formulações que variaram apenas o tamanho e a quantidade do chamote.

Tabela 15 – Retração linear das argilas formuladas com variações de chamote

<b>Argila</b>	<b>Granulometria</b>	<b>Adição (%)</b>	<b>Retração pós biscoito (%)</b>
P3A	Média (0,425 ~ 0,84 mm)	10	5.70
P3B	Grossa (0,84 ~ 1 mm)	10	6.03
P3C	Extra-Grossa (1 ~ 2 mm)	10	6.23
P4A	Média (0,425 ~ 0,84 mm)	20	5.70
P4B	Grossa (0,84 ~ 1 mm)	20	6.00
P4C	Extra-Grossa (1 ~ 2 mm)	20	5.63

Fonte: Autoria própria.

Nas formulações com 5% de chamote, aquelas com chamote mais grosso (P3B e P3C) apresentaram retração pós-biscoito ligeiramente maior do que aquelas com chamote médio (P3A), o que contraria o resultado esperado, visto que a partícula maior deveria resistir mais ao encolhimento. Esta anomalia pode ser um indicativo novamente de uma diferença nas umidades das argilas e, conseqüentemente, na secagem.

O comportamento na dose alta de chamote (20%) mostrou-se mais uniforme, sendo que a formulação contendo chamote extra-grosso apresentou a menor retração pós-biscoito. Este resultado indica a possibilidade do uso de partículas maiores em doses elevadas (20%) para otimizar a estabilidade dimensional, uma vez que o maior volume de agregado rígido minimiza a tendência de empenamento da argila base.

A Tabela 16 mostra a absorção de água, que reflete a porosidade da matriz, diretamente relacionada à capacidade de secagem. O aumento da Absorção de Água (AA) seguiu uma tendência clara em função da quantidade e do tamanho da partícula, em que o aumento da dose ou da granulometria do chamote implica um aumento da absorção. Os resultados sugerem que o uso de 20% de chamote pode otimizar a absorção da placa de reciclagem.

Tabela 16 – Absorção de água das argilas formuladas com variações de chamote

<b>Argila</b>	<b>Absorção após biscoito (%)</b>
P3A	19.21
P3B	19.44
P3C	19.75
P4A	21.66
P4B	21.40
P4C	21.04

Fonte: Autoria própria.

#### *4.2.4 Análise Estética e Comportamento na Queima*

A análise estética e o monitoramento do comportamento das massas durante a queima trouxeram conclusões importantes sobre a viabilidade visual e técnica das formulações. Não foi observada variação significativa na coloração final da cerâmica entre as diferentes massas, indicando que a adição do gesso reciclado (GR) não impactou o pigmento de ferro presente na argila vermelha de base. As peças que continham chamote apresentaram, como esperado, um aspecto superficial mais rugoso e texturizado, diretamente proporcional ao tamanho e à quantidade do agregado. A presença do GR adicionou pontos brancos discretos visíveis na superfície do corpo cerâmico (Fig. 26), um efeito de contraste sutil que pode ser valorizado esteticamente. Adicionalmente, não apareceram defeitos como explosões, trincas ou bolhas nos corpos de prova, indicando uma estabilidade térmica dos aditivos.

Figura 26 – Pontos brancos de GR na superfície da massa cerâmica



Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.5 Viabilidade de Utilização de GR em Massas Cerâmicas

A viabilidade da incorporação do gesso reciclado (GR) nas massas cerâmicas foi determinada pela síntese dos resultados obtidos nos ensaios de estabilidade dimensional, porosidade e comportamento na queima. Os resultados da retração linear (Tabela 13) indicaram que o GR e o Chamote podem ser agentes eficazes na estabilização da massa. As formulações P6 (GR Alto) e P12 (Chamote Alto + GR Alto) apresentaram as menores retrações totais (11,37% e 10,24%, respectivamente), sugerindo que os agregados rígidos controlam o encolhimento de forma superior à argila pura (P0 - 11,50%). No entanto, o uso da Celulose em altas doses (P13 - 15,86%) comprometeu a estabilidade dimensional, causando empenamento. Esta falha foi atribuída à maior demanda de água e à falta de controle durante a secagem.

Em termos de funcionalidade e porosidade, a análise de Absorção de Água (Tabela 14) indicou a Celulose como o principal agente. A formulação P13 (Placa Funcional), apesar de sua instabilidade dimensional, atingiu a máxima porosidade (28,26%), o que é um resultado funcionalmente ideal para a absorção de água em uma placa de reciclagem. O Gesso Reciclado (GR) isoladamente (P5, P6) teve um efeito neutro na porosidade, o que é positivo, pois não impede a função absorvente da massa.

Diante dos achados, a viabilidade física da utilização do Gesso Reciclado (GR) em massas cerâmicas concentra-se na aplicação em teores moderados (5% a 10%). Nesta análise da queima sem esmaltação, o GR utilizado foi aquele calcinado a 900 °C, atuando como um agregado inerte e estabilizador, em contraste com as calcinações de 150 °C e 200 °C utilizadas para o gesso aglomerante. O material demonstrou ser um aditivo compatível com o ciclo de temperatura, pois não gerou defeitos estruturais como explosões, trincas ou bolhas. Ele atuou primariamente no controle de retração e, esteticamente, adicionou um efeito sutil de pontos brancos discretos na superfície queimada.

Do ponto de vista estritamente estrutural, sua incorporação estaria validada. No entanto, é fundamental ressaltar que a ausência de defeitos visíveis nesta queima de biscoito não necessariamente descarta a decomposição do sulfato e a consequente liberação de dióxido de enxofre ( $SO_2$ ). Como as peças não possuíam cobertura vítrea, a porosidade inerente à argila pode ter permitido a dissipação livre e imperceptível do gás. Essa dinâmica termoquímica, que atua como um fator limitante e de segurança para a queima do GR no ateliê, será desvendada e amplamente discutida na seção seguinte, referente aos ensaios de esmaltação.

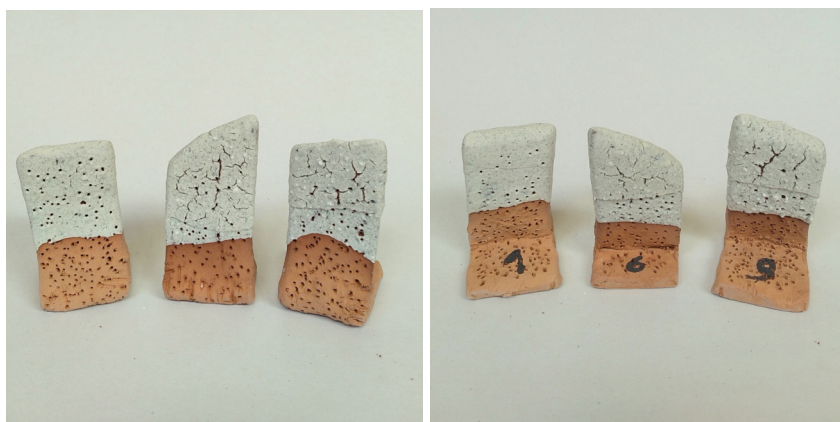
### **4.3 Gesso Reciclado em Formulações de Esmaltes Cerâmicos**

A investigação da incorporação do Gesso Reciclado (GR), calcinado a 900 °C e com granulometria máxima de 2 mm, em formulações de esmaltes, buscou analisar seu impacto na fusão, na estética e na segurança do processo de queima.

#### **4.3.1 Esmaltes Cratera**

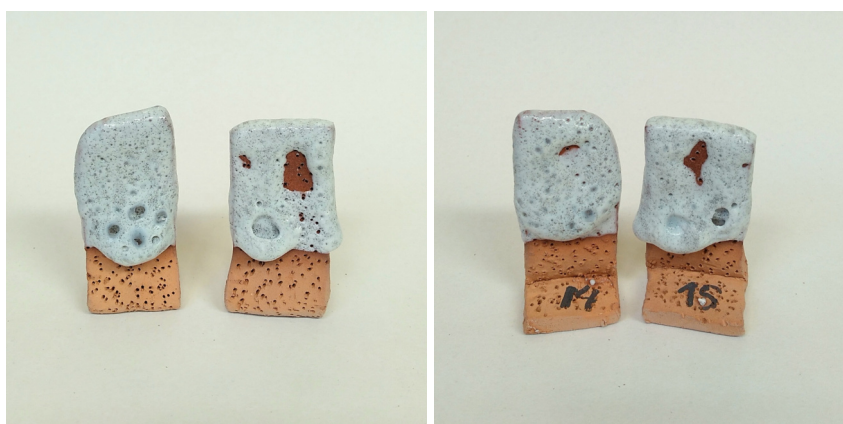
Os testes com os esmaltes cratera (*underglaze* e *top glaze*) focaram no desenvolvimento de uma textura orgânica para a peça demonstrativa. Os *underglazes* U1, U2, e U3 isolados não fundiram, produzindo superfícies ásperas e com rachaduras (Fig. 27), comprovando sua função como camada de suporte. O *top crater glaze* (T1) puro apresentou descolamento e excessivo borbulhamento junto a um grande aumento de volume, mas com poucas crateras abertas de fato, devido ao gás liberado ter ficado retido no esmalte (Fig. 28). Sua cor é de um cinza azulado claro e brilhante.

Figura 27 – Esmaltes U1 puro (nº1), U2 com 5% de GR (nº6) e U3 com 10% de GR (nº9)



Fonte: Autoria própria.

Figura 28 – Esmalte T1 puro (nº14) e com adição de 5% de GR (nº15)

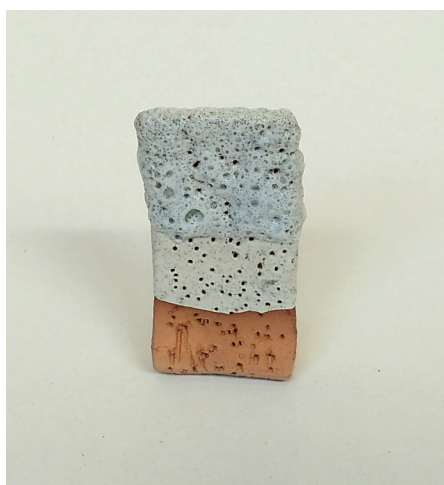


Fonte: Autoria própria.

O sucesso estético e funcional foi alcançado com o sistema de combinação de *Underglaze* (U2) com o *Top Glaze* (T1), que reduziu o descolamento e estabilizou o *top glaze*, resultando em crateras mais aparentes e homogêneas. O GR (granulometria <2 mm) foi testado a 5%, não causou prejuízo estético e permaneceu imperceptível, o que valida sua incorporação para o efeito de texturização.

Sem aditivos de cores, a cor do *top glaze* sobre o *underglaze* manteve-se cinza azulada clara e brilhante, sobreposta a um branco amarelado da base (Fig. 29). Já a introdução da coloração A (titânio + zinco) produziu um esmalte amarelado claro acetinado, enquanto a coloração B (titânio + ferro vermelho) produziu um esmalte amarelado com regiões mais escuras/acinzentadas.

Figura 29 – Esmalte T1 puro sobre o esmalte U2 puro



Fonte: Autoria própria.

As colorações A e B aumentaram a quantidade de crateras abertas em relação ao esmalte puro, intensificando o efeito. Além disso, as cores influenciaram a morfologia: a coloração A (Titânio + Zinco) gerou crateras de tamanho mais heterogêneo, enquanto a coloração B (Titânio + Ferro Vermelho) produziu crateras de tamanho mais uniforme.

A combinação A sobre A (*Underglaze A sobre Top Glaze A*) apresentou o menor contraste. A combinação B sobre A produziu os melhores resultados estéticos. A Figura 30 ilustra as diferentes combinações de colorações.

Figura 30 – Combinações de cores de U2 e T1 (esq.): A sobre A (nº35), B sobre A (nº36), B sobre B (nº37) e A sobre B (nº38). Mesmas combinações com adição de 5% de GR (dir.)



Fonte: Autoria própria.

### 4.3.2 Esmaltes Lisos

Em contraste, os testes com as variações de esmalte liso (L1, L2, L3), que visavam um acabamento uniforme, revelaram problemas de estabilidade e reatividade. A formulação L3 (mais viscosa) demonstrou maior estabilidade, mas as formulações L1 e L2 escorreram em excesso. Os esmaltes base (Fig. 31) apresentaram uma cor branca opaca (matificada) com craquelamento sutil (aceitável esteticamente).

Figura 31 – Esmaltes L1 (nº21), L2 (nº22) e L3 (nº23) puros



Fonte: Autoria própria.

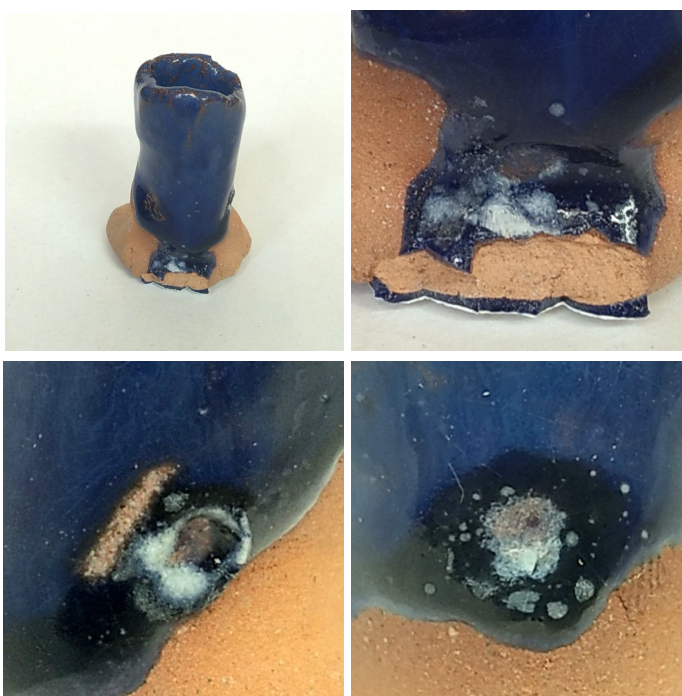
A inclusão do GR e dos colorantes revelou o risco de reatividade: a coloração C (Cromo + Cobre): Produziu um esmalte verde opaco e demonstrou borbulhamento e gaseificação intensa onde o GR foi adicionado, criando um efeito cratera não esperado (Fig. 32). A coloração D (Zinco + Cobalto), que resultou em um azul brilhante, apresentou defeitos de manchas esbranquiçadas com a adição de GR (Fig. 33). Na massa cerâmica contendo GR, observou-se um pequeno descolamento do esmalte azul (sem GR) em pontos onde havia GR na superfície (Fig. 34), indicando que o GR pode atuar como agente de falha.

Figura 32 – Esmalte L2 com coloração C e 5% de GR, com defeito de borbulhamento



Fonte: Autorial própria.

Figura 33 – Esmalte L2 com coloração D e 5% de GR, e os defeitos em detalhes



Fonte: Autorial própria.

Figura 34 – Detalhes dos descolamentos do esmalte azul sobre massa com GR



Fonte: Autorial própria.

Este borbulhamento em formulações lisas é o principal indicativo de degradação do sulfato de cálcio e da provável liberação de dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) durante a queima, o que representa um risco ambiental e de danos às resistências do forno.

#### *4.3.3 Viabilidade de Utilização de GR em Esmaltes (e Massas Cerâmicas)*

A análise dos resultados estéticos positivos do esmalte cratera e dos achados críticos de degradação nos esmaltes lisos leva a uma conclusão de viabilidade estritamente pautada na segurança do processo. Embora a incorporação do GR seja possível do ponto de vista técnico e estético, a evidente liberação de dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), sinalizada pelo intenso borbulhamento na formulação lisa (Fig. 32), representa um risco severo de corrosão aos elementos de aquecimento do forno elétrico.

Essa constatação, inclusive, impõe uma reavaliação crítica da viabilidade do GR nas massas cerâmicas, abordada na seção 4.2.5. É prudente presumir que a volatilização do enxofre possa ter ocorrido também durante a queima de biscoito, hipótese em que a alta porosidade da argila teria permitido a dissipação imperceptível do gás. A aplicação do esmalte, ao formar uma barreira vítrea impermeável, aprisionou o gás e atuou como um marcador visual da decomposição térmica do sulfato de cálcio. Neste sentido, é plausível a hipótese de que, se fosse aplicado um esmalte que se fundisse na temperatura da queima de biscoito, o mesmo efeito de borbulhamento poderia ocorrer.

Assim, por uma questão de extrema cautela e preservação de maquinário, a conclusão da seção 4.2.5 é complementada: a utilização do Gesso Reciclado, tanto como agregado na massa cerâmica quanto na formulação de esmaltes, é fortemente desaconselhada em ambientes de ateliê, restringindo-se a sua aplicação a processos industriais com exaustão controlada.

#### **4.4 Gesso Reciclado no Protótipo de Placa Funcional para Reciclagem de Argila**

O processo de confecção detalhado na seção de métodos culminou na materialização bem-sucedida de dois protótipos em escala real: uma placa experimental, desenvolvida com a argila de maior absorção e Gesso Reciclado (gesso calcinado a 150 °C por 2 horas, substituindo 20% do GC), e uma placa de controle, confeccionada com a argila padrão do laboratório (sem aditivos) combinada ao Gesso Comercial (GC). Do ponto de vista construtivo, os resultados foram satisfatórios, uma vez que ambas as peças atingiram a cura completa mantendo a integridade estrutural, sem apresentar trincas, empenamentos ou esfarelamento nas bordas. Tal fato demonstra a viabilidade técnica da moldagem de placas de grandes dimensões utilizando o resíduo em paridade com o material virgem.

Contudo, durante o manuseio das peças, a placa de controle apresentou uma falha de aderência que resultou no descolamento entre o bloco de gesso e a base cerâmica. A partir deste evento, estabelece-se uma diretriz de melhoria para a confecção de futuros equipamentos deste tipo, com a recomendação de que sejam feitas ranhuras na face da argila que receberá o vazamento da pasta, intervenção que deve ser preferencialmente executada enquanto a massa cerâmica se encontra no estágio de ponto de couro. Essa texturização superficial visa criar pontos de ancoragem mecânica, otimizando a aderência entre a cerâmica e o gesso.

Como desdobramento prático e contribuição direta ao local de estudo, os protótipos finalizados foram incorporados à infraestrutura do Laboratório de Modelagem II do IFSC, sendo disponibilizados para uso contínuo juntamente do bloco de reciclagem de gesso já existente no espaço. O intuito dessa destinação é permitir que a eficiência de absorção capilar e a durabilidade mecânica das novas placas sejam avaliadas e comparadas entre si, e também em relação ao equipamento preexistente, de forma empírica e continuada, acompanhando a rotina real de operação, demanda e descarte do laboratório.

#### **4.5 Incorporação do Gesso Reciclado no Processo Produtivo da Peça Demonstrativa**

Para a produção da peça demonstrativa, o gesso reciclado (GR) foi incorporado à massa cerâmica da cúpula, ao esmalte de efeito cratera aplicado sobre ela e aos moldes de gesso utilizados como auxílio na modelagem. As bases foram confeccionadas em argila vermelha sem adição de GR e não receberam esmaltação, apenas engobe comercial colorido.

Neste ponto, é imperativo reiterar que, embora as análises da seção 4.3.3 tenham desaconselhado fortemente a queima de formulações com GR, optou-se por manter a sua aplicação nesta peça em caráter estritamente experimental. O objetivo foi materializar uma prova de conceito: demonstrar que, abstraindo-se o fator limitante dos efeitos nocivos da liberação de dióxido de enxofre, a incorporação do resíduo é perfeitamente viável dos pontos de vista técnico, tátil e estético.

Sob essa ótica, os resultados esperados foram plenamente atingidos. O molde com GR auxiliou na conformação de maneira satisfatória, a massa cerâmica da cúpula não apresentou defeitos estruturais e o esmalte cratera integrou o resíduo gerando a textura desejada. A luminária finalizada, batizada de *Luminária Coral*, está ilustrada na Figura 35 com as suas duas variações de base. A Figura 36 apresenta a peça em funcionamento, iluminada por uma fita de LED posicionada no interior de cada base.

Figura 35 – Luminária Coral com as diferentes bases



Fonte: Autoria própria.

Figura 36 – Luminária Coral em funcionamento



Fonte: Autoria própria.

Ao longo do processo de modelagem, elaboraram-se outras peças em formato de esponja do mar. Essa etapa serviu tanto como um teste prático de conceito, prévio à modelagem da cúpula, quanto como uma alternativa para o aproveitamento da argila residual. Esse aproveitamento de material culminou na criação de um pequeno conjunto de peças decorativas, denominado *Coleção Porífera*, cujo resultado pode ser observado na Figura 37.

Figura 37 – Coleção Porífera



Fonte: Autoria própria.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho cumpriu seu objetivo principal de investigar a viabilidade do reaproveitamento de resíduos de gesso gerados no Laboratório de Modelagem II - Cerâmica do IFSC. A escolha pelo termo reincorporação no título desta pesquisa reflete o compromisso com a Economia Circular de ciclo fechado, onde o resíduo não é tratado como um aditivo externo, mas como um insumo que retorna ao seu sistema de origem. Assim, propuseram-se caminhos para sua reinserção no ciclo produtivo através de uma abordagem de Design. A aplicação do método MD3E híbrido mostrou-se fundamental para o desenvolvimento da pesquisa, pois sua flexibilidade permitiu as adaptações metodológicas necessárias diante das limitações de equipamento e das características singulares do material reciclado, transformando obstáculos técnicos em decisões de projeto fundamentadas.

Em relação ao reaproveitamento do gesso para novos moldes, verificou-se que o processo de reciclagem artesanal é tecnicamente viável, embora resulte em um material com maior demanda de água para atingir a fluidez ideal. A análise estatística comprovou que a substituição parcial do gesso comercial pelo reciclado é possível e segura, despontando a proporção de 20% (GR20) como a mais eficiente. Dentre as variáveis de processamento térmico testadas, o tratamento a 150 °C por 2 horas consolidou-se como o parâmetro ideal, por entregar o melhor agrupamento de desempenho mecânico aliado à maior eficiência energética e sustentabilidade. Embora o ajuste obrigatório da razão água/gesso reduza a resistência mecânica final abaixo do mínimo normativo, a queda manteve-se dentro da tolerância de projeto estipulada. Adicionalmente, atestou-se que o material reciclado mantém sua taxa de absorção de água praticamente inalterada, mostrando-se estrutural e funcionalmente apto para aplicações não estruturais, como moldes de colagem de barbotina.

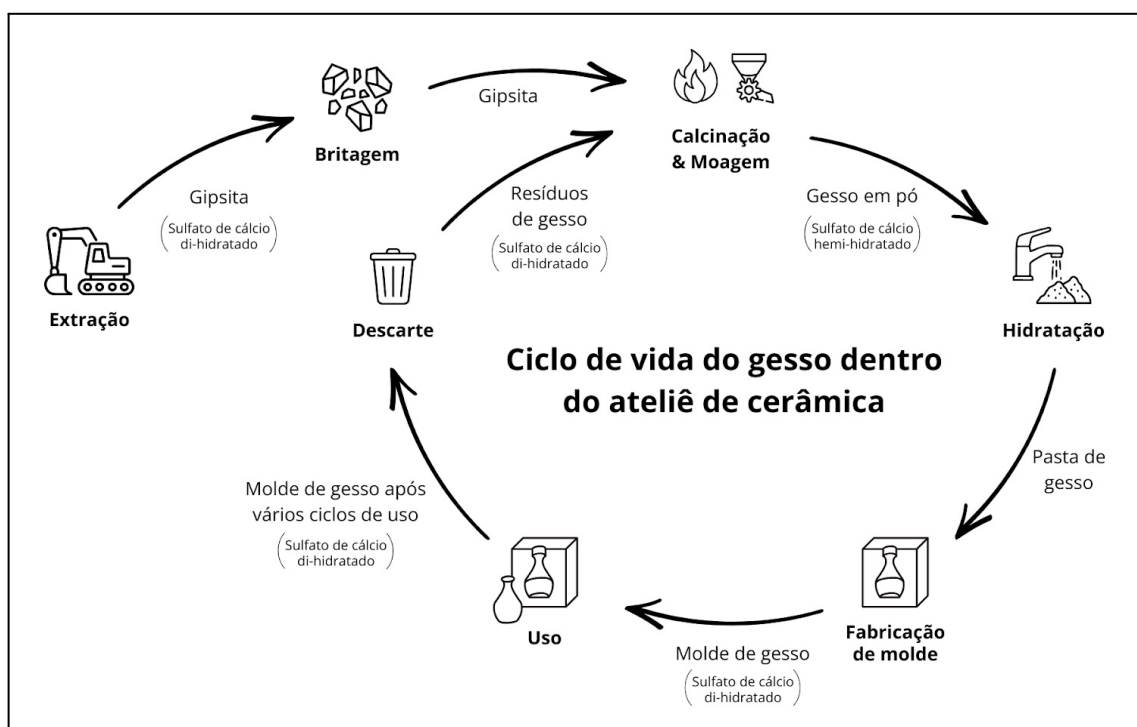
Quanto à incorporação do resíduo nas etapas de queima (massas e esmaltes cerâmicos), o estudo revelou uma dicotomia crítica entre a viabilidade física e a segurança química. Inicialmente, o Gesso Reciclado atuou bem como agregado físico na argila para o controle de retração, e integrou-se esteticamente aos esmaltes de efeito "cratera". No entanto, os testes de esmaltação com esmalte liso atuaram como um marcador visual de alerta, revelando intenso borbulhamento. Este fenômeno evidenciou a decomposição térmica do sulfato de cálcio e a consequente

liberação de dióxido de enxofre ( $SO_2$ ).

Diante desta evidência, a pesquisa conclui que, mesmo havendo integridade estrutural e estética, a utilização de resíduos de gesso incorporados em massas cerâmicas e esmaltes é fortemente desaconselhada para ateliês com fornos elétricos convencionais. Os riscos iminentes de corrosão severa aos elementos de aquecimento do maquinário, somados aos riscos de toxicidade e emissão atmosférica, determinam que tal prática deve ser restrita a ambientes industriais dotados de sistemas de exaustão adequados.

Por fim, este trabalho contribui para a área do Design Sustentável ao demonstrar que a economia circular em pequena escala (ateliê) exige um profundo entendimento das limitações físico-químicas dos materiais. As variações intrínsecas ao material reciclado não inviabilizam seu uso, mas exigem que o designer adapte o processo às novas propriedades. Deste modo, abstraindo-se as aplicações de queima devido aos seus efeitos nocivos, a recomendação definitiva para os ateliês é que o reaproveitamento do resíduo foque na confecção de novos moldes. Para tanto, o gesso calcinado a 150 °C por 2 horas pode ser misturado ao pó comercial na proporção de até 20%, ajustando-se o volume de água para garantir a trabalhabilidade. A Figura 38 ilustra o ciclo de vida proposto para a reinserção segura do gesso no processo produtivo cerâmico de pequena escala.

Figura 38 – Proposta de ciclo de vida do gesso no processo produtivo cerâmico



Fonte: Autoria própria.

## 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como desdobramento natural desta pesquisa, sugerem-se as seguintes frentes de trabalho para aprofundar o conhecimento sobre a reciclagem de gesso em pequena escala:

1. Desenvolvimento de Material Instrucional (Cartilha de Boas Práticas): A elaboração de uma cartilha técnica e visual voltada para ceramistas, estudantes e gestores de ateliês. Este material deve sistematizar o processo validado nesta pesquisa, oferecendo instruções claras sobre a gestão do resíduo de gesso (do descarte à reincorporação). A cartilha deve abranger protocolos de coleta e segregação para evitar contaminação, métodos de armazenamento seguro (para evitar umidade e odores), e o passo a passo do beneficiamento artesanal (moagem e calcinação em forno elétrico), culminando nas receitas de misturas (GR20) para a confecção de novos moldes. O objetivo é democratizar a técnica e fomentar a autonomia dos ateliês na gestão de seus resíduos.

2. Otimização do Processo de Moagem em Escala de Ateliê: Investigação de métodos ou adaptações de equipamentos de baixo custo (como moinhos de bolas improvisados ou trituradores manuais modificados) que permitam obter uma granulometria mais fina e uniforme do gesso reciclado. O objetivo seria aumentar a densidade aparente do pó, aproximando-a do gesso comercial, o que reduziria a demanda de água na mistura e poderia melhorar significativamente a resistência mecânica final.
3. Estudo de Longa Duração (Ciclo de Vida dos Moldes Reciclados): Realização de testes de durabilidade e envelhecimento com os moldes produzidos com a mistura GR20. Seria relevante monitorar o desgaste da superfície, a manutenção da taxa de absorção ao longo de múltiplos ciclos de uso (colagens) e a resistência ao manuseio contínuo em comparação com moldes de gesso virgem, para validar a vida útil real do produto reciclado.
4. Design de Equipamentos para o Ateliê Sustentável: Aprofundamento no desenvolvimento da placa funcional de reciclagem de argila (protótipo P13), explorando variações modulares, sistemas de encaixe mais complexos e diferentes composições cerâmicas para a barreira porosa. Este estudo poderia evoluir para o design de uma linha de equipamentos auxiliares de ateliê feitos de compósitos de resíduos.

## REFERÊNCIAS

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **ABNT NBR ISO 10545-3: Placas cerâmicas Parte 3: Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 13207: Gesso para construção civil**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 12127 (MB-3468): Gesso para construção civil - Determinação das propriedades físicas do pó**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 12128 (MB-3469): Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas da pasta**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991a.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 12129 (MB-3470): Gesso para construção - Determinação das propriedades mecânicas**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991b.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ALMEIDA, Flávia Leme de. **Mulheres recipientes: recortes poéticos do universo feminino nas artes visuais**. São Paulo: Editora UNESP, 2010.

ALMEIDA, Kelson Silva de. **Desenvolvimento de adoquim cerâmico com resíduos de gesso e granito**. 2019. 141 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2019.

ALMEIDA, Kelson Silva de; SOARES, Roberto Arruda Lima; MATOS, José Milton Elias de; ALMEIDA, Camila de Souza Moura; ALMEIDA, Joelma Silva de. Incorporação de resíduo de gesso em formulação para adoquim cerâmico. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 25, n. nspe, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/cerind.2020.005>. Acesso em: 20 maio 2022.

ALMEIDA, Kelson Silva de; SOARES, Roberto Arruda Lima; MATOS, José Milton Elias de. Efeito de resíduos de gesso e de granito em produtos da indústria de cerâmica vermelha: revisão bibliográfica. **Revista Matéria**, [s. l.], v. 25, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0893>. Acesso em: 20 maio 2022.

ALTROCK, Priscila Von. **Design em revestimento cerâmico industrial de Santa Catarina: mapeamento e diagnóstico**. 1998. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

ARAGÃO JÚNIOR, Wilson Ramos *et al.* Potencialidades do uso de resíduos de gesso da construção civil para correção do solo em culturas agrícolas *In*: SILVA, Thamirys Suelle da (org.); MARQUES, Mirella Maria Nóbrega (org.); EL-DEIR, Soraya Giovanetti (org.). **Desmaterialização dos resíduos sólidos: estratégias para a sustentabilidade**. 1. ed. Recife: EDUFRPE, 2020. p. 545–556. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/342229030\\_Potencialidades\\_do\\_uso\\_de\\_residuos\\_de\\_gesso\\_da\\_construcao\\_civil\\_para\\_correcao\\_do\\_solo\\_em\\_culturas\\_agricolas](https://www.researchgate.net/publication/342229030_Potencialidades_do_uso_de_residuos_de_gesso_da_construcao_civil_para_correcao_do_solo_em_culturas_agricolas). Acesso em: 1 maio 2025.

AYELE, Tesfaye; BALASUBRAMANIAN, Nedumaran. Recycling of used plaster of paris moulds for building materials industry *In*: MATANI, Ashok G. (org.). **Waste Management and Utilization Techniques [International Edition]**. Delhi: International Research Publication House, 2017. v. 1, p. 261–286. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Mohamed-El-Khateeb-3/publication/319631825\\_Environmental\\_pollution\\_prevention\\_via\\_heavy\\_metal\\_removal/links/59f89bc9458515547c269ca2/Environmental-pollution-prevention-via-heavy-metal-removal.pdf#page=273](https://www.researchgate.net/profile/Mohamed-El-Khateeb-3/publication/319631825_Environmental_pollution_prevention_via_heavy_metal_removal/links/59f89bc9458515547c269ca2/Environmental-pollution-prevention-via-heavy-metal-removal.pdf#page=273). Acesso em: 1 maio 2025.

BALSIGER, Carol Hilda. **Three basic stoneware glazes for cone six oxidation which may be changed in color or texture by the addition of common materials such as sand, clay soil, crushed gravel, or metal filings**. 1968. 23 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Educação) - Portland State University, Portland, 1968.

BARDELLA, Paulo Sérgio. **Análise das propriedades de pastas de gesso de construção reciclado**. 2011. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 431, de 24 de maio de 2011. Estabelece nova classificação para o gesso. Diário Oficial da União nº 99, p. 123, 25 mai. 2011. Disponível em: <https://www.ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/Conama-431-11-Alterao-art.-3-da-Conama-307.pdf>. Acesso em: 24 maio 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União nº 136, p. 95-96, 5 jul. 2002. Disponível em: [https://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=305](https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=305). Acesso em: 24 maio 2025.

BRITO, J. R.; RAMOS, M. M. S.; MELO, F. J. S. A.; ALTIDIS, M. E. D.; STEFANUTTI, R. Avaliação do Resíduo de Gesso Proveniente de Peças Pré-Moldadas no Processo Produtivo por Meio da Reciclagem *In*: 63º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2019, Bonito. **Anais [...]**. São Paulo: ABCERAM, 2019. p. 804–811. Disponível em: <https://www.metallum.com.br/63cbc/anais/PDF/06-057.pdf>. Acesso em: 1 maio 2025.

CABRAL JUNIOR, Marsis; TANNO, Luiz Carlos; MOTTA, José Francisco Marciano; RUIZ, Mauro da Silva; COELHO, José Mário. Panorama da indústria cerâmica de sanitários no Brasil. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 15, n. 5–6, p. 12–18, 2010. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657437f8c9d6e028b4792>. Acesso em: 20 maio 2022.

CAMARINI, Gladis; LIMA, Karla Danielle dos Santos; PINHEIRO, Sayonara M. M. Investigation on gypsum plaster waste recycling: an eco-friendly material. **Green Materials**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 104–112, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/jgrma.15.00016>. Acesso em: 1 maio 2025.

CAMARINI, Gladis; PINHEIRO, Sayonara M. M. Characteristics of Gypsum Recycling in Different Cycles. **International Journal of Engineering and Technology**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 215–218, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.7763/IJET.2015.V7.794>. Acesso em: 1 maio 2025.

CATALIN, Saitis; DANIELA, Manea Lucia; MONICA, Plesa Luminita; RALUCA, Saitis Lavinia. Recycling Plaster Waste as a Substitute for Aggregates in Obtaining Plastering Mortars. **Buildings**, [s. l.], v. 13, n. 2, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings13020491>. Acesso em: 1 maio 2025.

CAVALCANTE, Claudio Felipe Boer; MIRANDA, Antonio Claret Pereira de. Estudo sobre alternativas para gestão dos resíduos de gesso oriundos da construção civil *In: VII ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA CESUMAR*, 2011, Maringá. **Anais Eletrônicos [...]**. Maringá: CESUMAR, 2011. Disponível em: <https://www.unicesumar.edu.br/epcc-2011/trabalhos/>. Acesso em: 1 maio 2025.

CAVALCANTE, Helena Beatriz Gonçalves; RODRIGUES, Maria Eduarda; SANTANA, Clóvis. Perspectivas sustentáveis do gesso reciclado: Uma análise acerca de práticas ecológicas visando a preservação ambiental *In: III SIMPÓSIO NACIONAL DE GESTÃO E ENGENHARIA URBANA: SINGEORB*, 2021, Maceió. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2021. p. 187–192. Disponível em: <https://doi.org/10.46421/singeurb.v3i00.914>. Acesso em: 1 maio 2025.

CERAMIC ARTS DAILY. **33 tried & true glaze recipes**. 2. ed. [S. l.]: Ceramic Publications Company, 2013.

CIPRIANO, Pamela Bento; NEVES, Ana Vitória Freire; FERRAZA, Andréa de Vasconcelos. Obtenção de compósitos cerâmico contendo resíduo de gesso, argillito e argila proveniente da extração de gipsita em Araripina no semiárido pernambucano. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 40–45, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/cerind.2019.017>. Acesso em: 20 maio 2022.

CIPRIANO, Pamela Bento; REZENDE, Rafaela Tatianne Oliveira de; FERRAZA, Andréa de Vasconcelos. Produção de cerâmica vermelha utilizando argila da mineração de gipsita e resíduo de gesso. **Acta Brasiliensis**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 25–29, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.22571/2526-4338145>. Acesso em: 20 maio 2022.

CUNHA, Tulio Concolato. **Fabricação de um Cadinho Pelo Método de Colagem de Barbotina**. 2019. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2019.

DAMASCENO, Maria Zelândia Barbosa. **Reciclagem de resíduos de gesso de revestimento: uma alternativa tecnológica de minimização dos impactos ambientais na construção civil**. 2013. 108 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) - Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

EL-BARBARY, A. A.; NHABIH, Hussein Talab; SALMAN, Marwa Marza. Investigations on Recycling Methods of Gypsum Plaster Waste (Review). **Journal of University of Babylon**, [s. l.], v. 31, n. 3, p. 66–75, 2023. Disponível em: <https://www.journalofbabylon.com/index.php/JUBES/article/view/4615>. Acesso em: 1 maio 2025.

ERBS, Alexandre. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas do gesso reciclado proveniente de chapas de gesso acartonado e gesso comum ao longo dos ciclos de reciclagem**. 2016. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Curitiba, 2016.

FERNANDES, Carlos Alberto Hermann. **Reciclagem de resíduos de gesso de construção para uso em revestimentos, placas de forro e molduras de acabamento**. 2016. 236 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

FERREIRA, Sara B.; DOMINGUES, Paulo C.; SOARES, Silvete M.; CAMARINI, Gladis. Recycled Plaster and Red Ceramic Waste Based Mortars. **International Journal of Engineering and Technology**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 209–2014, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.7763/IJET.2015.V7.793>. Acesso em: 1 maio 2025.

FRADE, José Manuel Couceiro Barosa; FERROLI, Paulo Cesar Machado. Contributos para a definição do perfil de um designer cerâmico tendo em conta o estado da arte da tecnologia e da prática do design industrial *In*: ENSUS 2022 - X ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO, 2022, Marabá. **Anais Eletrônicos [...]**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/245006>. Acesso em: 1 maio 2025.

GERALDO, Rodrigo H.; PINHEIRO, Sayonara M. M.; SILVA, Jefferson S.; ANDRADE, Heloysa M.C.; DWECK, Jo; GONÇALVES, Jardel P.; CAMARINI, Gladis. Gypsum plaster waste recycling: a potential environmental and industrial solution. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 164, p. 288–300, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.188>. Acesso em: 1 maio 2025.

GERALDO, Rodrigo H.; SOUZA, Janaína D.; CAMPOS, Sofia C.; FERNANDES, Luiz F. R.; CAMARINI, Gladis. Pressured recycled gypsum plaster and wastes: Characteristics of eco-friendly building components. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 191, p. 136–144, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.193>. Acesso em: 1 maio 2025.

GONTIJO, Andressa Alves Batista. **Influência da consistência do molde de gesso na produção de peças cerâmicas obtidas por colagem de barbotina**. 2016. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

HOM, Kevin. Circular Economy: The 4Rs reduce-reuse-recycle-recover *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CHALLENGES FOR THE NEXT GENERATION BUILT ENVIRONMENT, 2024, Bologna. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. Bristol: IOP Publishing, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1402/1/012042>. Acesso em: 22 jun. 2025.

JOHN, Vanderley Moacyr; CINCOTTO, Maria Alba. **Alternativas de gestão dos resíduos de gesso**. São Paulo, 2003. 9 p. Disponível em: <https://www.sorocaba.unesp.br/Home/Graduacao/EngenhariaAmbiental/SandroD.Mancini/alternativas-para-gestao-de-residuos-de-gesso-v2.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2025.

JUNQUEIRA, Alice Malheiro. **A cerâmica de revestimento no contexto do design de ambientes e interiores: análise de aspectos qualificadores do espaço**. 2021. 174 f. Dissertação (Mestrado em Design de Equipamento) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2021.

KAMARUDIN, Rose Aini; ZAKARIA, Mohd Shahir. The utilization of red gypsum waste for glazes. **The Malaysian Journal of Analytical Sciences**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 57–64, 2007. Disponível em: [https://www.ukm.my/mjas/v11\\_n1/09\\_14B2-KB-Rose-1.pdf](https://www.ukm.my/mjas/v11_n1/09_14B2-KB-Rose-1.pdf). Acesso em: 22 jun. 2025.

KINGERY, W. David; VANDIVER, Pamela B.; PRICKETT, Martha. The beginnings of pyrotechnology, part II: production and use of lime and gypsum plaster in the pre-pottery neolithic near east. **Journal of Field Archaeology**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 219–243, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/009346988791974501>. Acesso em: 20 maio 2022.

KIRCHHERR, Julian; YANG, Nan-Hua Nadja; SCHULZE-SPÜNTRUP, Frederik; HEERINK, Maarten J.; HARTLEY, Kris. Conceptualizing the circular economy (revisited): an analysis of 221 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 194, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001>. Acesso em: 22 jun. 2025.

LAZAR, Liliana; LISA, Gabriela; SOREANU, Gabriela; HARJA, Maria. Conversion of plaster molds wastes into the new inorganic products by thermal dehydration. **Journal of International Scientific Publications: Ecology & Safety**, [s. l.], v. 17, p. 24–34, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.62991/ES1996218411>. Acesso em: 1 maio 2025.

LÉVI-STRAUSS, Claude. **A oleira ciumenta**. tradução: Beatriz Perrone-Moisés. São Paulo: Brasiliense, 1986.

LOKULIYANA, D. R. K.; PERERA, J. A. J.; GUNAWARDANE, R. P. Studies on the production of plaster of paris from discarded moulds. **Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 53–65, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.4038/jnsfsr.v16i1.8277>. Acesso em: 1 maio 2025.

MCDONOUGH, William; BRAUNGART, Michael. **The Upcycle: Beyond Sustainability - Designing for Abundance**. 1. ed. Nova Iorque: Melcher Media, 2013.

MENEZES, R. B.; PÓVOAS, Y. V. Influência de aditivo retardador de pega na reci-clagem da pasta de gesso utilizada como revesti-mento interno de parede. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 55–62, 2016. Disponível em: <https://www.academia.edu/86170093/>. Acesso em: 1 maio 2025.

MOLINA, Verónica González; LÓPEZ, Jesús Agüero; PARRA, Abigail Parra; AGUILAR, Pedro Antonio Marquéz; VLASOVA, Marina. Prospects for the use of gypsum waste for the production of building green ceramics. **International Research Journal of Engineering and Technology**, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 1827–1835, 2023. Disponível em: <https://www.irjet.net/archives/V10/i5/IRJET-V10I5277.pdf>. Acesso em: 1 maio 2025.

MORENO, Camila Gomes. **Características e propriedades de produtos obtidos de formulações entre o resíduo da cerâmica vermelha, resíduo de gesso e resíduo do poliestireno**. 2019. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

NAWI, A Mat; BADARULZAMAN, N. A. Ceramics pottery fabrication using plaster of paris as filler: effect of particle size distribution on porosity and modulus of rupture *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON X-RAYS & RELATED TECHNIQUES IN RESEARCH & INDUSTRY 2014, 2014a, Johor Bahru. **Proceedings [...]**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/42954349.pdf>. Acesso em: 20 maio 2022.

NAWI, A Mat; BADARULZAMAN, N. A. Effect of plaster of paris waste and sintering temperatures on physical properties of pottery *In*: 12TH GLOBAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE MANUFACTURING, 2014b, Johor Bahru. **Procedia CIRP**. on-line: Elsevier, 2015. p. 752–755. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.08.019>. Acesso em: 1 maio 2025.

OLIVEIRA, Thaís Mayra de; POLISSENI, Antônio Eduardo. Reciclagem do gesso: potencial de aplicação. **Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis**, Petrópolis, v. 8, n. 1, p. 40–45, 2013. Disponível em: <https://seer.ucp.br/seer/index.php/REVCEC/article/view/403>. Acesso em: 24 abr. 2025. Petrópolis. 6 f.

PADILHA NETO, Lucas Gomes. **Desenvolvimento de metodologia para reciclagem do resíduo de gesso gerado nas práticas de processos inorgânicos experimentais**. 2019. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

PALHARES, Luciana B.; LOPES, Rafael V. S.; ARAÚJO, Pollyanna A. S.; TORRES, Vinícius M.; HOUMARD, Manuel; ARREDONDO, Bryan de P. de la C. Sustainable Production of Ceramic Tiles Using Gypsum Sludge as a Partial Replacement Material. **Materials Research**, [s. l.], v. 25, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2025-0218>. Acesso em: 22 jun. 2025.

PAZMINO, Ana Verónica. Uma reflexão sobre design social, eco design e design sustentável *In*: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESIGN SUSTENTÁVEL, 2007, Curitiba. **Anais Eletrônicos [...]**. [S. l.: s. n.], 2007. Disponível em: <https://naolab.nexodesign.com.br/wp-content/uploads/2012/03/PAZMINO2007-DSocial-EcoD-e-DSustentavel.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2025.

PINTO, Ana Filipa Nunes. **Cerâmica tradicional e fabricação aditiva em cerâmica: Estudo da tradição e contemporaneidade no design cerâmico**. 2022. 123 f. Dissertação (Mestrado em Design de Produtos e Serviços) - Universidade do Minho, Braga, 2022.

ROCHA, Patrícia Maria Reckziegel da; CONTO, Angela Gabriela de.; GIESE, Thomas Ginter; BRANDALISE, Loreni Teresinha; FAVERO, Eveline; BERTOLINI, Geysler Rogis Flor. Reciclagem do gesso para uso na agricultura sob os aspectos econômico e ambiental. **Revista Eletrônica Ciências da Administração e Turismo**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 33–50, 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/349532197\\_Reciclagem\\_do\\_gesso\\_para\\_u\\_so\\_na\\_agricultura\\_sob\\_os\\_aspectos\\_economico\\_e\\_ambiental](https://www.researchgate.net/publication/349532197_Reciclagem_do_gesso_para_u_so_na_agricultura_sob_os_aspectos_economico_e_ambiental). Acesso em: 1 maio 2025.

ROSSETTO, Jaqueline Rosalí de Moraes; CORREIA, Lucas Santos; GERALDO, Rodrigo Henrique; CAMARINI, Gladis. Gypsum plaster waste recycling: analysis of calcination time. **Key Engineering Materials**, Baech, v. 668, p. 312–321, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.668.312>. Acesso em: 1 maio 2025.

SANTOS, Flávio Anthero Nunes Vianna dos. **MD3E (Método de Desdobramento em 3 Etapas): uma proposta de método aberto de projeto para uso no ensino de design industrial**. 2005. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SATO, Sandra Minae. **A cerâmica artística: Interfaces na contemporaneidade**. 2016. 146 f. Tese (Doutorado em Poéticas Visuais) - Escola de Comunicação e Artes da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SAVI, Olindo. **Produção de placas de forro com a reciclagem do gesso**. 2012. 231 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.

SHIYO, Servas; NAGELS, Jozef; SHANGALI, Harold G. Recycling of plaster of Paris. **African Journal of Disability**, [s. l.], v. 9, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4102/ajod.v9i0.503>. Acesso em: 1 maio 2025.

SILVA NETO, Carlos de Melo e; CARNEIRO, Vandervilson Alves; RIBEIRO, Anna Clara Chaves; OLIVEIRA, Thalles Martins de; GONÇALVES, Bruno Bastos. Utilização de resíduos de gesso da construção civil para incremento no desenvolvimento de *Crotalaria Retusa*. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, Ituiutaba, v. 6, n. 1, p. 140–155, 2015. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/braziliangeojournal/article/view/27836>. Acesso em: 1 fev. 2026.

SINGH, Ranjit; BOSE, H. N. Utilisation of Old Plaster Moulds. **Transactions of the Indian Ceramic Society**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 142–144, 1946. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/0371750X.1946.10877807>. Acesso em: 1 maio 2025.

SOKEN, Evelyn Midori. **Reaproveitamento do gesso descartado na construção civil em cerâmica vermelha**. 2015. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2015.

TURIAL, Helenice Almeida Moreira; PIRES JUNIOR, Edson; CRAVO, Tainara Trindade, GOLTARA, Lucas Fernandes da Silva. Estudo sobre propriedades do resíduo de gesso acartonado reciclado na construção civil. **Revista Mundo Tecnológico**, São Mateus, v. 12, n. 14, p. 50–70, 2020. Disponível em: <https://multivix.edu.br/revista-cientifica-mundo-tecnologico/revista-mundo-tecnologico-volume-12-numero-14/>. Acesso em: 1 maio 2025.

UNIVERSITY OF CANTERBURY. A brief history of casts: greek and roman casts. *In*: LOGIE COLLECTION CASTS. [20--]. Disponível em: <https://www.canterbury.ac.nz/about-uc/what-we-do/uc-in-the-community/exhibitions-and-collections/logie-collection-casts/a-brief-history-of-casts/greek-and-roman-casts>. Acesso em: 24 maio 2025.

VEZZOLI, Carlo; MANZINI, Ezio. **Design for Environmental Sustainability**. Milão: Springer, 2008.

VIEIRA, G. L.; TROVÃO, A. P.; TELES, C. R. Perspective of environmental sustainability with waste recycling plaster in construction *In*: SARDINIA 2017 / SIXTEENTH INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 2017, Santa Margherita di Pula. **Proceedings [...]**. Padova: CISA Publisher, 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/320188115\\_PERSPECTIVE\\_OF\\_ENVIRONMENTAL\\_SUSTAINABILITY\\_WITH\\_WASTE\\_RECYCLING\\_PLASTER\\_IN\\_CONSTRUCTION](https://www.researchgate.net/publication/320188115_PERSPECTIVE_OF_ENVIRONMENTAL_SUSTAINABILITY_WITH_WASTE_RECYCLING_PLASTER_IN_CONSTRUCTION). Acesso em: 1 maio 2025.

WISS, J. E.; CAMP, T. P.; LADDOO, R. B. Gypsum plaster in the ceramic industries. **Journal of the American Ceramic Society**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 287–314, 1930. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1930.tb16271.x>. Acesso em: 20 maio 2022.

ZAKARIA, Mohd Shahir; KAMARUDIN, Rose Aini; SHAMSUDDIN, Hairul Fariz. Conversion of Industrial Wastes into Commercially Viable Products. **Malaysian Journal of Analytical Sciences**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 458–462, 2015. Disponível em: [https://eprints.utm.my/484/1/RamliZainab2005\\_SurfaceCoverageAndAcidityStudiesOfBifunctional.pdf#page=74](https://eprints.utm.my/484/1/RamliZainab2005_SurfaceCoverageAndAcidityStudiesOfBifunctional.pdf#page=74). Acesso em: 22 jun. 2025.

**APÊNDICE A – Resultado dos testes de *mini-slump* do gesso**

Mistura	Amostra	Razão água/ge sso	D_h (horizontal ) [mm]	D_v (vertical) [mm]	D_m (média) [mm]	Desvio <10% do padrão?	Fluxo contínuo?
Controle	GCPA revisado	0.7	91	90	90.50	-	sim
	GCPA rev 0.75	0.75	105	108	106.50	NÃO	sim
	GCPF	0.7	44	47	45.50	NÃO	NÃO
	GCPF 0.75	0.75	46	51	48.50	NÃO	NÃO
	GCPF 0.8	0.8	53	51	52.00	NÃO	NÃO
	GCPF2	0.7	73	70	71.50	NÃO	NÃO
	GCNAC	0.7	190	185	187.50	NÃO	sim
	GCPF+N (85/15)	0.7	86	88	87.00	ok	sim
100% GR	150/2	1.05	76	76	76.00	NÃO	NÃO
	150/4	1.05	88	90	89.00	ok	NÃO
	150/8	1.05	83	83	83.00	ok	NÃO
	200/2	1.05	89	88	88.50	ok	sim
	200/4	1.05	68	67	67.50	NÃO	NÃO
	200/8	1.05	90	87	88.50	ok	sim
80% GR [*]	150/2	1.05	88	86	87.00	ok	sim
	150/4	1.05	94	93	93.50	ok	sim
	150/8	1.05	89	88	88.50	ok	sim
	200/2	1.05	111	108	109.50	NÃO	sim
	200/4	1.05	58	62	60.00	NÃO	sim
	200/8	1.05	111	108	109.50	NÃO	sim
80% GR	150/2	0.98	80	80	80.00	NÃO	talvez
	150/4	0.98	81	81	81.00	NÃO	talvez
	150/8	0.98	74	72	73.00	NÃO	NÃO
	200/2	0.98	89	89	89.00	ok	sim
	200/4	0.98	49	48	48.50	NÃO	NÃO
	200/8	0.98	94	94	94.00	ok	sim
60% GR	150/2	0.91	82	80	81.00	NÃO	talvez
	150/4	0.91	80	81	80.50	NÃO	sim
	150/8	0.91	78	76	77.00	NÃO	NÃO
	200/2	0.91	88	89	88.50	ok	sim

	200/4	0.91	71	70	70.50	NÃO	sim
	200/8	0.91	95	97	96.00	ok	sim
40% GR	150/2	0.84	80	79	79.50	NÃO	sim
	150/4	0.84	79	78	78.50	NÃO	sim
	150/8	0.84	84	81	82.50	ok	sim
	200/2	0.84	93	94	93.50	ok	sim
	200/4	0.84	73	71	72.00	NÃO	sim
	200/8	0.84	96	97	96.50	ok	sim
20% GR	150/2	0.77	86	87	86.50	ok	sim
	150/4	0.77	82	82	82.00	ok	sim
	150/8	0.77	79	79	79.00	NÃO	sim
	200/2	0.77	91	90	90.50	ok	sim
	200/4	0.77	83	82	82.50	ok	sim
	200/8	0.77	91	91	91.00	ok	sim
20% GR [*]	150/2	0.7	61	60	60.50	NÃO	NÃO
	150/4	0.7	64	62	63.00	NÃO	NÃO
	150/8	0.7	68	68	68.00	NÃO	NÃO
	200/2	0.7	69	69	69.00	NÃO	NÃO
	200/4	0.7	70	69	69.50	NÃO	NÃO
	200/8	0.7	77	75	76.00	NÃO	NÃO

## APÊNDICE B – Resultado dos ensaios de dureza do gesso

Mistura	Amostra	Ensaio [#]	t (média) [mm]	D [MPa]	Desvio <5% do padrão inferior?	Desvio <1% do padrão superior?
Controle	GCPF	3529 ~ 3531	0.2453	64.89	-	-
	GCPF 0.75	3547	0.2586	61.54	-	-
	GCPA (antigo)	3532 ~ 3534	0.2513	63.32	padrão superior	
	GCNAC	3549	0.2801	56.82	-	-
	GCPA (revisado)	3548	0.2564	62.07	-	-
	GCPF2+NA C	3550	0.2579	61.71	padrão inferior	
100% GR	GR100 (150/2)	3538 ~ 3540	0.2783	57.20	NÃO	NÃO
	GR100 (150/4)	3535 ~ 3537	0.2832	56.19	NÃO	NÃO
	GR100 (150/8)	3541 ~ 3543	0.2813	56.57	NÃO	NÃO
	GR100 (200/2)	3544	0.2830	56.24	NÃO	NÃO
	GR100 (200/4)	3546	0.2832	56.20	NÃO	NÃO
	GR100 (200/8)	3545	0.2827	56.30	NÃO	NÃO
80% GR [*]	GR80* (150/2)	3551	0.2775	57.35	NÃO	NÃO
	GR80* (150/4)	3552	0.2832	56.20	NÃO	NÃO
	GR80* (150/8)	3553	0.2816	56.52	NÃO	NÃO
	GR80* (200/2)	3554	0.2818	56.48	NÃO	NÃO
	GR80* (200/4)	3555	0.2813	56.58	NÃO	NÃO
	GR80* (200/8)	3556	0.2832	56.20	NÃO	NÃO
40% GR	GR40 (150/2)	3557	0.2665	59.72	ok	NÃO
	GR40 (150/4)	3558	0.2680	59.39	ok	NÃO
	GR40 (150/8)	3559	0.2682	59.34	ok	NÃO

	GR40 (200/2)	3560	0.2699	58.97	ok	NÃO
	GR40 (200/4)	3561	0.2722	58.47	NÃO	NÃO
	GR40 (200/8)	3562	0.2734	58.21	NÃO	NÃO
20% GR	GR20 (150/2)	3563	0.2598	61.26	ok	NÃO
	GR20 (150/4)	3564	0.2667	59.68	ok	NÃO
	GR20 (150/8)	3565	0.2638	60.33	ok	NÃO
	GR20 (200/2)	3566	0.2579	61.71	ok	NÃO
	GR20 (200/4)	3567	0.2640	60.29	ok	NÃO
	GR20 (200/8)	3568	0.2658	59.88	ok	NÃO
20% GR [*]	GR20* (150/2)	3569	0.2493	63.84	ok	ok
	GR20* (150/4)	3570	0.2515	63.28	ok	ok
	GR20* (150/8)	3571	0.2517	63.23	ok	ok
	GR20* (200/2)	3572	0.2522	63.11	ok	ok
	GR20* (200/4)	3573	0.2506	63.51	ok	ok
	GR20* (200/8)	3574	0.2518	63.21	ok	ok

### APÊNDICE C – Resultado dos ensaios de resistência à compressão do gesso

Mistura	Amostra	Ensaio [#]	Corpo de prova [#]	Resistência (R) [MPa]	Diferença da média [%]	Resistência a média (Rm) [MPa]	> 8.40 MPa?	Entre 5% de desvio ?	Entre 10% de desvio ?	Entre 25% de desvio ?
Controle	GCPF	3576	1	8.90	6.591	9.528	ok	ok	ok	ok
			2	10.10	6.003					
			3	9.59	0.651					
	GCPF 0.75	3575	1	8.89	7.354	8.281	NÃO	ok	ok	ok
			2	7.56	8.707					
			3	8.40	1.437					
	GCPA (antigo)	3577	1	10.00	4.031	10.420	ok	ok	ok	ok
			2	10.50	0.768					
			3	10.76	3.263					
	GCNAC	3579	1	3.51	4.901	3.346	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	3.43	2.510					
			3	3.10	7.352					
	GCPA (revisado)	3578	1	8.86	8.539	8.163	NÃO	ok	ok	ok
			2	7.89	3.344					
			3	7.73	5.304					
GCPF2+ NAC	3580	1	8.73	6.269	8.215	NÃO	ok	ok	ok	
		2	8.52	3.713						
		3	7.40	9.921						
100% GR	GR100 (150/2)	3605	1	3.68	3.513	3.814	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	3.97	4.090					
			3	3.79	0.629					
	GR100 (150/4)	3606	1	2.50	10.873	2.805	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	2.92	4.100					
			3	3.00	6.952					
	GR100 (150/8)	3607	1	3.20	1.508	3.249	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	3.26	0.339					
			3	3.28	0.954					
	GR100 (200/2)	3608	1	2.95	2.672	3.031	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	3.23	6.565					
			3	2.92	3.662					
	GR100 (200/4)	3609	1	3.20	2.861	3.111	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	3.10	0.354					
			3	3.03	2.604					
GR100 (200/8)	3610	1	3.10	8.848	2.848	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	
		2	2.62	8.006						
		3	2.82	0.983						

80% GR [*]	GR80* (150/2)	3599	1	3.81	1.303	3.761	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	3.81	1.303					
			3	3.67	2.420					
	GR80* (150/4)	3600	1	2.31	10.349	2.577	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	2.56	0.647					
			3	2.86	10.996					
	GR80* (150/8)	3601	1	3.26	0.369	3.248	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	3.32	2.217					
			3	3.16	2.709					
	GR80* (200/2)	3602	1	2.97	2.750	3.054	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	3.07	0.524					
			3	3.12	2.161					
	GR80* (200/4)	3603	1	2.79	2.516	2.862	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	3.00	4.822					
			3	2.80	2.166					
	GR80* (200/8)	3604	1	3.11	7.949	2.881	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	2.55	11.489					
			3	2.98	3.436					
40% GR	GR40 (150/2)	3593	1	5.10	6.250	5.440	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	5.45	0.184					
			3	5.78	6.250					
	GR40 (150/4)	3594	1	4.74	2.849	4.879	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	5.00	2.480					
			3	4.90	0.430					
	GR40 (150/8)	3595	1	5.64	4.348	5.405	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	5.17	4.348					
			<b>3</b>	<b>3.62</b>	<b>33.025</b>					
	GR40 (200/2)	3596	1	4.80	1.480	4.730	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	4.67	1.268					
			3	4.72	0.211					
GR40 (200/4)	3597	1	4.81	1.370	4.745	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	
		<b>2</b>	<b>3.07</b>	<b>35.300</b>						
		3	4.68	1.370						
GR40 (200/8)	3598	1	4.49	8.063	4.155	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	
		2	<b>4.89</b>	<b>17.690</b>						
		3	3.82	8.063						
20% GR	GR20 (150/2)	3587	1	6.57	2.667	6.750	NÃO	NÃO	NÃO	ok
			2	6.85	1.481					
			3	6.83	1.185					
	GR20 (150/4)	3588	1	4.55	13.300	5.248	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	5.40	2.896					

	GR20 (150/8)	3589	3	5.80	10.518	6.040	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			1	6.07	0.497					
			2	6.09	0.828					
	GR20 (200/2)	3590	1	6.38	0.312	6.400	NÃO	NÃO	NÃO	ok
			2	6.23	2.656					
			3	6.59	2.969					
	GR20 (200/4)	3591	1	5.91	7.827	5.481	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	5.80	5.820					
			3	4.73	13.702					
	GR20 (200/8)	3592	1	5.82	0.483	5.792	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
			2	5.96	2.901					
			3	5.60	3.315					
20% GR [*]	GR20* (150/2)	3581	1	8.16	3.500	8.456	ok	ok	ok	ok
			2	8.05	4.801					
			3	9.15	8.207					
	GR20* (150/4)	3583	1	9.07	5.404	8.605	ok	ok	ok	ok
			2	8.27	3.893					
			3	8.48	1.453					
	GR20* (150/8)	3584	1	8.73	0.728	8.794	ok	ok	ok	ok
			2	8.69	1.183					
			3	8.96	1.888					
	GR20* (200/2)	3585	1	8.30	0.863	8.229	NÃO	ok	ok	ok
			2	8.52	3.536					
			3	7.87	4.363					
	GR20* (200/4)	3586	1	8.11	4.362	7.771	NÃO	NÃO	ok	ok
			2	7.59	2.329					
			3	7.60	2.200					
GR20* (200/8)	3582	1	8.47	2.941	8.228	NÃO	ok	ok	ok	
		2	8.38	1.847						
		3	7.83	4.837						

**APÊNDICE D – Tabelas de análise estatística (ANOVA e Teste de Tukey) dos ensaios de resistência à compressão**

<b>100% GR (α/g = 1.05)</b>	Valores de resistência a serem usados na ANOVA					
		2h	4h	8h		
	150 °C	3.68	2.50	3.20		
		3.97	2.92	3.26		
		3.79	3.00	3.28		
	200 °C	2.95	3.20	3.10		
		3.23	3.10	2.62		
		2.92	3.03	2.82		
	Cálculos iniciais					
	SUMMARY	2h	4h	8h	Total	
<b>150 °C</b>						
Count	3	3	3	9		
Sum	11.44	8.42	9.74	29.6		
Average	3.813333333	2.806666667	3.246666667	3.288888889		
Variance	0.02143333333	0.07213333333	0.001733333333	0.2148361111		
<b>200 °C</b>						
Count	3	3	3	9		
Sum	9.1	9.33	8.54	26.97		
Average	3.033333333	3.11	2.846666667	2.996666667		
Variance	0.02923333333	0.0073	0.05813333333	0.037425		
<b>Total</b>						
Count	6	6	6			
Sum	20.54	17.75	18.28			
Average	3.423333333	2.958333333	3.046666667			
Variance	0.2027866667	0.05937666667	0.07194666667			
<b>ANOVA: Two-Factor With Replication</b>						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	Fcrit
Sample	0.38427	1	0.38427	12.13704	0.00451	4.74723
Columns	0.73181	2	0.36591	11.55694	0.00159	3.88529
Interaction	0.90634	2	0.45317	14.31321	0.00066	3.88529
Within	0.37993	12	0.03166			
Total	2.40236	17				
<b>Interpretação dos P-values</b>						
Fonte de variação	P-value	Diagnóstico				
Temperatura (sample)	0.00451	A Temperatura muda a resistência significativamente				
Tempo (column)	0.00159	O tempo muda a resistência significativamente				
Interação	0.00066	Há uma combinação ótima				
<b>Cálculo do HSD (Honestly Significant Difference)</b>						
QM_erro	n	q	HSD			
0.03166	3	4.75	0.488			
<b>Tabela de ranking (teste de Tukey)</b>						
Combinação	Média	Grupo A (Critério: > 3.33)	Grupo B (Critério: > 2.76)			
150/2	3.81	A	-			
150/8	3.25	-	B			
200/4	3.11	-	B			
200/2	3.03	-	B			
200/8	2.85	-	B			
150/4	2.81	-	B			
				<b>RESULTADO</b>		
				Melhor amostra: 150/2		

80% GR (α/γ = 1.05)

**Valores de resistência a serem usados na ANOVA**

	2h	4h	8h
<b>150 °C</b>	3.81	2.31	3.26
	3.81	2.56	3.32
	3.67	2.86	3.16
<b>200 °C</b>	2.97	2.79	3.11
	3.07	3.00	2.55
	3.12	2.80	2.98

**Cálculos iniciais**

SUMMARY	2h	4h	8h	Total
<b>150 °C</b>				
Count	3	3	3	9
Sum	11.29	7.73	9.74	28.76
Average	3.763333333	2.576666667	3.246666667	3.195555556
Variance	0.006533333333	0.07583333333	0.006533333333	0.2877277778
<b>200 °C</b>				
Count	3	3	3	9
Sum	9.16	8.59	8.64	26.39
Average	3.053333333	2.863333333	2.88	2.932222222
Variance	0.005833333333	0.01403333333	0.0859	0.03474444444
<b>Total</b>				
Count	6	6	6	
Sum	20.45	16.32	18.38	
Average	3.408333333	2.72	3.063333333	
Variance	0.1561766667	0.0606	0.07730666667	

**ANOVA: Two-Factor With Replication**

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Sample	0.31205	1	0.31205	9.61798	0.00917	4.74723
Columns	1.42141	2	0.71071	21.90531	0.00010	3.88529
Interaction	0.76903	2	0.38452	11.85154	0.00144	3.88529
Within	0.38933	12	0.03244			
Total	2.89183	17				

**Interpretação dos P-values**

Fonte de variação	P-value	Diagnóstico
Temperatura (sample)	0.00917	A Temperatura muda a resistência significativamente
Tempo (column)	0.00010	O tempo muda a resistência significativamente
Interação	0.00144	Há uma combinação ótima

**Cálculo do HSD (Honestly Significant Difference)**

QM_erro	n	q	HSD
0.03244	3	4.75	0.494

**Tabela de ranking (teste de Tukey)**

Combinação	Média	Grupo A	Grupo B	Grupo C
		(Critério: > 3.27)	(Critério: > 2.75)	(Critério: > 2.08)
150/2	3.76	A		
150/8	3.25	-	B	
200/2	3.05	-	B	
200/8	2.88	-	B	
200/4	2.88	-	B	
150/4	2.58	-	-	C

**RESULTADO**

Melhor amostra: 150/2

40% GR (a/g = 0.84)

## Valores de resistência a serem usados na ANOVA

	2h	4h	8h
150 °C	5.10	4.74	5.64
	5.45	5.00	5.17
	5.78	4.90	5.41
200 °C	4.80	4.81	4.49
	4.67	4.75	4.89
	4.72	4.68	4.69

## Cálculos iniciais

SUMMARY	2h	4h	Total
<b>150 °C</b>			
Count	3	3	9
Sum	16.33	14.64	47.185
Average	5.443333333	4.88	5.242777778
Variance	0.1158333333	0.0172	0.1213194444
<b>200 °C</b>			
Count	3	3	9
Sum	14.19	14.235	42.495
Average	4.73	4.745	4.721666667
Variance	0.0043	0.004225	0.0127375
<b>Total</b>			
Count	6	6	6
Sum	30.52	28.875	30.285
Average	5.086666667	4.8125	5.0475
Variance	0.2006266667	0.0140375	0.1914575

## ANOVA: Two-Factor With Replication

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Sample	1.22201	1	1.22201	30.99133	0.00012	4.74723
Columns	0.26385	2	0.13193	3.34579	0.07002	3.88529
Interaction	0.33544	2	0.16772	4.25350	0.04015	3.88529
Within	0.47317	12	0.03943			
Total	2.29446	17				

## Interpretação dos P-values

Fonte de variação	P-value	Diagnóstico
Temperatura (sample)	0.00012	A Temperatura muda a resistência significativamente
Tempo (column)	0.07002	Estatisticamente não é comprovada a influência
Interação	0.04015	Há uma combinação ótima

## Cálculo do HSD (Honestly Significant Difference)

QM_erro	n	q	HSD
0.03943	3	4.75	0.545

## Tabela de ranking (teste de Tukey)

Combinação	Média	Grupo A	Grupo B
		(Critério: > 4.90)	(Critério: > 4.34)
150/2	5.44	A	
150/8	5.41	A	
150/4	4.88	-	B
200/4	4.75	-	B
200/2	4.73	-	B
200/8	4.69	-	B

## RESULTADO

Melhor amostra: 150/2 e 150/8

20% GR (a/g = 0.77)

## Valores de resistência a serem usados na ANOVA

	2h	4h	8h
150 °C	6.57	4.55	6.07
	6.85	5.40	6.09
	6.83	5.80	5.96
200 °C	6.38	5.91	5.82
	6.23	5.80	5.96
	6.59	4.73	5.60

## Cálculos iniciais

SUMMARY	2h	4h	Total	
<b>150 °C</b>				
Count	3	3	3	9
Sum	20.25	15.75	18.12	54.12
Average	6.75	5.25	6.04	6.013333333
Variance	0.0244	0.4075	0.0049	0.531475
<b>200 °C</b>				
Count	3	3	3	9
Sum	19.2	16.44	17.38	53.02
Average	6.4	5.48	5.793333333	5.891111111
Variance	0.0327	0.4249	0.03293333333	0.2867111111
<b>Total</b>				
Count	6	6	6	
Sum	39.45	32.19	35.5	
Average	6.575	5.365	5.916666667	
Variance	0.05959	0.34883	0.03338666667	

## ANOVA: Two-Factor With Replication

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Sample	0.06722	1	0.06722	0.43494	0.52203	4.74723
Columns	4.40368	2	2.20184	14.24626	0.00068	3.88529
Interaction	0.28714	2	0.14357	0.92894	0.42161	3.88529
Within	1.85467	12	0.15456			
Total	6.61271	17				

## Interpretação dos P-values

Fonte de variação	P-value	Diagnóstico
Temperatura (sample)	0.52203	Estatisticamente não é comprovada a influência
Tempo (column)	0.00068	O tempo muda a resistência significativamente
Interação	0.42161	não há uma combinação ótima

## Cálculo do HSD (Honestly Significant Difference)

QM_erro	n	q	HSD
0.15456	3	4.75	1.078

## Tabela de ranking (teste de Tukey)

Combinação	Média	Grupo A	Grupo B
		(Critério: > 5.67)	(Critério: > 4.40)
150/2	6.75	A	
200/2	6.40	A	
150/8	6.04	A	
200/8	5.79	A	
200/4	5.48	-	B
150/4	5.25	-	B

## RESULTADO

Melhor amostra: calcinações feitas durante 2 ou 8 horas

20% GR (a/g = 0.70)

## Valores de resistência a serem usados na ANOVA

	2h	4h	8h
150 °C	8.16	9.07	8.73
	8.05	8.27	8.69
	9.15	8.48	8.96
200 °C	8.30	8.11	8.47
	8.52	7.59	8.38
	7.87	7.60	7.83

## Cálculos iniciais

SUMMARY	2h	4h	Total
150 °C			
Count	3	3	9
Sum	25.36	25.82	77.56
Average	8.453333333	8.606666667	8.617777778
Variance	0.3670333333	0.1720333333	0.1618194444
200 °C			
Count	3	3	9
Sum	24.69	23.3	72.67
Average	8.23	7.766666667	8.074444444
Variance	0.1093	0.08843333333	0.1327277778
Total			
Count	6	6	6
Sum	50.05	49.12	51.06
Average	8.341666667	8.186666667	8.51
Variance	0.2054966667	0.3158666667	0.15284

## ANOVA: Two-Factor With Replication

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Sample	1.32845	1	1.32845	9.07756	0.01080	4.74723
Columns	0.31381	2	0.15691	1.07217	0.37290	3.88529
Interaction	0.28643	2	0.14322	0.97863	0.40391	3.88529
Within	1.75613	12	0.14634			
Total	3.68483	17				

## Interpretação dos P-values

Fonte de variação	P-value	Diagnóstico
Temperatura (sample)	0.01080	A Temperatura muda a resistência significativamente
Tempo (column)	0.37290	Estatisticamente não é comprovada a influência
Interação	0.40391	não há uma combinação ótima

## Cálculo do HSD (Honestly Significant Difference)

QM_erro	n	q	HSD
0.14634	3	4.75	1.049

## Tabela de ranking (teste de Tukey)

Combinação	Média	Grupo A (Critério: > 7.40)
150/8	8.79	A
150/4	8.61	A
150/2	8.45	A
200/2	8.23	A
200/8	8.23	A
200/4	7.77	A

## RESULTADO

Melhor amostra: não há diferença estatisticamente significativa entre as amostras

## APÊNDICE E – Tabelas de análise estatística (Teste t de Student) dos ensaios de resistência à compressão do lote ótimo (150 °C/2h)

Valores de resistência usados no teste t						
GC (controle)	20% [*] GR	20% GR	40% GR	80% [*] GR	100% GR	
8.73	8.16	6.57	5.10	3.81	3.68	
8.52	8.05	6.85	5.45	3.81	3.97	
7.40	9.15	6.83	5.78	3.67	3.79	
<b>p-value encontrado nos testes (valores em vermelho)</b>	-	0.68440	0.02556	0.00373	0.00043	0.00047

20% [*] GR (a/g = 0.70)		
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	Variable 1	Variable 2
Mean	8.21667	8.45333
Variance	0.51123	0.36703
Observations	3.00000	3.00000
Pooled Variance	0.43913	
Hypothesized Mean Difference	0.00000	
df	4.00000	
t Stat	-0.43741	
P(T<=t) one-tail	0.34220	
t Critical one-tail	2.13185	
<b>P(T&lt;=t) two-tail</b>	<b>0.68440</b>	
t Critical two-tail	2.77645	

20% GR (a/g = 0.77)		
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	Variable 1	Variable 2
Mean	8.21667	6.75000
Variance	0.51123	0.02440
Observations	3.00000	3.00000
Pooled Variance	0.26782	
Hypothesized Mean Difference	0.00000	
df	4.00000	
t Stat	3.47103	
P(T<=t) one-tail	0.01278	
t Critical one-tail	2.13185	
<b>P(T&lt;=t) two-tail</b>	<b>0.02556</b>	
t Critical two-tail	2.77645	

40% GR (a/g = 0.84)		
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	Variable 1	Variable 2
Mean	8.21667	5.44333
Variance	0.51123	0.11563
Observations	3.00000	3.00000
Pooled Variance	0.31343	
Hypothesized Mean Difference	0.00000	
df	4.00000	
t Stat	6.06702	
P(T<=t) one-tail	0.00186	
t Critical one-tail	2.13185	
<b>P(T&lt;=t) two-tail</b>	<b>0.00373</b>	
t Critical two-tail	2.77645	

80% [*] GR (a/g = 1.05)		
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	Variable 1	Variable 2
Mean	8.21667	3.76333
Variance	0.51123	0.00653
Observations	3.00000	3.00000
Pooled Variance	0.25888	
Hypothesized Mean Difference	0.00000	
df	4.00000	
t Stat	10.71961	
P(T<=t) one-tail	0.00021	
t Critical one-tail	2.13185	
<b>P(T&lt;=t) two-tail</b>	<b>0.00043</b>	
t Critical two-tail	2.77645	

100% GR (a/g = 1.05)		
t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	Variable 1	Variable 2
Mean	8.21667	3.81333
Variance	0.51123	0.02143
Observations	3.00000	3.00000
Pooled Variance	0.26633	
Hypothesized Mean Difference	0.00000	
df	4.00000	
t Stat	10.44996	
P(T<=t) one-tail	0.00024	
t Critical one-tail	2.13185	
<b>P(T&lt;=t) two-tail</b>	<b>0.00047</b>	
t Critical two-tail	2.77645	

**APÊNDICE F – Tabela de análise estatística (Teste t de Student) dos ensaios de absorção de água do lote ótimo (150 °C/2h)**

**Valores de absorção usados no teste t**

GC (controle)	20% GR
44.6	45.9
43.6	45.0
44.8	46.0

**20% GR (a/g = 0.77)**

**t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances**

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	44.33029	45.63730
Variance	0.42732	0.31617
Observations	3	3
Pooled Variance	0.37175	
Hypothesized M	0.00000	
df	4	
t Stat	-2.62543	
P(T<=t) one-tail	0.02923	
t Critical one-tail	2.13185	
<b>P(T&lt;=t) two-tail</b>	<b>0.05847</b>	
t Critical two-tail	2.77645	