



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

ALCIDES MIGUEL DA SILVA JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE UM COMPÓSITO DE
GESSO E RESÍDUOS DE PODA DE ÁRVORES
ADITIVADO COM BABA DE CUPIM SINTÉTICA PARA
PRODUÇÃO PRÉ-MOLDADOS**

**Recife, PE
2025**

ALCIDES MIGUEL DA SILVA JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE UM COMPÓSITO DE
GESSO E RESÍDUOS DE PODA DE ÁRVORES
ADITIVADO COM BABA DE CUPIM SINTÉTICA PARA
PRODUÇÃO DE PRÉ-MOLDADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Mestrado em Desenvolvimento em Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco, como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais.

Linha de Pesquisa: Modelagem, Inovação e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Murilo Maciel Fernandes

Coorientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

**Recife, PE
2025**

FICHA CATALOGRÁFICA

S586d Silva Júnior, Alcides Miguel da.

Desenvolvimento de um compósito de gesso e resíduos de poda de árvores aditivado com baba de cupim sintética para produção de pré-moldados / Alcides Miguel da Silva Júnior, 2025.
88f.:il.

Orientador: Sérgio Murilo Maciel Fernandes.

Coorientador: Valdemir Alexandre dos Santos.

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

1. Sustentabilidade 2. Gesso, 3. Impacto ambiental, 4. Resíduos vegetais. I. Título

CDU 577.4

Luciana Vidal – CRB4/1338

Desenvolvimento de um compósito de gesso e resíduos de poda de árvores aditivado com baba de cupim sintética para produção de pré-moldados. © 2025 by Alcides Miguel da Silva Júnior is licensed under CC BY-NC-ND 4.0. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

DESENVOLVIMENTO DE UM COMPÓSITO DE GESSO E RESÍDUOS DE PODA DE ÁRVORES ADITIVADO COM BABA DE CUPIM SINTÉTICA PARA PRODUÇÃO DE PRÉ-MOLDADOS

ALCIDES MIGUEL DA SILVA JÚNIOR

Examinadores:

 **SÉRGIO MURILO MACIEL FERNANDES**
Data: 28/03/2025 12:56:46-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Sérgio Murilo Maciel Fernandes - UNICAP
(Orientador)

Documento assinado digitalmente

goubri Data: 31/03/2025 TEODORO ROMÃO 0300DE OLIVEIRA
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira - UNICAP
(Titular interno)



Prof. Dr. Carlos Costa Dantas – DEN/CTG/UFPE
(Titular externo)

Defendida em 10 de março de 2025.

Coordenador: Prof. Dr. Sergio Mendonça de Almeida

DEDICATÓRIA

Dedico este esforço de construção e saber aos meus pais, esposa Tania e filho Leonardo e sobrinha Maria Eduarda.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, criador incriado de tudo e de todos, pela oportunidade de crescimento, para melhor servir aos companheiros de jornada evolutiva.

Agradeço aos professores do Mestrado de Desenvolvimento de Processos Ambientais (DPA) da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), pelo compartilhamento dos conhecimentos enriquecedores. Em particular, agradeço ao meu Professor orientador Sérgio Murilo Maciel Fernandes e ao Professor coorientador Valdemir Alexandre dos Santos, por suas seguras orientações na materialização e qualidade desta dissertação.

Agradeço à CAPES, pela bolsa concedida, em parceria com Universidade Católica de Pernambuco, que cedeu espaço para realização dos experimentos.

Agradeço aos colegas de turma pelos incentivos, pelo companheirismo reinante, capaz de nos impulsionar na direção do resultado.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	IV
AGRADECIMENTOS.....	V
SUMÁRIO.....	VI
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE QUADROS.....	X
LISTA DE ABREVIATURAS	XI
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1.1 INTRODUÇÃO	14
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 OBJETIVO GERAL	17
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
1.3.1. ASPECTO HISTÓRICO DO GESSO	19
1.3.2. IMPORTÂNCIA DA GIPSITA PARA PERNAMBUCO	20
1.3.3. PROCESSO PRODUTIVO DO GESSO	23
1.3.4. TIPOS DE GESSO	26
1.3.5. PROPRIEDADES DO GESSO	28
1.3.5.1. <i>Propriedades Físicas e Mecânicas</i>	28
1.3.5.2. <i>Propriedades Químicas</i>	29
1.3.5.3. <i>Isolamento Acústico</i>	30
1.3.5.4 <i>Isolamento Térmico</i>	30
1.3.6. RESÍDUOS DE PODA DE ÁRVORES	30
1.3.7. BABA DE CUPIM SINTÉTICA	33
1.3.8 LIGHT STEEL FRAME.....	35
1.3.9. ANÁLISE DA REVISÃO	37
CAPÍTULO II.....	43

1. INTRODUÇÃO.....	45
2. MATERIAIS E MÉTODOS	46
2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	46
2.2. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE PODA DE ÁRVORE.....	50
2.3. CARACTERIZAÇÃO DA BABA DE CUPIM SINTÉTICA	51
2.4. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	52
2.5. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	54
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
3.1 CARACTERÍSTICAS DO GESSO UTILIZADO	56
3.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	59
3.2. AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS MODELOS DE PREVISÃO EM PYTHON®	67
4. CONCLUSÃO.....	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Polo Gesseiro de Pernambuco

Figura 2: Processo produtivo de gesso

Figura 3: Poda de árvore

Figura 4: Baba de Cupim | DS-328

Figura 5: Quantidade necessárias de matérias

Figura 6: Desenho esquemático de uma residência em LSF.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Reserva e Produção Mundial da Gipsita

Tabela 2: Principais Estatísticas - Brasil (2020)

Tabela 3: Requisitos físicos e mecânicos do gesso para construção civil

Tabela 4: Requisitos físicos do gesso para construção civil (granulometria)

Tabela 5: Requisitos físicos do gesso para construção civil (tempo de pega)

Tabela 6: Requisitos químicos do gesso sem aditivos para construção civil

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Compostos obtidos a partir da calcinação da gipsita

LISTA DE ABREVIATURAS

ABFG – Associação Brasileira dos Fabricantes de Gesso

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

DRYWALL – Sistema a seco composto por placas de gesso pré-fabricadas

DCCR – Delineamento Composto Central Rotacional

LSF – Light Steel Frame

SINDUSGESSO – Sindicato da Indústria do Gesso do Estado de Pernambuco

NBR – Normas Brasileiras

RESUMO

Na construção civil o método convencional utiliza alvenaria e requer a preparação no próprio local de argamassa para o seu assentamento, gerando resíduos que produzem impactos econômicos e ambientais, um maior retardo na execução da obra, desperdício de materiais e imprecisão, impactando a sustentabilidade da construção. Obras que utilizam a tecnologia de construção *drywall*, apresentam um menor peso estrutural, um menor prazo de execução, além de serem mais baratas do que as construções em alvenaria. Esta pesquisa desenvolve um compósito inovador para pré-moldados, combinando gesso beta, resíduos de poda de árvores e uma substância sintetizada similar à "baba de cupim". O objetivo é criar um material sustentável, com melhor resistência mecânica e à umidade. Modelos de regressão polinomial de segunda ordem confirmaram a qualidade preditiva dos ajustes, com coeficientes de determinação (R^2) variando de 77,55% a 83,05%, sendo o modelo de resistência à compressão o mais robusto. Esses resultados validam a abordagem adotada e fornecem uma base sólida para ajustes futuros no desenvolvimento de compósitos para pré-moldados.

Palavras-chave: *Drywall*, Baba de Cupim sintetizada, Resíduos de árvore, Sustentabilidade.

ABSTRACT

In conventional construction, the traditional method uses masonry and requires on-site preparation of mortar for laying, generating waste that leads to economic and environmental impacts, delays in project execution, material waste, and imprecision, thus affecting the sustainability of construction. Projects that employ drywall construction technology present a lower structural weight, shorter execution time, and lower costs compared to masonry structures. This research develops an innovative composite for precast panels, combining beta gypsum, tree pruning residues, and a synthesized substance similar to "termite saliva." The objective is to create a sustainable material with improved mechanical strength and moisture resistance. Second-order polynomial regression models confirmed the predictive quality of the adjustments, with coefficients of determination (R^2) ranging from 77.55% to 83.05%, with the compressive strength model being the most robust. These results validate the adopted approach and provide a solid foundation for future refinements in the development of composites for precast applications.

Keywords: Drywall, Synthetic termite slime, tree residue, Sustainability.

1.1 INTRODUÇÃO

A carência de tecnologias apropriadas e um maior conhecimento das possibilidades de uso de determinados materiais tem gerado uma busca no mercado da Construção Civil por soluções alternativas alinhadas aos novos conceitos de sustentabilidade. Apesar de o Brasil possuir a maior área de reflorestamento do mundo, o destino dos resíduos da madeira tem contemplado apenas a produção de celulose e carvão vegetal (AGUILAR; SANTOS, 2017). Esse fato estimula a investigação sobre o tema e contribui para a formação de uma cultura relacionada à busca de soluções para os problemas ambientais e de novas alternativas para o setor da Construção Civil.

Por outro lado, o Pólo Gesseiro do Araripe, localizado no epicentro do semiárido brasileiro, no alto Sertão do Estado de Pernambuco, a cerca de 800 km de oito das mais importantes capitais do Nordeste do Brasil, é responsável por 94% da exploração do minério gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), caracterizando-se na maior reserva nacional disponível e de qualidade, a céu aberto, apresentando excelentes condições de mineração (BENACHOUR; PERES; SANTOS, 2018).

O gesso é um material de construção de uso milenar, bastante utilizado em diversas partes do mundo. A matéria-prima necessária à sua produção, o minério gipsita, é um material considerado de baixo custo e abundante, (BALTAR; BASTOS, 2013), porém apresenta instabilidade volumétrica na presença de umidade. Procurando sanar este problema, buscou-se uma alternativa acessível, de baixo custo, por meio da obtenção de compósitos do tipo gesso polímero pela adição de uma substância denominada de DS-328, um sal orgânico composto com óleos vegetais, desenvolvido pela empresa Blindasolo com características semelhantes à conhecida "baba de cupim" e com a adição de resíduos de poda de árvore com finalidade de melhorar a resistência mecânica do compósito. Materiais formados de dois ou mais constituintes com distintas composições, estruturas, propriedades e que estão separados por uma interface são definidos como compósitos (SOUZA, 2016)

A gipsita dá origem a dois subprodutos principais: gesso ou semi-hidrato tipo α e gesso ou semi-hidrato tipo β . Cada um desses tipos de gesso resulta de processo industrial particular, responde também pela maior ou menor agregação de valor ao produto final, formando a cadeia principal de produção (BARROS et al., 2016). O gesso tipo beta é utilizado na indústria da construção civil, indústria de cerâmica e

indústria de moldes (estatuetas). Dentre os tipos de gesso beta, destacam-se os de fundição e os de revestimento manual e de projeção, sendo ambos produzidos no Brasil. Esses produtos são diferenciados pelo tempo de pega definido como o tempo necessário para que o gesso (ao ser misturado com a água) complete seu ciclo de endurecimento. O tempo de pega do produto é manipulado através do processo de calcinação ou pela incorporação de aditivos químicos (BALTAR et al., 2014).

Considerando-se as propriedades do gesso, deve-se encontrar um material que junto ao mesmo melhore suas características: maior resistência à compressão; maior resistência à flexão; maior dureza; menor absorção de água; ótima aderência ao substrato; melhor coeficiente de isolamento térmico e melhor custo-benefício com o aumento do ciclo de vida do mesmo. A necessidade de se produzir compósito é de tentar encontrar, através de combinações de diferentes materiais, um único produto com propriedades superiores às dos componentes individuais.

Os cupinzeiros, por sua vez, apresentam características térmicas e filtrantes que se assemelham muito com as tradicionais habitações feitas de terra crua. Os cupins têm a capacidade de produzir uma enzima, popularmente chamada “baba”, e uni-la aos pequenos grãos de terra, retirados do local, para construir um grande complexo de túneis e caminhos (LEME, 2018). Essa enzima além da característica colante é também um extraordinário acabamento de proteção às chuvas. O cupinzeiro, que atinge até 60 cm de altura, é feito de areia (terra), saliva e excrementos dos próprios cupins. A construção é tão sólida na parte externa que alguns cupinzeiros se mantêm por até 80 anos. (APRENDER CIÊNCIAS, 2011) Ressalte-se ainda que além de ser considerada uma praga no campo, os cupinzeiros possuem a característica de grande durabilidade, sendo isto atribuído a “baba do cupim”, que serve como um ativador da capacidade de aglomeração de solos finos (argilas) e impermeabilizantes de superfícies (solos).

Os resíduos de poda de árvores podem causar poluição ambiental urbana, por seu intenso descarte em aterros, com suas consequências sobre o meio ambiente, nessa dissertação será usado com um dos agregados ao compósito de gesso com o intuito de obter uma maior resistência mecânica das placas de *drywall*.

Essas novas tecnologias são vistas, em muitos setores da Economia, como responsáveis pela geração de altos custos, na escolha do material e na qualificação da mão de obra. No entanto, faz-se necessário mostrar que os benefícios da

tecnologia podem trazer uma economia muito maior, tanto nos custos de execução como nos custos de produção, principalmente, quando atendem ao princípio do equilíbrio ambiental.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Investigar o potencial da combinação entre gesso de fundição, resíduos de poda e baba de cupim sintética na criação de um novo compósito para pré-moldados. O estudo busca otimizar as propriedades mecânicas e de absorção de umidade do material, tornando-o também adequado para aplicação em estruturas do tipo *light steel frame*.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o gesso a ser utilizado nos experimentos.
- Caracterizar os resíduos de poda de árvore a serem utilizados nos experimentos.
- Definir componentes auxiliares necessários à obtenção de placas do material compósito.
- Aplicar planejamento experimental para definição da composição base do material compósito.
- Definir estatisticamente as características físico-químicas e mecânicas do compósito.

CAPÍTULO I

REVISÃO DA LITERATURA

1.3. REVISÃO DE LITERATURA

1.3.1. Aspecto Histórico do Gesso

Desde tempos remotos, o gesso tem sido amplamente empregado em diversas aplicações, demonstrando sua relevância ao longo da história humana (APOLINÁRIO, 2015). Trata-se de um mineral pulverulento, caracterizado por uma elevada concentração de sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), usualmente presente em formações de rochas sedimentares (SOUZA, 2023).

Conforme estudos conduzidos por Pinheiro (2015), pesquisas realizadas por Gourdin e Kingery em 1975 evidenciaram a utilização de gesso nos blocos que compõem as Pirâmides de Gizé, no Egito, datando aproximadamente de 2800 a.C. A presença desse material também foi identificada em ornamentos decorativos descobertos nas ruínas localizadas em territórios da Síria e Turquia (RAMOS, 2016).

Munhoz (2016) aponta que o gesso desempenhou um papel significativo em construções de infraestrutura, como barragens e canais no continente africano, sendo utilizado em conjunto com argila para a confecção de blocos destinados à edificação de habitações.

A introdução do gesso no Ocidente ocorreu após a ocupação romana em 222 a.C., onde sua utilização se consolidou rapidamente, especialmente na França. Nessa região, o material foi aplicado em elementos arquitetônicos, como divisórias internas e na ornamentação de sarcófagos (PINHEIRO, 2015). No início do século XIII, a exploração de jazidas de gipsita foi documentada em uma carta real que mencionava a existência de 18 depósitos, o que impulsionou sua disseminação por toda a Europa, promovendo seu emprego na construção civil (FERREIRA, 2017).

Somente no século XX, impulsionado pela evolução das práticas industriais e pelo desenvolvimento de tecnologias avançadas, o gesso consolidou sua aplicação em escala global, assumindo uma posição de destaque em diversos setores produtivos.

1.3.2. Importância da Gipsita para Pernambuco

A obtenção do gesso decorre do processo de calcinação do mineral gipsita, sendo considerada uma operação relativamente descomplicada, o que possivelmente explica sua ampla utilização em civilizações antigas. Para sua produção, é necessário submeter a gipsita a um aquecimento em torno de 160°C, seguido pela moagem para redução a pó fino (NASCIMENTO; PIMENTEL, 2016).

Conforme Bauer (2001), o gesso integra uma classe de aglomerantes simples, cuja composição é predominantemente constituída por sulfatos parcialmente hidratados e anidros de cálcio. A NBR 13207:1994, por sua vez, descreve o gesso como o produto resultante do processo de calcinação e moagem da gipsita, reduzindo-a a um material pulverizado. Munhoz e Renófoi (2014) reforçam essa definição ao caracterizá-lo como um recurso utilizado na construção civil, seja em revestimentos, na fabricação de placas, na composição de cimentos ou na agricultura, sendo classificado como um aglomerante aéreo obtido essencialmente por meio da calcinação e trituração do mineral gipsita.

Petrucci (1998) destaca o gesso como o primeiro aglomerante de natureza química ativo, salientando sua relevância histórica na criação da alvenaria de pedra. O autor também aponta sua aplicação em construções milenares, como as Pirâmides do Egito, além de evidenciar sua solubilidade em água, propriedade que justifica seu uso frequente em revestimentos e elementos decorativos internos.

Na construção civil, o gesso utilizado é majoritariamente do tipo beta, apresentando características específicas, como cristais heterogêneos e malformados, que conferem ao material um tempo de pega reduzido e uma resistência mecânica aprimorada.

Segundo a Associação Brasileira dos Fabricantes de Gesso (ABFG, 2009), no Brasil, o uso do gesso na construção civil ganhou expressividade a partir da década de 1990, expandindo sua aplicação para diversas áreas. No entanto, Bezerra (2015) observa que, apesar de sua crescente utilização, o consumo interno de gesso no país ainda é modesto em comparação com países de economias mais avançadas. Em 2010, a produção nacional atingiu aproximadamente 2,75 milhões de toneladas, enquanto o consumo interno foi estimado em 2,82 milhões de toneladas (LYRA, 2015).

O Brasil possui reservas significativas de gipsita, distribuídas por nove estados. Contudo, o maior volume de produção está concentrado no Polo Gesseiro do Araripe, localizado no oeste do estado de Pernambuco. Essa região, como ilustrado na Figura 1, destaca-se como o principal centro de exploração e transformação desse mineral, conforme relatado pelo Sindicato da Indústria do Gesso do Estado de Pernambuco (SINDUSGESSO, 2018).

Figura 1. Polo Gesseiro de Pernambuco



Fonte: Filho (2010)

Pernambuco responde por aproximadamente 79% da produção nacional de gesso, seguido pelo estado do Maranhão, que contribui com 17,3%, enquanto Tocantins (2,2%), Pará (0,4%), Amazonas (0,2%), Rio Grande do Norte (0,1%) e Ceará (0,1%) completam a distribuição regional da produção no Brasil (BRASIL, 2018). Segundo o Sindicato da Indústria do Gesso do Estado de Pernambuco (SINDUSGESSO), a região do Polo Gesseiro de Pernambuco detém reservas estimadas em 1,22 bilhões de toneladas de gipsita, sendo reconhecida mundialmente pela elevada pureza do mineral. Da produção pernambucana, 61% destinam-se à confecção de blocos e placas, 35% à fabricação de revestimentos, 3% à produção de moldes cerâmicos e 1% a outras finalidades (SINDUSGESSO, 2018).

Em 2017, o Brasil registrou uma produção de gipsita bruta ROM (*Run of Mine*) de 2,1 milhões de toneladas, representando uma redução de 21,9% em relação ao ano anterior. Durante o mesmo período, 39 empresas declararam-se como produtoras do minério, sendo as maiores contribuintes Mineradora São Jorge, Gesso Integral, Rocha Nobre Mineração, Mineração Alto Bonito, Votorantim Cimentos N/NE,

Mineradora Sombra da Serra, Mineração Puluca, Alencar e Parente Mineração, Indústria de Gessos Especiais e Royal Gipso. Juntas, essas companhias foram responsáveis por 83,3% da produção nacional em 2017 (BRASIL, 2018).

Ainda em 2017, o Brasil exportou aproximadamente 207 mil toneladas de gipsita e seus derivados, conforme dados da Agência Nacional de Mineração. O Sumário Mineral Brasileiro revela que a China liderou a produção mundial de gipsita no mesmo ano, com 130 milhões de toneladas, enquanto o Brasil ocupou a 16ª posição no ranking global, conforme tabela 1. O consumo interno de gipsita no Brasil foi de cerca de 2,3 milhões de toneladas, o que se traduz em um consumo per capita anual de aproximadamente 11 kg, valor substancialmente inferior à média observada em países industrializados.

Embora o gesso tenha ampla aplicabilidade na construção civil, no Brasil ele é predominantemente utilizado em revestimentos verticais, seja na forma de argamassa, pasta ou gesso projetado. Em termos de exploração mineral, em 2017, a Agência Nacional de Mineração recebeu 36 requerimentos para pesquisas relacionadas à gipsita, sendo 50% referentes a áreas no estado de Pernambuco. Desses pedidos, foram concedidas três autorizações de lavra, todas localizadas no Polo Gesseiro de Pernambuco, reforçando a importância estratégica dessa região para a indústria do gesso nacional.

Tabela 1. Reserva e Produção Mundial da Gipsita

Discriminação	Reservas (10 ² t)	produção (10 ² t)		
Países	2016	2016	2017	(%)
Brasil	450.000	2.674	2.113	0.8
China	nd	130.000	130.000	50.0
Estados Unidos da América	700.000	17.000	17.500	6.7
Irã	1.600	16.000	16.000	6.2
Tailândia	nd	11.300	11.000	4.2
Turquia	170.000	9.000	9.000	3.5
Itália	nd	8.550	8.600	3.3
Espanha	nd	7.000	7.000	2.7
Omã	4.900	6.050	6.000	2.3
México	nd	5.380	5.400	2.1
Japão	nd	4.670	4.700	1.8
Rússia	nd	4.400	4.400	1.7
Índia	39.000	3.500	3.500	1,3
França	nd	3.280	3.300	1.3
Austrália	nd	2.580	2.600	1.0
Egito	nd	2.200	2.200	0.8
Argélia	nd	2.130	2.100	0.8

Arábia Saudita	nd	1.860	1.900	0.7
Alemanha	nd	1.800	1.800	0.7
Paquistão	nd	1.660	1.700	0.7
Canadá	450.000	1.630	1.600	0.6
Argentina	nd	1.500	1.500	0.6
Reino Unido	30.000	1.200	1.200	0.5
outros países	nd	15.636	14.887	5.7
TOTAL	nd	261.000	260.000	100.0

Fonte: BRASIL (2020)

Tabela 2. Principais Estatísticas - Brasil (2020)

Discriminação		Unidades	2015	2016	2017
Produção	Gipsita (ROM)	(t)	3.161.856	2.674.154	2.113.208
Importação	Bens Primários	(t)	167.326	208.466	157.698
		(10 ² US\$-FOB)	2.140	2.859	2013
	Manufaturados	(t)	53.180	36.782	49.216
		(103 US\$-FOB)	13.843	9.175	11.697
Exportação	Bens Primários	(t)	2	0	81
		(10 ² US\$-FOB)	15	8	10
	Manufaturados	(t)	28.753	29.920	34.754
		(103 US\$-FOB)	2.024	1.805	2.069
Consumo aparente(t)	Gipsita (ROM)	(t)	3.353.607	2.889.481	2.285.287
Preços dos manufaturados	Imp/Exp (t)	(US\$/t)	260.31/70.39	249.44/60.33	237.67/60.31

Fonte: BRASIL (2020)

1.3.3. Processo Produtivo do Gesso

O processo produtivo de gesso no Polo Gesseiro do Araripe (PGA), situado no oeste de Pernambuco, segue um fluxo industrial amplamente consolidado, desde a extração do minério até a transformação final em produtos comercializáveis. A equação cinética para a obtenção do gesso a partir do mineral Gipsita que descreve o processo de desidratação térmica desse mineral ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ou sulfato de cálcio di-hidratado, durante a etapa de calcinação é:



Nesta reação, a gipsita (sulfato de cálcio di-hidratado) é aquecida a temperaturas típicas entre 140°C e 170°C, resultando na formação do semidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), conhecido como gesso.

A formação de anidritas é um aspecto crítico na obtenção do gesso a partir da gipsita, ocorrendo quando o processo de calcinação excede as condições adequadas, tanto em termos de temperatura quanto de tempo de resistência. A anidrita é uma forma anidra do sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot \varepsilon \text{H}_2\text{O}$), em que $0 \geq \varepsilon < 0,5$ e pode ser um subproduto indesejado ou intencional, dependendo da aplicação desejada. Dependendo das condições de temperatura e da atmosfera do forno, a anidrita formada pode ser solúvel ou insolúvel. A anidrita solúvel é obtida em condições moderadas de temperatura, enquanto a insolúvel se forma em temperaturas mais elevadas ($>400^\circ\text{C}$) ou sob tempos prolongados.

O PGA é responsável por cerca de 95% da produção de gipsita no Brasil e caracteriza-se por operar com altos volumes de produção e um ciclo integrado (Figura 2) que abrange as seguintes etapas principais:

- i. **Extração da Gipsita** - O processo inicia-se com a exploração das jazidas de gipsita, um minério composto principalmente por sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). A extração é realizada em minas a céu aberto, utilizando equipamentos como escavadeiras e caminhões para o transporte do mineral até as unidades de beneficiamento.
- ii. **Beneficiamento do Minério** - O minério extraído é submetido ao beneficiamento, que inclui operações como:
 - Trituração: O material bruto é fragmentado em partículas menores por meio de britadores.
 - Peneiramento: As partículas são classificadas para garantir uma granulometria uniforme. Este estágio é crucial para preparar a gipsita para o processo de calcinação.

Figura 2. Processo produtivo do gesso



Fonte: SAVI, 2014

- iii. **Calcinação** - Na etapa de calcinação, a gipsita é aquecida em fornos industriais a temperaturas controladas entre 140°C e 160°C. Esse aquecimento remove parte da água de cristalização do mineral, convertendo-o em gesso semi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). No Polo Gesseiro do Araripe, são utilizados principalmente dois tipos de fornos:
- Fornos rotativos: Com maior capacidade e controle térmico, adequados para grandes volumes.
 - Forno panela ou calcinadores tipo marmitta (estática ou rotativa): Mais simples e comumente utilizados por pequenas e médias indústrias.
- iv. **Moagem e Homogeneização** - Após a calcinação, o material semi-hidratado é moído até adquirir uma granulometria fina e uniforme. A moagem é seguida por um processo de homogeneização, assegurando a qualidade e a padronização do gesso em pó.
- v. **Embalagem e Distribuição** - O gesso em pó, já processado, é acondicionado em sacos de diferentes capacidades, prontos para comercialização. Os principais produtos incluem:
- Gesso para revestimentos (gesso tipo beta): Utilizado em acabamentos de construção.
 - Blocos e placas: Amplamente empregados em divisórias internas.
 - Moldes cerâmicos: Aplicados na indústria de louças e cerâmica.

1.3.4. Tipos de Gesso

Parte integrante de uma família de aglomerantes obtida por meio da calcinação do mineral gipsita, o gesso apresenta diferentes composições derivadas de variações no grau de hidratação, conforme ilustrado no Quadro 1 (BAUER, 2000, apud FERREIRA, 2017). As formas mais comuns derivadas da gipsita incluem o semi-hidrato (α e β), a anidrita tipo III ou solúvel, a anidrita tipo II ou insolúvel e a anidrita tipo I. Essas variações são diretamente influenciadas pelas condições de temperatura e pressão empregadas durante o processo de calcinação.

Quadro 1. Compostos obtidos a partir da calcinação da gipsita

TEMPERATURA DE CALCINAÇÃO	COMPOSTO ORIGINADO	CARACTERÍSTICAS
140°C a 160°C	Semi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$)	Solúvel. no Pode resultar Semihidrato α ou β .
160°C a 190°C	Anidrita III ($\text{CaSO}_4 \cdot \epsilon\text{H}_2\text{O}$)	
220°C a 800°C	Anidrita II (CaSO_4)	Tem pega rápida. Pode conter água de cristalização em baixo teor. Com a umidade do ar, se transforma em semi-hidrato.
Acima de 800°C	Anidrita I (CaSO_4)	Baixa velocidade de hidratação.

Fonte: BAUER, 2000, apud FERREIRA, 2017

De acordo com Apolinário (2015), Ferreira (2017) e Ferreira (2023), as fases resultantes do processo de calcinação podem ser definidas da seguinte forma:

i. Semi-hidrato - O semi-hidrato é a primeira forma cristalina obtida durante a calcinação da gipsita, sendo produzido quando o mineral é submetido a temperaturas entre 140°C e 160°C, resultando em uma composição molecular definida como $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. Esse material pode ser subdividido em duas variantes:

a. Semi-hidrato α - Produzido sob condições controladas de pressão de vapor de água, o Semi-hidrato α apresenta cristais grandes, homogêneos e bem definidos. Quando misturado com água, forma um material de alta resistência mecânica e uniformidade, tornando-o ideal para aplicações que exigem maior desempenho estrutural. Entretanto, seu processo de produção é mais oneroso devido às condições específicas necessárias.

b. Semi-hidrato β - Obtido por desidratação em pressão atmosférica, via processo seco, o Semi-hidrato β é caracterizado por cristais irregulares e fragmentados. Essa configuração resulta em uma maior área superficial, demandando maior quantidade de água durante sua aplicação. Consequentemente, apresenta menor resistência mecânica em comparação ao tipo α , mas seu custo reduzido e ampla disponibilidade o tornam amplamente utilizado na construção civil, especialmente em revestimentos e argamassas.

ii. Anidrita tipo III ou anidrita solúvel - A anidrita tipo III é uma fase intermediária entre o semi-hidrato e a anidrita tipo II. Obtida em temperaturas de 160°C a 190°C, possui fórmula química aproximada $\text{CaSO}_4 \cdot \epsilon \text{H}_2\text{O}$. Caracteriza-se por sua elevada reatividade e facilidade de reversão para Semi-hidrato, o que a torna útil como acelerador de pega em sistemas cimentícios.

iii. Anidrita tipo II ou anidrita insolúvel - Formada em temperaturas que variam entre 220°C e 800°C, a anidrita tipo II apresenta diferentes comportamentos conforme o intervalo térmico aplicado:

- 220°C a 350°C: Nesta faixa, o material é conhecido como "supercalcinado" e possui uma reação lenta com água, podendo levar até sete dias para completar a hidratação.
- 700°C a 800°C: Quando submetida a temperaturas mais elevadas, a anidrita é denominada "calcinação à morte", tornando-se quase inerte e hidratando apenas após vários meses. Essa forma de anidrita tem aplicações específicas, embora sua reatividade reduzida limite seu uso em contextos que demandam tempos curtos de pega.

iv. Anidrita tipo I - Também denominada anidrita de alta temperatura ou anidrita α , é formada quando a gipsita é calcinada em temperaturas extremamente elevadas, entre 1100°C e 1200°C. Durante esse processo, ocorre a dissociação térmica parcial do sulfato de cálcio (CaSO_4), resultando na formação de óxido de cálcio como impureza. Essa fase apresenta características únicas devido à sua composição heterogênea e às condições extremas necessárias para sua obtenção.

1.3.5. Propriedades do Gesso

As propriedades do gesso utilizado na construção civil são regulamentadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que especifica os parâmetros físicos, mecânicos e químicos do material. Esses requisitos estão detalhados nas normas aplicáveis e são essenciais para assegurar a qualidade e a eficiência do gesso nas diversas aplicações do setor.

De acordo com a NBR 13.207 (ABNT, 2017), o gesso é um material obtido a partir da gipsita ou de resíduos de gesso, cuja composição predominante é o sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), calcinado e reduzido a pó. Este material pode conter aditivos ou adições, dependendo da aplicação específica.

1.3.5.1. Propriedades Físicas e Mecânicas

A norma NBR 13.207/17 estabelece limites mínimos para propriedades físicas e mecânicas, como massa unitária, dureza e resistência de aderência, conforme apresentado na Tabela 3:

Tabela 3. Requisitos físicos e mecânicos do gesso para construção civil

ENSAIO	UNIDADE	LIMITE
Massa unitária	g/cm ³	≥ 600,0
Dureza	N/gmm ²	≥ 20,0
Aderência	Mpa	≥ 0,2

Fonte: ABNT 13.207 (2017)

A granulometria também é um fator determinante na classificação do gesso. A norma especifica requisitos granulométricos mínimos, permitindo a distinção entre gessos para fundição e para revestimento, como indicado na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4. Requisitos físicos do gesso para construção civil (granulometria via seca)

CLASSIFICAÇÃO DO GESSO	GRANULOMETRIA MÍNIMA
Gesso para fundição	(peneira aberta 0,29mm) ≥ 90% <u>passante</u>
Gesso para revestimento	(peneira aberta 0,21mm) ≥ 90% <u>passante</u>

Fonte: ABNT 13.207 (2017)

Além disso, o tempo de pega, um atributo essencial do gesso, varia conforme a finalidade e a aditivação, conforme demonstrado na Tabela 5:

Tabela 5. Requisitos físicos do gesso para construção civil (tempo de pega)

TEMPO DE PEGA (mm) ENSAIO	TEMPO DE PEGA (mm)	
	Início	Fim
Gesso para fundição	≤ 10	≤ 20
Gesso para revestimento (sem aditivos)	≥ 10	≥ 35
Gesso para revestimento (com aditivos)	≥ 4	≥ 50

Fonte: ABNT NBR 13.207 (2017)

Os requisitos químicos do gesso incluem os teores de água livre, água de cristalização, óxido de cálcio (CaO) e anidrido sulfúrico (SO₃). Esses parâmetros são apresentados na Tabela 6 a seguir.

1.3.5.2. Propriedades Químicas

Tabela 6. Requisitos químicos do gesso sem aditivos para construção civil

DETERMINAÇÃO QUÍMICA	LIMITES (%)
Água livre	Máx. 1,03
Água de cristalização	4,2 a 6,2
Óxido de cálcio (CaO)	Min. 38,0
Anidrido Sulfúrico (SO ₃)	Min. 53,0

Fonte: ABNT NBR 13.201 (2017)

Normas complementares, como a NBR 12.128 (1991) e a NBR 12.129 (1991), especificam os métodos para determinação das propriedades físicas, químicas e mecânicas do gesso.

1.3.5.3. Isolamento Acústico

O gesso é amplamente utilizado como material para isolamento acústico devido à sua capacidade de reduzir ruídos externos e criar um ambiente confortável. Canut (2016) afirma que o desempenho acústico de elementos à base de gesso depende de sua capacidade de isolar, absorver ou interromper a propagação sonora, características fundamentais para edifícios residenciais e comerciais.

Segundo Makalo (2015), o isolamento acústico está relacionado à densidade do material. Embora o gesso acartonado não possua elevada massa, sua eficiência pode ser melhorada por meio de técnicas como a aplicação de forros, paredes duplas e revestimentos.

1.3.5.4 Isolamento Térmico

O gesso também desempenha um papel importante no isolamento térmico, retardando a transferência de calor entre ambientes. Monteiro (2018) destaca que o gesso endurecido possui baixa condutividade térmica, sendo aproximadamente um terço daquela apresentada pelo tijolo comum.

Ribeiro (2016) explica que a água presente nas moléculas do gesso calcinado absorve calor durante sua evaporação, retardando a propagação de altas temperaturas em situações como incêndios, o que torna o gesso um material resiliente ao fogo.

Essas propriedades fazem do gesso um material versátil e indispensável na construção civil, promovendo eficiência térmica, acústica e mecânica em projetos modernos.

1.3.6. Resíduos de Poda de Árvores

De acordo com Piveta e Silva Filho (2014), a arborização urbana pode ser classificada em diversas categorias, abrangendo o reflorestamento de parques e

jardins, o manejo de terras privadas, a arborização natural e residual, bem como a arborização de estradas e ruas, conforme ilustrado na Figura 3, abaixo.

Figura 3. Fotografias de operações de poda de árvores



Fonte: MEIRA (2016)

Entende-se por arborização urbana todas as formações vegetais arbóreas localizadas nas áreas urbanas e em suas zonas de influência, sejam elas de natureza pública ou privada. Esse conceito inclui tanto o plantio direcionado ao reflorestamento quanto o manejo e beneficiamento de árvores já existentes (Meira, 2016).

Nos últimos anos, a busca por alternativas sustentáveis que incorporem o reuso de resíduos provenientes da poda de árvores tem se intensificado no cenário científico mundial, especialmente em função das necessidades da construção civil. Uma gestão inadequada desses resíduos, conhecidos como Urban Residual Wood (URW), gera impactos significativos nos âmbitos ambiental, social e econômico. Entre os problemas associados estão os elevados custos para destinação em aterros sanitários, riscos de incêndios e poluição do solo e do ar.

Conforme os critérios de classificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1990), os resíduos de poda são considerados biodegradáveis devido ao elevado teor de lignina, sendo enquadrados como Classe II (inerentes). A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) também classifica esses resíduos como não perigosos, pertencentes à categoria de resíduos de limpeza urbana, que, quando

somados aos resíduos domiciliares, passam a integrar o grupo dos resíduos sólidos urbanos (Cortes, 2019).

A origem desses resíduos pode ser categorizada em função de diferentes fatores, tais como práticas de poda, limpeza e manutenção de árvores urbanas, além de eventos naturais, como tempestades, envelhecimento natural das árvores ou danos causados por ações humanas (Meira, 2016).

A composição química dos resíduos de poda revela que esses materiais são formados por aproximadamente 50% de carbono, 6% de hidrogênio, 44% de oxigênio e 1% de nitrogênio (Silva, 2015). A matriz estrutural desses resíduos é majoritariamente composta por:

- **Celulose e hemicelulose:** Polímeros que formam a holocelulose, responsável pela resistência estrutural.
- **Lignina:** Um polímero aromático natural de alto peso molecular, que confere rigidez às paredes celulares e define usos comerciais, como na fabricação de madeira processada.

Além dos componentes orgânicos, esses resíduos contêm substâncias inorgânicas, classificadas como cinzas, que incluem elementos como potássio, cálcio, magnésio, manganês, ferro e alumínio, bem como traços de compostos como carbonatos, silicatos, cloretos e sulfatos (Cardoso, 2017).

A utilização de fibras oriundas da poda de árvores apresenta diversas vantagens, como o aumento da resistência mecânica, à fadiga e ao impacto, bem como a melhoria da flexibilidade e da rigidez em matrizes frágeis. Segundo Meira (2016), essas fibras podem ser incorporadas em materiais para a fabricação de componentes leves e finos com excelente desempenho mecânico, além de proporcionar bom isolamento térmico e acústico.

Conforme Cortes (2019), as fibras de resíduos de poda apresentam ampla viabilidade econômica, sendo particularmente úteis na produção de materiais sustentáveis para a construção civil. A classificação desses resíduos em função da espécie, tamanho e origem contribui para a definição de usos mais adequados, maximizando o aproveitamento de seus potenciais.

Portanto, o manejo e reaproveitamento sustentável de resíduos de poda de árvores representam uma oportunidade para minimizar impactos ambientais e

promover a economia circular, especialmente em contextos urbanos onde sua geração é constante e significativa.

1.3.7. Baba de Cupim Sintética

Na década de 1950, grande parte das rodovias era composta por estradas de terra, que, durante os períodos de chuvas intensas, tornavam-se praticamente intransitáveis. A manutenção dessas vias era frequente e onerosa, o que demandava soluções criativas e eficazes. Entre as práticas utilizadas, destacava-se o aproveitamento de cupinzeiros localizados nas margens das estradas, cuja "baba de cupim" era extraída e aplicada em pontos críticos para estabilizar o solo de forma natural.

Após a realização de 328 ensaios com diferentes tipos de solos, a empresa Dynasol S.A. Indústria e Comércio desenvolveu em 1950 uma solução sintética que replicava as propriedades estabilizantes da "baba de cupim". O produto, denominado DS-328, foi patenteado como uma alternativa sustentável e eficiente (DYNOSOLO S.A., 2016).

O DS-328 é um sal líquido à base de óleos vegetais, de coloração esverdeada, com densidade mínima a 25°C de 1,035 g/cm³ e pH mínimo de 10,5 em solução a 1%. Solúvel em água, apresenta características coesivas e hidrofugantes, o que despertou interesse no meio técnico e acadêmico. Este produto é amplamente empregado na estabilização de solos que não possuem resistência suficiente para suportar as cargas impostas pelo tráfego. Uma vez aplicado, torna o solo adequadamente estabilizado, possibilitando seu uso como base, sub-base ou reforço de leito em diferentes camadas de pavimentação (Figura 4).

Figura 4. Aspectos visuais da Baba de Cupim (DS-328)



Fonte: Corrêa (2015)

Quando o DS-328 entra em contato com reagentes e partículas do solo, ocorre a formação de um composto metalo-orgânico insolúvel e permanente. Este fenômeno resulta de uma interação química que promove uma coesão estável entre as partículas do solo, melhorando suas propriedades mecânicas (SILVA, 2016).

A composição mineralógica das partículas finas de argila desempenha um papel essencial nesse processo. A superfície dessas partículas é carregada negativamente (ânions), atraindo íons positivos (cátions) presentes na água, como Ca^{2+} , Na^+ e K^+ . Esses cátions se ligam fortemente às partículas, originando a água absorvida, que dificulta a compactação e a drenagem natural do solo.

Com a adição do DS-328 à água, ocorre uma ativação dos íons H^+ e OH^- , promovendo a troca de cargas elétricas entre o produto e o solo. Essa troca iônica rompe as ligações eletroquímicas que mantêm a água absorvida na estrutura do solo, convertendo-a em água livre. Este processo facilita a remoção da água por gravidade, evaporação ou compactação, melhorando as propriedades físicas do solo (AUGUSTO, 2015).

Makusa (2016) descreve a troca catiônica como uma reação estequiométrica, onde o aumento da concentração de um cátion específico, como o H^+ , substitui outros cátions presentes na matriz do solo. Este mecanismo é fundamental para a transformação do solo, tornando-o mais estável e apto para aplicações em pavimentação.

O DS-328 é amplamente utilizado em projetos de infraestrutura rodoviária para aprimorar as características do solo. Dependendo do tipo de solo e da aplicação desejada, a concentração do produto e dos reagentes pode ser ajustada para otimizar os resultados. Uma das vantagens desse produto é sua natureza não tóxica, o que o torna ambientalmente seguro e viável para usos em larga escala.

A estabilização química com o DS-328 é particularmente indicada em locais onde o solo exposto pode permanecer por longos períodos sem revestimento, devido à sua resistência à erosão e às intempéries. Além disso, o produto reduz a necessidade de transporte de materiais adicionais, como brita ou areia, contribuindo para a redução dos custos logísticos e ambientais.

A figura 5 apresenta as quantidades de materiais necessários para a construção de uma base de 1.000 metros de extensão, 7,20 metros de largura e 0,15 metros de espessura, utilizando solo local com densidade aparente seca de 1.670 kg/m³.

FIGURA 5. Quantidades necessárias de matérias



Fonte: Corrêa (2015)

O desenvolvimento e aplicação do DS-328 representam um avanço significativo na estabilização de solos, combinando sustentabilidade com eficiência técnica. Seu mecanismo de troca catiônica, associado às propriedades químicas únicas, possibilita a melhoria de solos de baixa qualidade, promovendo maior durabilidade e resistência em projetos de pavimentação. Esse tipo de inovação é essencial para atender às demandas crescentes por soluções sustentáveis na infraestrutura rodoviária.

1.3.8 Light Steel Frame

O Light Steel Frame (LSF) é conceituado pelo *The Swedish Institute of Steel Construction* (SBI) como uma técnica construtiva baseada no uso de perfis industrializados de aço galvanizado leve. Esses perfis desempenham a função de esqueleto estrutural, com capacidade para suportar as cargas que incidem sobre a edificação e, simultaneamente, conferir forma e suporte aos demais elementos construtivos (MATTOS, 2017). A Figura 6 ilustra essa aplicação.

como uma solução eficiente e inovadora, alinhada às exigências contemporâneas de sustentabilidade e eficiência na construção civil.

1.3.9. Análise da Revisão

A análise dos referenciais teóricos evidencia o potencial inovador e sustentável do desenvolvimento de compósitos de gesso associados a materiais alternativos, como baba de cupim sintética e resíduos de poda de árvores. Historicamente, o gesso se apresenta como um material de construção versátil e amplamente utilizado, sendo a gipsita sua principal matéria-prima. A transformação da gipsita por meio de processos de calcinação e aditivação resulta em materiais adaptáveis a diferentes aplicações na construção civil, como revestimentos, divisórias e moldes.

A integração de resíduos de poda de árvores no compósito aborda diretamente a problemática ambiental associada ao descarte inadequado desses resíduos urbanos. A alta concentração de celulose e lignina nos resíduos possibilita a melhora das propriedades mecânicas e térmicas do compósito, contribuindo para maior durabilidade e resistência à umidade. Adicionalmente, o uso de baba de cupim sintética, que reproduz características de coesão e impermeabilização naturais, representa uma solução técnica viável e sustentável, alinhada aos princípios de inovação em materiais de construção.

No contexto de sistemas construtivos modernos, como o *Light Steel Frame* (LSF), a aplicação de placas de *drywall* fabricadas com compósitos inovadores reforça a perspectiva de eficiência e sustentabilidade. Este sistema, caracterizado por sua construção a seco e leveza estrutural, requer materiais com alto desempenho termoacústico e resistência mecânica, propriedades que os compósitos estudados se propõem a atender.

Portanto, os fundamentos técnicos, históricos e ambientais discutidos na revisão de literatura consolidam a relevância e a viabilidade do presente estudo, promovendo uma alternativa viável para o setor da construção civil, que alia desempenho técnico, economia circular e redução de impactos ambientais. A pesquisa contribui não apenas para o avanço científico, mas também para o desenvolvimento de soluções práticas que favorecem a sustentabilidade no ambiente construído.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7211 - Agregado para concreto**. Rio de Janeiro. 1983.

_____. **NBR 13207** - Gesso para construção civil. Rio de Janeiro. 1994.

_____. **NBR 12127 (MB-3468)** - Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro. 1991a.

_____. **NBR 12128 (MB-3469)** - Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas da pasta. Rio de Janeiro. 1991b.

_____. **NBR 12129 (MB-3470)** - Gesso para construção - Determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro. 1991c.

_____. **NBR 12130**: gesso para construção: determinação da água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 14716**: Chapas de gesso acartonado - Verificação das características geométricas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 14717**: Chapas de gesso acartonado - Determinação das características físicas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 11174** - (ou NB 1264 de 1989) Armazenamento de resíduos Classe II - não-inerte e III - inertes - Procedimentos. São Paulo.1990.

ABRASGESSO - **Associação Brasileira dos Fabricantes de Gesso**. Números do segmento. São Paulo, 2018.

APOLINARIO, G.M. **Reutilização do resíduo de gesso da construção civil**. Trabalho de conclusão de curso. UNIJUÍ Universidade Regional Do Noroeste Do Estado Do Rio Grande Do Sul. Ijuí – RS, 2015.

ARAUJO, L.F.; FARIAS, B.M. de. **Empregabilidade do gesso na Construção Civil. Engenharia na prática: construção e inovação**. Rio de Janeiro: Epitaya, Vol. 2, cap. 4, p 89-108. 2021.

AUGUSTO, C.R.M., *et al.* **"A utilização do aditivo baba de cupim sintético para reforços subleitos."** Trabalho de Conclusão do curso (Engenharia Civil) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 82f., 2015.

BALTAR, C.A.M.; BASTOS, F.F., LUZ, A.B. **Rochas e Minerais Industriais, Gipsita**. CETEM, Rio de Janeiro, 2014.

BARBOSA, N.P.; GHAVAMI, K. **Terra Crua para Edificações**. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: Ibracon, 2014.

BAUER, L.A. F. **Materiais de Construção**. Vol. 1, 5. ed. revisada. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. (1979). 2001.

BEZERRA, M.S. **Relatório Técnico 34 Perfil da Gipsita**. Ministério de Minas e Energia - MME. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral - SGM. 2015. Disponível em: http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/a_mineracao_brasileira/P24_RT34_Perfil_da_Gipsita.pdf. Acesso em: 29/08/2023.

CANUT, M.M.C. **Estudo da Viabilidade do Uso do Resíduo Fosfogesso como Material de Construção**. Dissertação de Mestrado em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2016.

CARDOSO, G.V.; ROSA, C.A.B.; GUARIENTI, A.F.; PEDRAZZI, C.; SOUZA, M.C.H.; FRIZZO, S.M.B.; FOELKEL, C.E.B. **Adequação de metodologia amostral de madeira de Eucalyptus saligna e Eucalyptus globulus para determinação do teor de cinzas**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CELULOSE E PAPEL, 34., 2017, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 2017.

CORRÊA, A.A.R., *et al.* Incorporation of bamboo particles and “synthetic termite saliva” in adobes. **Construction and Building Materials**, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 98: 250-256. 2015.

CORTEZ, L.C. **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia**: Estudo de Caso: AES ELETROPAULO. São Paulo, 2019. 246p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

CRISTELO, N., **Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Guimarães - Portugal, 2014.

DYNOSOLO S.A. **A Tecnologia da Baba de Cupim na Construção Civil**. 2016.

EIRES, R.; JALALI, S. e CAMÕES, A. **Novos materiais de construção à base de gesso e desperdícios industriais**. Congresso Construção 2017 - 12.º Congresso Nacional. Coimbra. 2017.

FLEURY, L.E. **Análise Das Vedações Verticais Internas de Drywall e Alvernaria de Blocos Cerâmicos com Estudo de Caso Comparativo**. 2019. 66 p. Dissertação

(Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - FATECS, Brasília, 2019.

FERNANDES, J.C.V.; BELTRAME, L.F. **Revestimentos de Argamassa**

Convencional e de Gesso Reciclado Projetado: um estudo comparativo. Universidade do Sul de Santa Catarina. Tubarão. 2017. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/4427/1/TCC%20%20%28Revestimento%20de%20Gesso%20Projetado%20-%20Jo%C3%A3o%20Clever%20e%20Luizi%20Beltrame%29.pdf>

FERREIRA, F.C. **Estudo de caracterização do gesso para revestimento produzido no polo gesseiro do Araripe** – UFPE, 2023.

FERREIRA, R. A. S.; SILVA, I. A.; YADAVA, Y. P.; BARAÚNA, O. S. e AGUIAR, J. A. O. **Estudo da cinética de decomposição dos diferentes tipos de gipsita do Araripe Pernambucano.** Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica. João Pessoa. 2017.

HARTKE, R.F. **Modelagem e Simulação térmica de um forno rotativo para a produção de agregado de argila calcinada.** Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2020..

LYRA SOBRINHO, A.C.P.; AMORIN NETO, A.A e DANTAS, J.O.C. **Gipsita.** Sumário Mineral. Ministério das Minas e Energia - Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Vol. 31, 2015.

LOPES, A.K.; RODRIGUES, F.; FERREIRA, V.M. e VICENTE, R. **A Sustainable Urban Center Refurbishment. Recent Reserarches in Energy & Environment.** Aveiro. 2015.

MAKUSA, G.P., Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review. **Sweden: Lulea° University of Technology**, 2016.

MALKO, J.A.C., **Aplicabilidade de Enzimas para Melhoramento de Solos em Pavimentação.** Dissertação (Mestrado Ciências em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUCRio. Rio de Janeiro – RJ, 2015.

MARIANE, A. Execução de parede de drywall: **Revista Mercado Construção, negócios de incorporação e construção**, Ed. 134, setembro, 2019.

MATTOS, R.C. **Adequação do projeto de uma residência unifamiliar com o sistema construtivo light steel framing e análise de custo.** Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. 2017. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/bitstream/1/6155/1/projetolightsteelframing.p>

df

MEIRA, A.M. **Gestão de resíduos da arborização urbana**. Piracicaba, 2016. 178p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2016.

MONTEIRO, R.S; **Panorama do Uso do Gesso e Seus Resíduos na Construção Civil em Maceió** - Trabalho de Conclusão de Curso Universidade Federal de Alagoas, 2018.

MITIDIERI, C. Cargas Suspensas: **Revista Técnica**, Ed. 142, janeiro, 2019.

MOUSAVI, S.E., KARAMVAND, A., Assessment of strength development in stabilized soil with CBR PLUS and silica sand. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, (English Edition), JTTE: 142, 2020.

MUNHOZ, F.C. **Utilização do gesso para fabricação de artefatos alternativos, no contexto de produção mais limpa**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção da Universidade Estadual Paulista. 2016. Disponível em: http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=125527. Acesso em: 01/05/2023.

MUNHOZ, F. C.; RENÓFIO, A. **Uso da Gipsita na Construção Civil e Adequação para P+L**. XIII SIMPEC. Bauru. 2014.

NASCIMENTO, F.J.F. e PIMENTEL, L.L. **Reaproveitamento de resíduo de gesso**. Anais do XV Encontro de Iniciação Científica da PUC-Campinas. ISSN 1982-0178. 2016.

NUNES, H.P. **Estudo Da Aplicação Do Drywall Em Edificação Vertical**. 2015. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de Construção Civil, Campo Mourão, 2015.

PINHEIRO, S.M.M. **Gesso reciclado**: Avaliação de propriedades para uso em componentes. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo, 2015.

PIVETTA, K.F.L.; SILVA FILHO, D.F. **Arborização Urbana**. Boletim Acadêmico. Jaboticabal, SP: UNESP/FCAV/FUNEP. 2014. 75p

PETRUCCI, E.G.R. **Materiais de Construção**, 11ª ed. Editora Globo. São Paulo. 1998.

PORTAL DRYWALL. Disponível em: <http://www.portaldrywall.com.br>. Acesso em 29/12/2023;

RAMOS, M.C. **Gesso na escultura contemporânea**: A história e as técnicas. p. 14–21, 2016.

RIBEIRO, A.S. **Produção de gesso reciclado a partir de resíduos oriundos da Construção Civil**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana. Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 105 pg, Março de 2016.

SAVI, O. **Produção de placas de forro com a reciclagem de gesso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Federal de Maringá, 2014.

SILVA, M.G.S. **Desenvolvimento de compósitos a base de gesso e pó de fibras de coco**. Dissertação de mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão - SE. 2013. Disponível em: <http://www.ebookcult.com.br/?acao=vert.livro&id=86746>. Acesso em: 23/05/2023.

SILVA, L.F. Situação da arborização viária e proposta de espécies para os bairros Antônio Zanaga I e II, da cidade de Americana/SP. 2005. 80 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2015.

Souza, Edjan de Castro, Raquel Aline Pessoa Oliveira and Andrea De Vasconcelos Ferraz. "Characterization of different samples of the gypsum mineral from the Araripe gypsum Pole: from macro to micro with Rietveld refinement." *HOLOS* (2023): n. pag. DOI: 10.15628/holos.2023.14902

SINDUSGESSO (Brasil) (Org.) - SINDUSGESSO - **Sindicato das Indústrias de Extração e Beneficiamento de Gipsita, Calcários, Derivados de Gesso e de Minerais Não-Metálicos do Estado de Pernambuco**. 2018.

VIANA, S.A.de O.; ALVES, É.C. Análise de Custo e Viabilidade Dentre os Sistemas de Vedação de Bloco Cerâmico e Drywall Associado ao Painel Monolite EPS. 2018.

CAPÍTULO II

**ARTIGO A SER ENVIADO PARA UM
PERIÓDICO QUALIS A-3**

**COMPÓSITO DE GESSO E RESÍDUO DE PODA
DE ÁRVORES COM ADIÇÃO DE BABA
DE CUPIM SINTÉTICA PARA PRODUÇÃO DE
PRÉ-MOLDADOS**

RESUMO

Este estudo explorou o desenvolvimento de um compósito inovador e sustentável composto por gesso e resíduos de poda de árvores (PA), aditivado com baba de cupim sintética (BCS) com vistas a aplicações em sistemas construtivos do tipo Light Steel Frame. Um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) foi aplicado para avaliar os efeitos da relação água/gesso (A/G), teor de PA (0,44 a 2,20 g/kg) e teor de BCS (0,44 a 2,20 mL/kg) nas propriedades de absorção de água (AA), capilaridade (CAP) e resistência à compressão (RC). O modelo ajustado para RC apresentou o melhor coeficiente de determinação $R^2=0,8305$, enquanto os modelos para AA e CAP apresentaram $R^2=0,7972$ e $R^2=0,7755$, respectivamente. A análise indicou que o aumento da relação A/G reduz a capilaridade e a absorção de água, enquanto o teor de PA influencia positivamente a resistência à compressão até um limite de saturação. O compósito resultante demonstra um potencial significativo para reduzir impactos ambientais e aprimorar as propriedades do gesso, destacando-se como uma solução sustentável para o setor da construção civil. Este trabalho fornece uma base técnica robusta para a ampliação do uso de materiais ecológicos e promove o reaproveitamento de resíduos orgânicos em aplicações práticas.

Palavras-chave: Gipsita, resíduos lignocelulósicos, DCCR, sustentabilidade, Light Steel Frame, propriedades físico-mecânicas.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções sustentáveis na construção civil tem estimulado o desenvolvimento de materiais alternativos que conciliem eficiência técnica e responsabilidade ambiental (Uliana et al., 2022). Nesse contexto, o gesso, amplamente empregado em sistemas construtivos devido à sua leveza, versatilidade e custo acessível, apresenta limitações significativas relacionadas à resistência mecânica e ao comportamento frente à umidade (Araujo, 2021). Essas restrições tornam sua aplicação inadequada em cenários que demandem maior durabilidade e desempenho estrutural. A incorporação de aditivos e resíduos orgânicos ao gesso surge como uma abordagem promissora para superar tais limitações, promovendo inovações alinhadas às diretrizes de sustentabilidade (Almeida et al., 2020).

O Polo Gesseiro do Araripe, localizado em Pernambuco, é responsável por aproximadamente 97% da produção nacional de gesso (SINDUSGESSO, 2018), desempenhando um papel estratégico na economia regional. Contudo, práticas mais sustentáveis que maximizem o reaproveitamento de recursos ainda são necessárias. A baba de cupim sintética (BCS), um composto químico derivado de óleos vegetais, destaca-se como um aditivo funcional com propriedades coesivas e hidrofugantes, contribuindo para a melhoria da trabalhabilidade e redução da permeabilidade em materiais cimentícios (Silva, 2016). De forma complementar, resíduos lignocelulósicos, como os provenientes de podas de árvores (PA), têm sido investigados devido à sua capacidade de reforço mecânico e de mitigação de impactos ambientais (Santanna 2022).

Neste trabalho, propõe-se o desenvolvimento de um compósito de gesso com adição de baba de cupim sintética e resíduo de poda de árvores para a fabricação de chapas divisórias aplicáveis em sistemas Light Steel Frame. Tal combinação visa não apenas melhorar as propriedades físico-mecânicas do gesso, como resistência à compressão e comportamento frente à umidade, mas também fomentar a reutilização de resíduos urbanos, promovendo práticas mais ecológicas e sustentáveis na construção civil (Gerolli, 2021; Pereira et al., 2019).

Utilizando o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), foram analisadas as interações entre a relação água/gesso, o teor de baba de cupim sintética e a fração de resíduo de poda de árvores, a fim de otimizar propriedades como absorção de água, capilaridade e resistência à compressão do compósito. A presente

pesquisa busca contribuir para o avanço técnico-científico na área de materiais de construção, oferecendo uma alternativa inovadora e alinhada aos princípios da sustentabilidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Caracterização dos Materiais Utilizados

A caracterização do gesso comercial (Veloso, 2021) adquirido para construção de corpos de prova de compósitos gesso-resíduos de poda de árvores foi realizada por meio de uma abordagem abrangente, que incluiu análises termogravimétricas, determinação de água de cristalização, bem como a avaliação de propriedades físicas do pó, propriedades físicas da pasta e do gesso reidratado. Essas análises são fundamentais para garantir a qualidade do material e compreender seu comportamento em diferentes etapas de uso, especialmente na produção de compósitos e elementos pré-moldados (Chen; Lu, 2023).

A análise termogravimétrica do tipo diferencial (DTG) foi utilizada para determinar as mudanças de massa do gesso em função do aumento da temperatura. Este método é essencial para avaliar a perda de água de cristalização e identificar as transformações de fase do material, como a conversão de gesso di-hidratado para semi-hidrato ou anidrita. Essas informações são fundamentais para validar o processo de calcinação e garantir que o material esteja na fase adequada para aplicação. A norma NBR 13207 (ABNT, 2017) orienta a avaliação de propriedades do gesso, incluindo sua composição mineralógica.

A água de cristalização é um parâmetro importante na caracterização do gesso, pois influencia diretamente o comportamento do material durante a reidratação e seu desempenho final. O teor de água de cristalização foi determinado para verificar a conformidade do gesso com os padrões estabelecidos, garantindo a eficiência no processo de reidratação e a estabilidade do compósito produzido. Esta propriedade está associada à NBR 12130 (ABNT, 2017), que estabelece métodos para a avaliação de parâmetros químicos do gesso.

• **Absorção de água**

Determina a capacidade do gesso de reter umidade, influenciando sua durabilidade e adequação para diferentes aplicações. A norma utilizada é a NBR 9778 (2009) - "Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica", é a norma aplicável que pode ser adaptada para avaliar a absorção de água em gessos endurecidos.

As amostras de gesso endurecido devem ser confeccionadas com dimensões e formas regulares (geralmente prismáticas ou cilíndricas). Após a cura inicial, as amostras são secas em estufa a uma temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ até atingir massa constante. As amostras secas são pesadas em uma balança de precisão para obter a massa seca (M_s). As amostras são submersas em água à temperatura ambiente por um período específico, geralmente de 24 horas, conforme o padrão da norma. Durante a imersão, o aumento de massa reflete a capacidade do gesso de absorver água por sua estrutura porosa. Após o período de imersão, as amostras são retiradas da água, levemente secas na superfície com papel absorvente para remover o excesso de água superficial, e pesadas novamente para obter a massa saturada (M_{saturada}). A absorção de água (A) é calculada em termos percentuais usando a seguinte equação:

$$A = \frac{M_{\text{saturada}} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

A: Absorção de água (%)

M_{saturada} : Massa da amostra saturada (g)

M_s : Massa da amostra seca (g)

Uma baixa absorção: Indica menor porosidade do gesso, resultando em maior resistência mecânica e melhor desempenho em ambientes úmidos. Uma alta Absorção: Reflete maior porosidade, o que pode comprometer a durabilidade do material, especialmente em aplicações externas ou sujeitas à umidade constante.

• **Capilaridade**

A capilaridade no gesso é a capacidade do material de absorver e transportar líquidos por meio de sua estrutura porosa, devido à ação das forças capilares (Beldjilali et al., 2020). Esse fenômeno ocorre devido à presença de poros interconectados no compósito de gesso, permitindo que a água ou outros líquidos sejam transportados ao longo da matriz sólida. A capilaridade está diretamente relacionada à porosidade aberta do gesso e afeta suas propriedades mecânicas e durabilidade, especialmente em ambientes úmidos. Gessos com alta capilaridade tendem a absorver e reter mais umidade, tornando-se mais suscetíveis a degradação e perda de resistência mecânica (San-Antonio-Gonzalez et al., 2019).

No método de medida da absorção de água por capilaridade utilizou-se a massa do corpo de prova seco (24 h por 50°C) e depois colocado em contato com água apenas na base inferior sobre 5 mm de água. Após um tempo determinado (exemplo: 10, 30, 60 minutos e 24 horas, conforme a necessidade), a amostra foi pesada novamente para medir a quantidade de água absorvida. A capilaridade foi avaliada pela variação da massa da amostra, expressa em kg/m² através da equação de cálculo:

$$CAP = \frac{(m_f - m_i)}{A} \quad (2)$$

Em que:

CAP = Capilaridade (kg/m²),

m_f = Massa final da amostra após absorção de água (kg),

m_i = Massa inicial seca da amostra (kg),

A = Área da base da amostra (m²).

Um baixo valor de capilaridade indica menor permeabilidade e transporte de água pela estrutura do gesso, favorecendo sua aplicação em ambientes com maior umidade. Alto coeficiente de capilaridade indica maior transporte de líquidos por capilaridade, podendo comprometer o desempenho em ambientes úmidos, especialmente em aplicações externas. A determinação da capilaridade é uma etapa indispensável na caracterização do gesso, permitindo prever sua adequação para diferentes condições de exposição e desempenho em sistemas construtivos específicos.

- **Resistência à Compressão**

Este ensaio, realizado conforme a NBR 13279 (ABNT, 2017), mede a capacidade do gesso de suportar cargas mecânicas sem falhar. Este parâmetro é essencial para determinar a aplicação do gesso em compósitos estruturais e placas pré-moldadas.

A resistência à compressão (R_c) é calculada utilizando a seguinte equação:

$$R_c = \frac{F_{max}}{A} \quad (3)$$

Em que:

R_c : Resistência à compressão (MPa)

F_{max} : Força máxima aplicada à amostra (N)

A: Área da seção transversal da amostra (mm²)

Uma alta resistência à compressão indica que o gesso possui boa integridade estrutural e pode ser utilizado em aplicações que demandam alta resistência mecânica. Uma baixa resistência à compressão: Sinaliza que o gesso pode ser mais adequado para aplicações não estruturais ou decorativas, onde as cargas mecânicas são menores.

O gesso para construção civil (gesso fino para revestimento, gesso fino para fundição, gesso grosso para revestimento, gesso grosso para fundição) deve atender às exigências indicadas na Tabela abaixo.

Tabela 1. Exigências físicas e mecânicas do gesso para construção civil

Determinações Físicas e Mecânicas	UNIDADE	LIMITE
Resistência à compressão (NBR 12129)	MPa	>8,40
Dureza (NBR 12129)	N/mm ²	>30,00
Massa unitária (NBR 12127)	kg/m ³	>700,00

Fonte: ABNT NBR 12127 - NBR 12129 (2017)

2.2. Caracterização do Resíduo de Poda de Árvore

A caracterização do resíduo de poda de árvore adquirido comercialmente foi conduzida com base em três análises principais: granulometria, densidade aparente e absorção de água. Essas propriedades fornecem informações fundamentais sobre a adequação do material para uso como componente em compósitos, permitindo avaliar sua compatibilidade e comportamento no sistema construtivo proposto.

• Análise granulométrica

A análise granulométrica visa determinar a distribuição de tamanhos das partículas presentes no resíduo de poda de árvore. Essa propriedade é essencial para avaliar a uniformidade do material e sua interação com a matriz de gesso. A granulometria influencia diretamente as propriedades físicas e mecânicas do compósito, como resistência, trabalhabilidade e compactação. Embora não exista uma norma específica da ABNT voltada exclusivamente para resíduos de poda, métodos similares podem ser adotados com base na NBR NM 248 (ABNT, 2003), que especifica procedimentos para análise granulométrica em materiais granulares. Essa análise é particularmente importante para ajustar a proporção do resíduo no compósito e garantir sua homogeneidade.

A densidade aparente refere-se à relação entre a massa do resíduo e o volume ocupado, incluindo os espaços vazios entre as partículas. Este parâmetro fornece uma estimativa da compactação do material, sua eficiência no transporte e sua interação com a matriz de gesso. Valores mais baixos de densidade podem indicar maior porosidade, o que pode influenciar a absorção de água e a aderência do material no compósito. A norma NBR 7251 (ABNT, 1982) estabelece procedimentos para determinar a densidade aparente em materiais particulados, podendo ser aplicada de maneira adaptada ao resíduo de poda.

A absorção de água mede a capacidade do resíduo de reter líquidos em sua estrutura porosa. Essa propriedade é crítica, pois um material com alta absorção pode alterar a relação água/gesso durante o preparo da pasta e comprometer a hidratação adequada do compósito. Além disso, a alta capacidade de retenção de água pode afetar negativamente a resistência mecânica e a durabilidade do material final. A norma NBR 9776:1987, que trata da determinação da absorção de água em materiais cerâmicos, pode ser adaptada para avaliar resíduos lignocelulósicos.

A caracterização detalhada do resíduo de poda de árvore é essencial para compreender seu comportamento no compósito proposto. A granulometria influencia a distribuição do resíduo na matriz, afetando a uniformidade e as propriedades mecânicas do material final. A densidade aparente fornece informações sobre a compactação e a compatibilidade volumétrica do resíduo com o gesso, enquanto a absorção de água é fundamental para ajustar a formulação e prever o desempenho do compósito em diferentes condições ambientais.

Esses resultados permitem otimizar a incorporação do resíduo no desenvolvimento de placas pré-moldadas, garantindo que o material atenda aos requisitos de qualidade e sustentabilidade no sistema construtivo Light Steel Frame, além de promover o reaproveitamento eficiente de resíduos urbanos.

2.3. Caracterização da Baba de Cupim Sintética

A caracterização da Baba de Cupim Sintética (BCS), adquirida comercialmente, abrange uma análise detalhada de suas propriedades químicas, físicas e mecânicas. Este produto, desenvolvido a partir de óleos e resinas vegetais, é amplamente utilizado como estabilizador químico em aplicações como pavimentação e estabilização de solos, devido à sua capacidade de promover coesão estável entre partículas do solo, aumentando sua resistência e reduzindo sua absorção de água (Luana et al., 2023; BATTISTELLE et al., 2019).

A densidade da BCS é um parâmetro crucial para compreender sua concentração e adequação para misturas. De acordo com o fabricante, o produto apresenta densidade mínima de $1,035 \text{ g/cm}^3$ a 25°C , o que reflete sua composição concentrada e miscibilidade com água, facilitando sua aplicação em campo (Krüger et al., 2020). Este dado é essencial para o cálculo de dosagens em projetos específicos, garantindo a eficiência do processo.

O pH da solução diluída a 1% da BCS é tipicamente superior a 10,5, indicando sua natureza alcalina. Essa alcalinidade favorece interações químicas com o solo, como a troca catiônica, que é fundamental para o rompimento de ligações eletroquímicas entre partículas de argila e água, resultando em uma matriz mais coesa e estável (Marchuk, 2013).

A solubilidade total em água é uma característica essencial da BCS, permitindo sua aplicação em forma de solução homogênea. Essa propriedade facilita a mistura

com o solo e garante uma distribuição uniforme do estabilizador durante a compactação (Machado, 2017).

A BCS atua formando compostos metalo-orgânicos insolúveis e permanentes, promovendo a coesão entre partículas do solo e reduzindo significativamente a absorção capilar de água. Estudos apontam que a aplicação da BCS pode reduzir a absorção de água em até 13% e aumentar a resistência à compressão do solo em pelo menos 35%, dependendo da composição do solo e do agente reagente utilizado (Faria, 2016).

O produto BCS comercial foi o DS-328 é um sal orgânico derivado de uma composição química de óleos vegetais, de coloração verde, e uma densidade mínima a 25°C de 1,035 g/cm³, com pH mínimo de 10,5 em solução a 1%, totalmente solúvel em água (BLINDASOLO, 2023).

A análise das propriedades da BCS é indispensável para prever seu desempenho em sistemas construtivos e determinar sua dosagem ideal. A densidade e o pH orientam a formulação das misturas, enquanto a avaliação da capacidade de estabilização e da resistência mecânica do solo tratado subsidiam decisões técnicas, promovendo a durabilidade e a eficiência econômica de projetos de engenharia. Essas propriedades são especialmente relevantes em aplicações para produção de compósitos, como placas pré-moldadas, otimizando o uso sustentável de materiais (Medeiros 2024).

2.4. Planejamento dos Experimentos

A utilização do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) é uma estratégia estatística poderosa para a otimização de formulações complexas. No caso da mistura envolvendo gesso de fundição, resíduo de poda de árvores e baba de cupim sintética, o DCCR permite investigar as interações entre os componentes e determinar as condições ideais para a produção de chapas divisórias destinadas a estruturas do tipo *Steel Frame*. O DCCR é um delineamento de segundo grau ideal para estudar a influência simultânea de múltiplos fatores e suas interações. Para este caso, o DCCR do tipo 2³ (dois níveis e três variáveis) os fatores independentes foram:

- x₁: Relação entre água e gesso de fundição, L/kg;
- x₂: Relação entre BCS e gesso, mL/kg;
- x₃: Relação entre resíduo de poda de árvore e gesso, g/kg

As variáveis dependentes ou variáveis resposta são: Absorção de água (AA) em %, capilaridade (CAP) em mm de água, Resistência à compressão (RC) em MPa. O modelo do DCCR gera um conjunto de experimentos que combinam os níveis máximos e mínimos de cada variável, pontos centrais (para avaliar a estabilidade do sistema) e pontos axiais (para explorar efeitos curvilíneos).

Para elaborar uma matriz de experimentos contendo combinações específicas dos níveis dos fatores, abrangendo:

- Pontos fatoriais (-1,+1);
- Pontos axiais (- α ,+ α);
- Pontos centrais (0).

Na execução dos ensaios preparam-se as misturas conforme as proporções estabelecidas e moldam-se as amostras para testes. Realiza-se então ensaios para avaliar propriedades como resistência à compressão, absorção de água, capilaridade, entre outras.

Para análise dos resultados ajusta-se um modelo de regressão polinomial de segundo grau, do tipo:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_{ix} x_i + \sum \beta_{ixixj} x_i x_j + \sum \beta_{iix^2} x_i^2 \quad (8)$$

Em que:

Y: Variável resposta;

β_0 : Intercepto;

β_i , β_{ij} , β_{ii} : Coeficientes das variáveis

Na determinação da formulação Ideal usa-se o modelo ajustado para identificar a combinação de fatores que maximiza as propriedades desejadas. A aplicação do DCCR para estudo sobre o compósito gesso baba de cupim sintética encontra-se resumida na Tabela 2.

Tabela 2. Valores codificados e não codificados dos fatores para o DCCR utilizado

Fator		NÍVEL				
		-1,68	-1	0	+1	+1,68
Relação água/gesso, L/kg	x ₁	0,76	0,78	0,8	0,82	0,83
BCS, mL/kg	x ₂	0,44	0,79	1,32	1,84	2,2
PA, g/kg	x ₃	0,44	0,79	1,32	1,84	2,2

Fonte: do autor (2025)

2.5. Preparação das Amostras

Os componentes utilizados na produção do compósito foram: água, DS-328, pó de gesso e resíduos de poda de árvore (PA). Para assegurar uma mistura homogênea e evitar qualquer segregação potencial durante o processo, a incorporação dos materiais foi realizada manualmente.

O procedimento para a formulação dos compósitos foi delineado em etapas específicas. Inicialmente, a baba de cupim sintética (DS-328) foi adicionado à água e, posteriormente, essa solução foi incorporada ao pó de gesso e aos resíduos de poda de árvore. A mistura foi realizada manualmente por um período de 3 minutos, até que a homogeneidade completa fosse alcançada. Para preservar a trabalhabilidade das formulações sem a necessidade de ajustar a relação água/gesso ou incorporar plastificantes, o teor de resíduos de PA foi limitado a 10% em relação à massa do gesso.

Os compósitos obtidos foram moldados em corpos de prova prismáticos com dimensões de $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$. Após o processo de moldagem, as amostras foram submetidas à desmoldagem e colocadas em uma câmara seca, mantida a uma temperatura de 35°C e uma umidade relativa (UR) de $50 \pm 1\%$. A cura foi realizada ao longo de 21 dias, período necessário para que as propriedades mecânicas e químicas do compósito fossem adequadamente desenvolvidas (Figura 1). Posteriormente, os corpos de prova foram resfriados à temperatura ambiente em um dessecador, assegurando a estabilização do material antes dos ensaios. Os testes para estimativas de resistência à compressão foram realizados em Máquinas de testes INSTRON MOD 5969 com capacidade de carga de até 30.000 kgf, bem como padrão de ruptura dos corpos de prova cilíndricos, de acordo com a Figura 02.

Figura 1. Corpos de prova de compósito de gesso-PA-BCS



Fonte: Do autor (2024)

Figura 2. Resistência a compressão



Fonte: Do autor, 2024

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

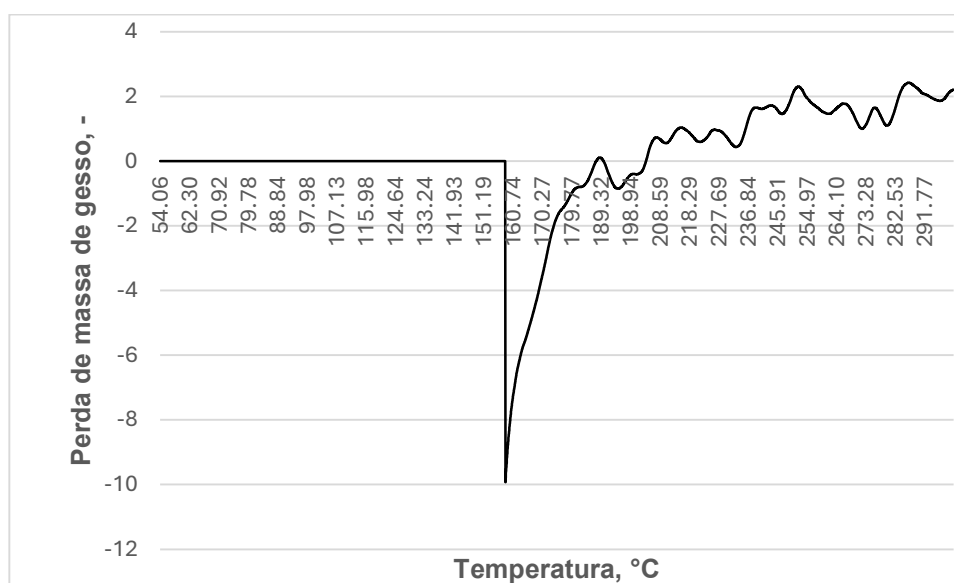
3.1 Características do Gesso Utilizado

O gesso empregado nos experimentos foi adquirido no mercado, sendo previamente avaliadas cinco diferentes formulações comerciais provenientes de indústrias gesseiras localizadas no Polo Gesseiro do Araripe (PGA). Para a seleção do material mais adequado, as amostras foram submetidas a ensaios preliminares de determinação do teor de água de cristalização (NBR 12130, 2017), visando identificar aquela com o menor conteúdo de sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). A quantificação dessa propriedade foi realizada por meio de um analisador de hidratação do tipo Ultra-X, um equipamento de origem alemã que emprega um sistema de desidratação térmica por radiação infravermelha. Esse método permite uma avaliação precisa do teor de umidade cristalina presente nas amostras, garantindo a escolha de um gesso com características mais adequadas para a formulação do compósito estudado.

O gráfico da DTG do gesso utilizado, fornecido pela Figura 3, mostra o comportamento térmico de uma amostra composta por sulfato de cálcio semi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$), também conhecido como gesso de Paris, ao ser submetida a um aumento gradual de temperatura. Neste gráfico o eixo X representa a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e o eixo Y indica a taxa de variação de massa (m/m_i), ou seja, o quanto da massa da amostra está sendo perdida em cada incremento de temperatura.

O primeiro pico acentuado da curva ocorre aproximadamente entre 100 e 160 $^{\circ}\text{C}$, o que indica a desidratação do sulfato de cálcio semi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$), resultando na conversão para sulfato de cálcio anidro (CaSO_4), ou anidrita solúvel. Esse processo é responsável pela maior perda de massa observada no gráfico. A DTG evidencia essa transição pelo pico negativo de variação de massa, indicando o momento exato da desidratação mais intensa. Após 160 $^{\circ}\text{C}$, a taxa de variação da massa diminui e apresenta oscilações, indicando que a desidratação foi concluída e que o material remanescente é predominantemente anidrita (CaSO_4). Essas flutuações podem estar associadas a pequenas reorganizações estruturais da anidrita solúvel, ou a pequenas quantidades de impurezas na amostra.

Figura 3. Curva termogravimétrica diferencial (DTG) para o gesso comercial utilizado nos experimentos



Fonte: Autor (2025)

A perda total de água esperada ao converter todo o di-hidrato para anidrita é de 21,9%. No entanto, no experimento, a perda de massa observada foi de apenas 15,7%. Isso significa que ainda restou di-hidrato na amostra, pois nem toda a água foi eliminada. Portanto, deve-se calcular quanto do di-hidrato foi convertido em semi-hidrato e quanto de semi-hidrato ainda existe na amostra final.

Como a perda de água do di-hidrato para o semi-hidrato representou 15,7% da massa total de água de cristalização. Assim, o teor de di-hidrato na amostra é de: $100\% - 71,7\% = 28,3\%$. Assumindo-se que não há anidrita inicial, então o restante da amostra deve ser semi-hidratado. Como já se calculou que 28,3% da amostra ainda é di-hidratado. Portanto, o teor de semi-hidrato na amostra é: $100\% - 28,3\% = 71,7\%$.

Com base nestes cálculos os teores das fases na amostra original do gesso comercial utilizado são:

- Di-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$): 28,3%;
- Semi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$): 71,7%;

Anidrita (CaSO_4): $\approx 0\%$ (indicando que a amostra não possuía anidrita inicialmente). Dessa forma, a presença desse di-hidrato pode ser um indicativo de que a calcinação não foi completa durante a produção do gesso comercial, o que pode influenciar suas propriedades físicas e mecânicas durante a aditivção.

Veloso et al. (2021) investigaram a composição do gesso comercial utilizando técnicas de DTG e DRX, confirmando que a conversão do di-hidrato para semi-hidrato

ocorre na faixa de 100-160°C, enquanto a conversão para anidrita pode se estender até 400°C. O estudo enfatiza a importância da caracterização térmica para validar o desempenho do gesso em compósitos.

O gesso selecionado para ser utilizado nos experimentos apresentou um teor de semi-hidrato inferior a 85%, sendo que esse valor não atende aos requisitos de valores máximos estipulados pelas normas da ABNT para gesso utilizado na construção civil. Essa característica pode estar associada a um processo de calcinação incompleto, resultando na presença de di-hidrato residual na amostra, conforme evidenciado na análise termogravimétrica. Beldjilali et al. (2020) também analisaram a influência da pureza do gesso na resistência mecânica de compósitos cimentícios, apontando que a presença de resíduos de di-hidrato pode impactar negativamente a resistência à compressão e a durabilidade dos materiais.

Apesar dessa limitação, o gesso utilizado foi mantido nos experimentos devido à sua origem comercial, proveniente de um dos melhores fornecedores do Polo Gesseiro do Araripe (PGA). Além disso, a estratégia adotada neste estudo concentrou-se na avaliação relativa do impacto dos componentes auxiliares (resíduo de poda de árvores e baba de cupim sintética) sobre as propriedades do compósito, em vez da comparação direta com os valores normativos do gesso puro preconizados pela ABNT. Dessa forma, os resultados obtidos são analisados com base nas melhorias proporcionadas pela incorporação dos aditivos ao gesso comercial utilizado, independentemente de suas propriedades iniciais estarem ligeiramente abaixo dos valores máximos os estabelecidos pelas normas técnicas vigentes.

Quanto às propriedades físico-químicas do gesso utilizado na formulação do compósito proposto nesta pesquisa, a Tabela 3 resume os valores médios de absorção percentual de água (%), capilaridade percentual (Kg/m²) e resistência à compressão em MPa.

Tabela 3. Valores das propriedades físico-químicas do gesso utilizado nos experimentos

Propriedade do gesso	Valor médio	Unidade
Absorção de água	49,11	%
Capilaridade em 24 h	20,81	kg/m ²
Resistência à compressão	2,56	MPa

Fonte: Do autor (2025)

3.2. Análise dos Resultados Experimentais

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos com a aplicação de um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) aos experimentos com compósitos formulados a partir de gesso, resíduos de poda de árvores (PA) e baba de cupim sintética (BCS). As variáveis independentes incluem a relação água/gesso (A/G), o teor de baba de cupim sintética (BCS) e o teor de resíduos de poda de árvores (PA), enquanto as variáveis dependentes ou resposta são: absorção de água (AA), capilaridade (CAP) e resistência à compressão (RC).

A relação água/gesso (A/G): Variou entre 0,76 e 0,83 L/kg, com ajustes para explorar como a quantidade de água afeta a trabalhabilidade da mistura e o desempenho mecânico do compósito. O teor de baba de cupim sintética (BCS) foi ajustado entre 0,44 e 2,20 mL/kg, visando avaliar o impacto da adição de BCS como estabilizador químico e coesivo na matriz do compósito. O teor de resíduos de poda de árvores (PA) variou entre 0,79 e 2,20 g/kg, com o objetivo de entender o papel das fibras lignocelulósicas na modificação das propriedades do compósito.

A absorção de água (AA) teve valores que variam significativamente entre 3,88% (S3) e 43,69% (S2), evidenciando a influência combinada da relação A/G, do teor de BCS e do teor de PA. Baixos valores de AA são encontrados em composições com maior proporção de BCS e menor relação A/G, como observado nos experimentos S3 e S12.

Os valores de capilaridade apresentam ampla variação, indo de 1,2 kg/m² (S3) a 21,282 kg/m² (S2). Altos valores de capilaridade estão associados a altas relações A/G e baixos teores de BCS, como observado em S2, sugerindo uma maior porosidade nessas condições. Baixa capilaridade foi observada em amostras com maior proporção de BCS e teor moderado de PA, destacando a contribuição do estabilizador químico na redução da porosidade e do transporte de água.

A resistência à compressão varia de 2,86 MPa (S6) a 5,26 MPa (S13). Maiores valores de resistência estão relacionados a baixos teores de PA e relação A/G controlada, conforme identificado em S13. A adição de PA reduz a resistência à compressão devido à incorporação de fibras com menor rigidez na matriz, mas pode ser compensada com o uso adequado de BCS.

Tabela 4. Matriz de experimentos de DCCR com resultados para o compósito à base de gesso e resíduos de poda de árvore

Exp.	Variáveis independentes			Variáveis resposta		
	A/G (L/kg)	BCS (mL/kg)	PA (g/kg)	AA (%)	CAP (kg/m ²)	Rc MPa
S1	0,78	0,79	0,79	31,68	13,97	4,03
S2	0,78	0,79	1,84	43,19	21,28	4,18
S3	0,78	1,84	0,79	3,88	1,20	4,02
S4	0,78	1,84	1,84	16,33	6,76	3,91
S5	0,82	0,79	0,79	30,98	14,31	3,67
S6	0,82	0,79	1,84	8,68	18,18	2,86
S7	0,82	1,84	0,79	15,34	6,96	3,35
S8	0,82	1,84	1,84	28,33	16,28	3,31
S9	0,76	1,32	1,32	25,7	14,85	5,17
S10	0,83	1,32	1,32	31,82	13,41	3,59
S11	0,8	0,44	1,32	43,63	21,32	3,82
S12	0,8	2,2	1,32	10,65	5,73	4,64
S13	0,8	1,32	0,44	23,53	13,29	5,26
S14	0,8	1,32	2,2	14,13	11,78	4,71
S15 (C)	0,8	1,32	1,32	34,59	14,01	3,81
S16 (C)	0,8	1,32	1,32	30,44	13,92	3,84
S17 (C)	0,8	1,32	1,32	21,88	10,36	4,27
S18 (C)	0,8	1,32	1,32	20,3	9,14	3,73
S19 (C)	0,8	1,32	1,32	28,51	15,71	3,66
S20 (C)	0,8	1,32	1,32	23,86	9,23	3,5

Fonte: Do autor (2025)

No presente estudo, a utilização do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) teve como objetivo estabelecer modelos matemáticos que descrevessem a influência das variáveis independentes – relação água/gesso (A/G), teor de baba de cupim sintética (BCS) e teor de resíduos de poda de árvores (PA) – nas propriedades do compósito, especificamente absorção de água (AA), capilaridade (CAP) e

resistência à compressão (RC). No entanto, apesar da aplicação da metodologia estatística convencional, os modelos gerados não apresentaram validade estatística satisfatória, conforme evidenciado pelos baixos valores de significância na Análise de Variância (ANOVA).

A substituição do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) pela modelagem estatística em Python justifica-se pelas limitações metodológicas do DCCR, que emprega um modelo polinomial de segunda ordem fixo, incapaz de capturar interações complexas e padrões não lineares (Moro et al., 2017). Em contraste, Python permite explorar modelos não lineares, técnicas de aprendizado de máquina e interações de ordens superiores, resultando em maior precisão preditiva (van Cranenburgh et al., 2022). O DCCR, ao incluir todos os termos quadráticos e de interação sem avaliar sua significância, pode gerar *overfitting* (Jankovic; Chaudhary; Goia, 2021), enquanto Python possibilita seleção de variáveis com base em critérios como AIC, BIC e regularização via Ridge e Lasso. Além disso, algoritmos de otimização avançados como SGD e redes neurais tornam o ajuste mais preciso (Al Shammari, 2024). Enquanto o DCCR depende exclusivamente da ANOVA para avaliar o modelo, Python oferece métricas adicionais como MSE, MAE, R^2 ajustado e validação cruzada (Brandić et al., 2023), permitindo diagnósticos mais robustos. A modelagem em Python também possibilita a criação de modelos personalizados, com transformações de variáveis e abordagens híbridas, proporcionando maior flexibilidade e ajuste superior dos dados.

Os resultados gráficos obtidos pelo Python indicaram interações significativas entre a relação A/G, o teor de PA e o teor de BCS. Por exemplo, a combinação de uma relação A/G média (0,80) com proporções moderadas de BCS (1,32 mL/kg) resultou em um bom equilíbrio entre absorção de água, capilaridade e resistência à compressão, como observado nos experimentos centrais (Figuras 3 a 5). Para chapas divisórias em sistemas Steel Frame, é desejável minimizar a absorção de água e a capilaridade enquanto se maximiza a resistência à compressão. O estudo identificou que o aumento da relação A/G reduz significativamente a capilaridade (-8551) e a absorção de água (-1339), resultados compatíveis com pesquisas anteriores, como as de Veloso et al. (2021), que demonstraram que uma maior relação A/G favorece o desenvolvimento de poros maiores, aumentando a capilaridade por aumentar espaços intersticiais.

Com base nos resultados, composições como S3 (RC = 4,02 MPa; AA = 3,88%; CAP = 1,2 kg/m²) podem representar formulações promissoras, equilibrando propriedades mecânicas e de durabilidade. A adição de baba de cupim sintética demonstrou melhorar a coesão e reduzir a capilaridade e a absorção de água, evidenciando sua eficácia como estabilizador químico (Silva et al, 2022).

San Antonio-González et al. (2019) estudaram a incorporação de resíduos lignocelulósicos em compósitos de gesso e destacaram a importância da caracterização do material de base. Seus resultados mostraram que a elevada presença de semi-hidrato no gesso contribui para um melhor desempenho mecânico, enquanto a retenção de di-hidrato pode comprometer a reatividade da matriz.

Beldjilali et al. (2020) observaram que valores excessivos de A/G podem comprometer a resistência mecânica, algo parcialmente corroborado pelos dados apresentados neste trabalho. A adição de BCS apresentou influência significativa na redução da absorção de água (-579) e capilaridade (-439), contribuindo para o aumento da coesão do compósito. Esse efeito é semelhante ao observado por Faria et al. (2016), que reportaram uma redução de até 13% na absorção de água em solos estabilizados com compostos de origem vegetal similares. Estudos como os de Krüger et al. (2020) destacam o papel da baba de cupim sintética na estabilização de materiais cimentícios e na redução da permeabilidade.

O teor de PA demonstrou efeitos positivos na resistência à compressão (+319) dentro de uma faixa específica, corroborando os achados de San Antonio-González et al. (2019), que relataram um reforço estrutural significativo na incorporação de fibras lignocelulósicas em compósitos de gesso. No entanto, um aumento excessivo do teor de PA compromete a resistência mecânica (-10,41), comportamento semelhante ao reportado por Medeiros et al. (2024), que atribuíram essa redução à formação de interfaces menos coesas dentro da matriz cimentícia.

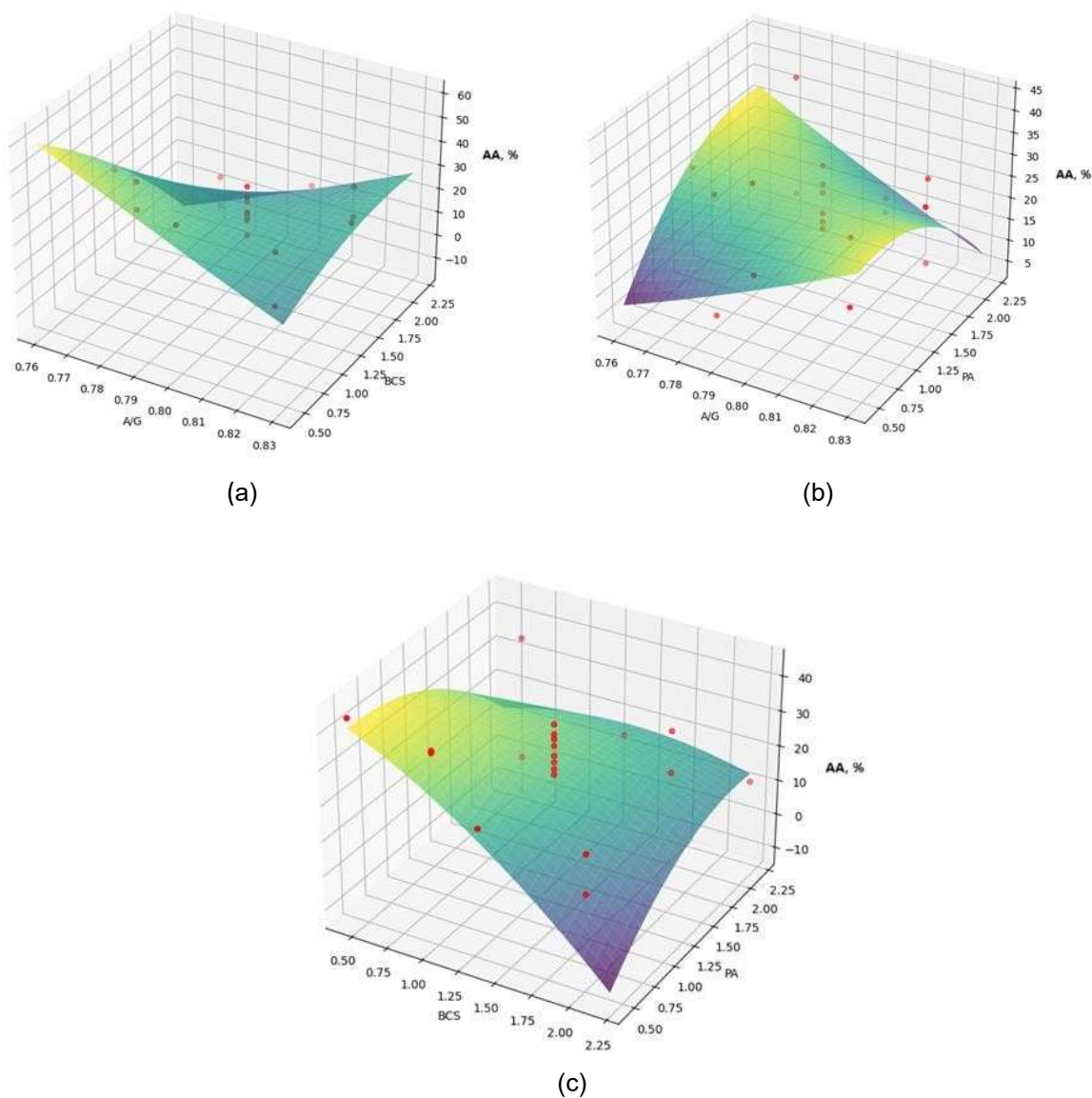
Os modelos ajustados apresentaram coeficientes de determinação (R^2) entre 77,55% e 83,05%, sendo o modelo de resistência à compressão o mais robusto ($R^2 = 0,8305$). Essa tendência também foi observada por Faria et al. (2016), que relataram que modelos preditivos de resistência à compressão em compósitos lignocelulósicos tendem a ser mais confiáveis do que os modelos de absorção de água e capilaridade.

A pesquisa reforça a viabilidade do compósito em aplicações estruturais, alinhando-se às diretrizes de sustentabilidade e reaproveitamento de resíduos. Essa

abordagem é coerente com os estudos de Uliana et al. (2022), que demonstraram que a incorporação de resíduos em materiais de construção pode reduzir impactos ambientais sem comprometer significativamente a resistência mecânica.

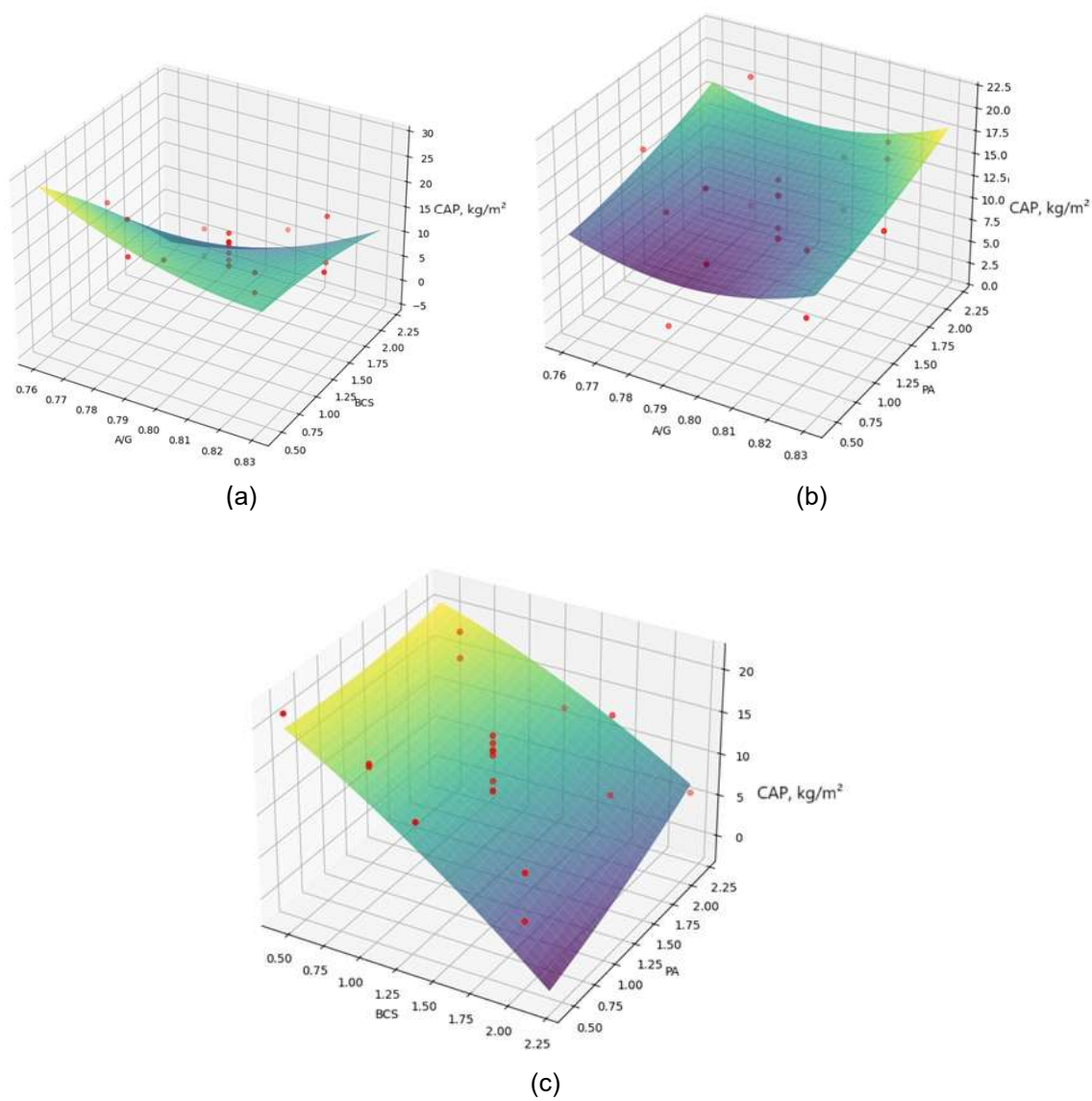
A comparação entre as propriedades físico-químicas do gesso convencional e do compósito desenvolvido permite uma avaliação dos benefícios para a obtenção de um novo compósito como material de construção à base de gesso e resíduos de poda de árvores. Na elaboração da Tabela 5 utilizou-se dados fornecidos pelo experimento S3, no qual foram obtidos importantes ganhos em relação às três propriedades de medida da qualidade do compósito elaborado. Deve-se, contudo, lembrar que a continuidade de experimentos pode levar a obtenção de material com valores acima de 57,03% de ganho em resistência à compressão, conforme pode-se notar no experimento S13.

Figura 3. Absorção de água (AA) do compósito gesso-PA-BCS: (a) Em função de A/G e BCS; (b) Em função de A/G e PA; (c) Em função de BCS e PA



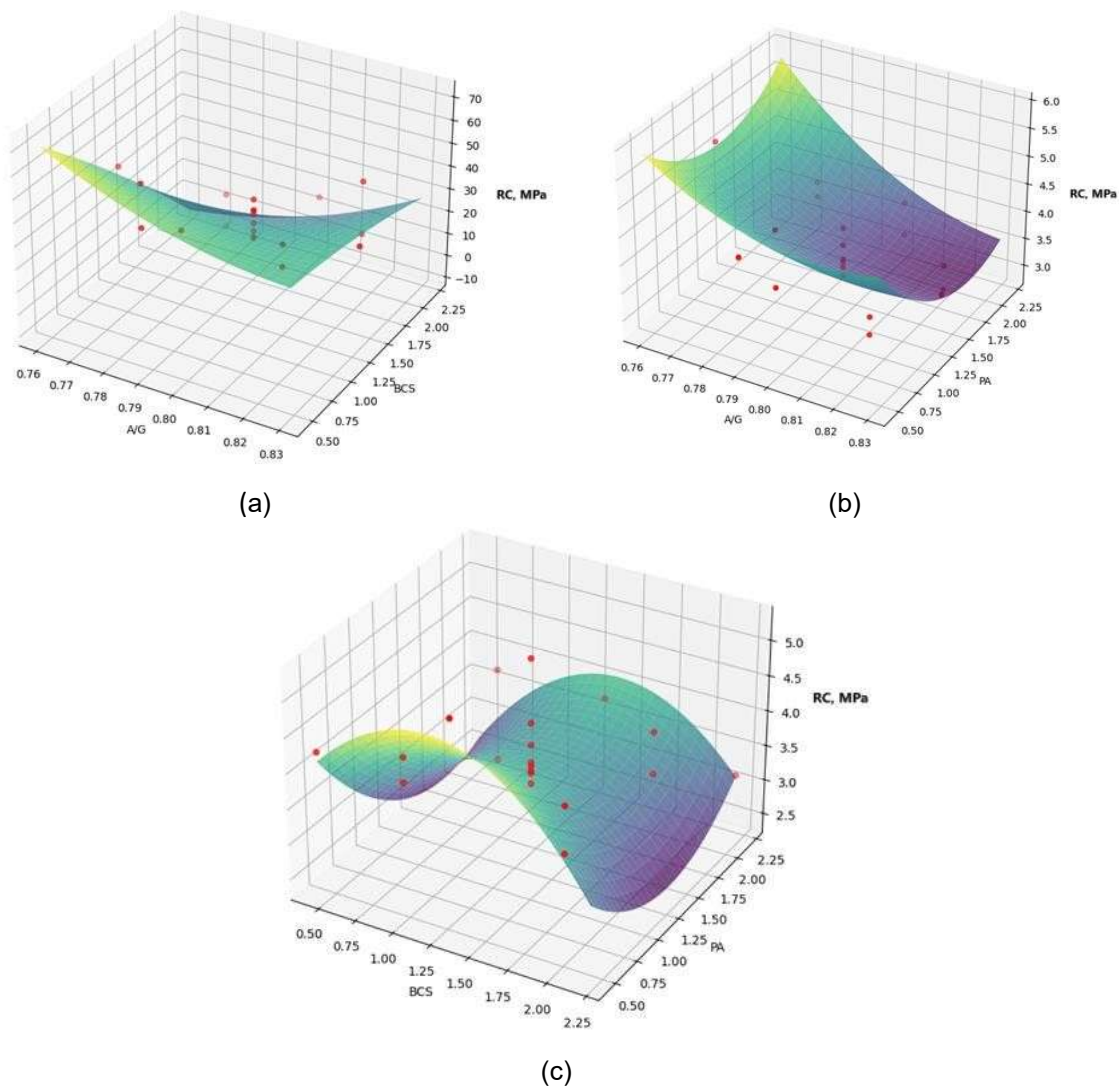
Fonte: Do autor (2025)

Figura 4. Capilaridade (CAP) do compósito gesso-PA-BCS: (a) Em função de A/G e BCS; (b) Em função de A/G e PA; (c) Em função de BCS e PA



Fonte: Do autor (2025)

Figura 5. Resistência à compressão (CP) do compósito gesso-PA-BCS: (a) Em função de A/G e BCS; (b) Em função de A/G e PA; (c) Em função de BCS e PA



Fonte: Do autor (2025)

Tabela 5. Dados para comparação entre o compósito desenvolvido e o gesso comercial utilizado

Propriedade	Gesso convencional	Compósito desenvolvido	Melhoria (%)
Absorção de água (%)	49,11	3,88	92,10
Capilaridade em 24 h (kg/m ²)	20,81	1,2	94,23
Resistência à compressão (Mpa)	2,56	4,02	57,03

Fonte: Do autor (2025)

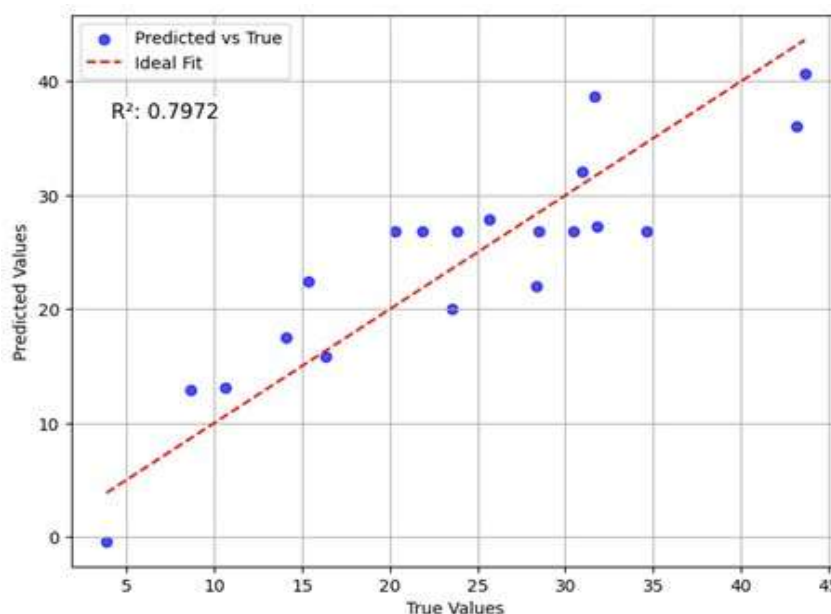
3.2. Avaliação Estatística dos Modelos de Previsão em Python®

As Figuras 6, 7 e 8, geradas pela linguagem Python, apresentam a análise gráfica do ajuste entre os valores experimentais e os valores previstos pelos modelos de regressão polinomial de segunda ordem para as variáveis dependentes Absorção de Água (AA), Capilaridade (CAP) e Resistência à Compressão (RC), respectivamente. Em cada gráfico, a linha vermelha pontilhada representa o ajuste ideal ($y=x$), indicando onde os valores previstos coincidem perfeitamente com os valores experimentais. A qualidade dos ajustes é avaliada com base nos coeficientes de determinação (R^2).

Na Figura 6, observa-se um coeficiente de determinação ($R^2=0,7972$), o que indica que aproximadamente 79,72% da variabilidade nos valores de absorção de água é explicada pelo modelo de regressão. Embora os pontos se concentrem ao longo da linha de ajuste ideal, há certa dispersão em valores extremos, o que pode estar relacionado à influência de fatores não modelados ou variações experimentais. Isso demonstra que o modelo apresenta boa capacidade preditiva para AA, mas há

margem para otimização. A Tabela 4 exibe termos e valores dos coeficientes que compõem o modelo de regressão obtido para a absorção de água.

Figura 6: Valores simulados e experimentais de absorção de água (AA) mostrando a qualidade do ajuste entre os referidos dados

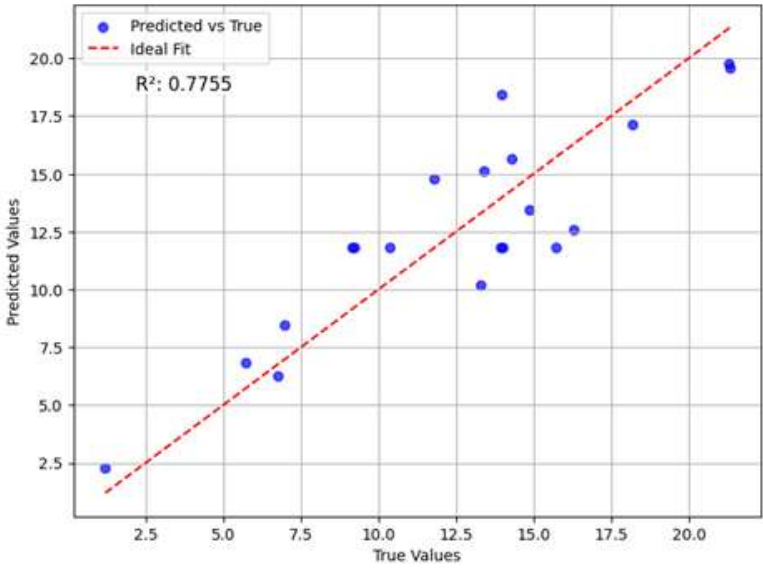


Fonte: Do autor (2025)

A Figura 7 apresenta os resultados para a variável CAP, com um coeficiente de determinação ($R^2=0.7755$), sugerindo que cerca de 77,55% da variância na capilaridade é explicada pelo modelo ajustado. Apesar de um bom ajuste, os dados apresentam maior dispersão em comparação à AA, principalmente em valores médios e elevados de CAP. Isso pode ser atribuído à complexidade da interação entre as variáveis independentes na definição da capilaridade do compósito, indicando a necessidade de análise mais aprofundada para melhorar a precisão do modelo.

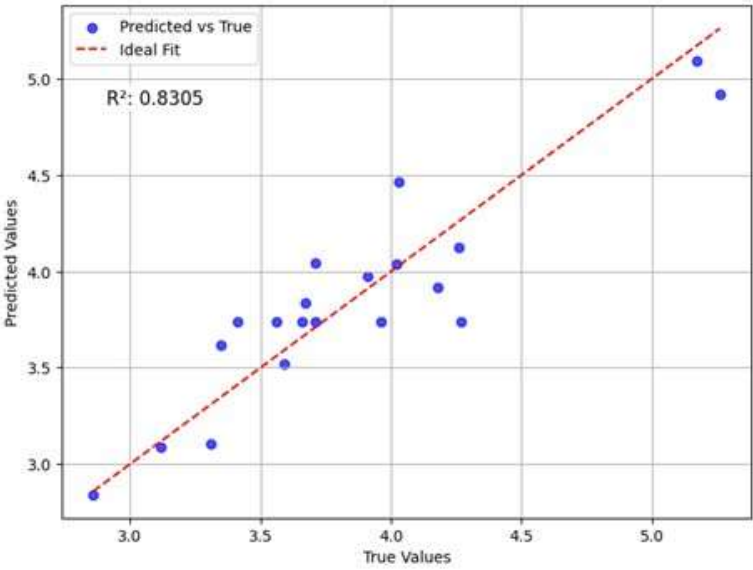
A Figura 8 demonstra o desempenho do modelo ajustado para a resistência à compressão, com um coeficiente de determinação ($R^2=0,8305$). Este valor indica que 83,05% da variabilidade nos dados de RC é explicada pelo modelo, representando o melhor ajuste entre as três variáveis dependentes analisadas. Os pontos estão bem distribuídos ao redor da linha ideal, com baixa dispersão, evidenciando a robustez do modelo para prever a resistência à compressão dos compósitos.

Figura 7. Valores simulados e experimentais de capilaridade (CAP) mostrando a qualidade do ajuste entre os referidos dados



Fonte: Do autor (2025)

Figura 8. Valores simulados e experimentais de resistência à compressão (RC) mostrando a qualidade do ajuste entre os referidos dados



Fonte: Do autor (2025)

Os gráficos indicam que os modelos ajustados apresentam bom desempenho preditivo para todas as variáveis dependentes analisadas (AA, CAP e RC). Contudo, a análise de R^2 revela que o modelo para RC é o mais confiável, seguido de AA e CAP. Essa ordem sugere que a resistência à compressão é mais bem explicada pelas variáveis independentes consideradas, enquanto a capilaridade pode estar sujeita a fatores externos ou interações não captadas pelo modelo. Esses resultados são essenciais para validar a aplicação dos modelos de regressão e para identificar possíveis melhorias nos processos de formulação do compósito. Faria et al. (2016) também examinaram a incorporação de estabilizadores químicos em misturas de solo-cimento e ressaltaram que compostos como a baba de cupim sintética (BCS) podem desempenhar um papel fundamental na coesão e resistência do material final.

Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos para os modelos ajustados variaram entre 77,55% e 83,05%, sendo o modelo de resistência à compressão o mais confiável. Esse resultado é coerente com os achados de Faria et al. (2016), que reportaram valores similares de R^2 para modelos de previsão da resistência de materiais cimentícios aditivados com compostos de origem vegetal. Além disso, San Antonio-González et al. (2019) destacaram que a variabilidade da absorção de água e da capilaridade é geralmente mais difícil de modelar, devido à complexidade das interações entre os poros da matriz e os aditivos.

A análise realizada com auxílio da Tabela 4 representa os modelos de regressão para previsão das propriedades do compósito Gesso-BCS-PA. Na referida tabela os modelos ajustados são expressos em termos polinomiais de segunda ordem, considerando os efeitos lineares, quadráticos e interativos das variáveis independente. Cada modelo é composto pelo intercepto, termos lineares, quadráticos e interativos, bem como o coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 6. Valores dos parâmetros dos modelos de regressão para previsão das propriedades do compósito Gesso- PA-BCS

TERMO	MODELO		
	AA (%)	CAP (kg/m ²)	RC (MPa)
Intercepto	745	15194,4316	256
A/G	-1339	-3683,6767	-618
BCS	-579	-180,4693	-0,43
PA	319	-5,3079	319
A/G ²	584	2151,5179	379
BCS ²	-6,6	-1.4552	-1,57

PA ²	0,96	0,8475	-10,41
A/G·BCS	700	214,1509	4,88
A/G·PA	-395	3,1985	-10,6
BCS·PA	17,02	2,3795	0,44
R ²	0,7972	0,7755	0,8305

Fonte: do autor (2025)

Sobre o modelo de absorção de água (AA) o intercepto ou valor inicial do modelo é 745. Entre os termos lineares o A/G tem um impacto negativo significativo (1339), indicando que o aumento dessa relação reduz a absorção de água. O teor de BCS também apresenta um efeito negativo (-579), enquanto PA tem um impacto positivo (+319), sugerindo que o teor de resíduo de poda aumenta a absorção. Os termos quadráticos o coeficiente de A/G² (+584) sugere um comportamento não linear, onde valores maiores de A/G podem reverter a redução inicial. O coeficiente negativo de BCS² (-6,60) implica que concentrações elevadas de baba de cupim têm um efeito marginal negativo na absorção. A interação A/G:BCS (+700) é positiva, indicando que esses fatores combinados aumentam a absorção. A interação A/G:PA (-395) é negativa, apontando uma redução quando ambas aumentam. A qualidade do ajuste (R²=0,7972) indica que o modelo explica cerca de 79,72% da variabilidade dos dados experimentais.

Para a capilaridade (CAP) o intercepto do modelo é 15194,4316. O termo linear A/G apresenta o maior impacto negativo (-3683,6767), sugerindo que o aumento dessa relação reduz significativamente a capilaridade. BCS (-180,4693) e PA (-5,3079) têm efeitos menos expressivos. Os termos quadráticos A/G² (+2151,5179) tem um impacto positivo, sugerindo que, em valores elevados, a capilaridade pode voltar a crescer. PA² (+0,8475) também influencia positivamente, embora de forma marginal. BCS² (-1,4552) indica uma redução marginal da capilaridade em concentrações maiores de baba de cupim. A interação A/G:PA (3,1985) tem um efeito positivo expressivo, reduzindo a capilaridade. BCS:PA (+2,3795) é positiva, embora de menor magnitude. O modelo explica 77,55% da variância nos dados experimentais.

O estudo demonstrou que o aumento da relação A/G reduziu significativamente a capilaridade (-3683,6767) e a absorção de água (-1339). Esse comportamento também foi observado por Veloso et al. (2021), que relataram que uma maior proporção de água leva à formação de estruturas mais porosas, aumentando a capilaridade do material. Contudo, a presença de BCS ajudou a reduzir esse efeito,

um fenômeno similar ao reportado por Beldjilali et al. (2020) em compósitos de gesso reforçados com resíduos cerâmicos.

O valor inicial do modelo para RC é 256. A/G (-618) e BCS (-0,43) têm impactos negativos moderados, enquanto PA (+319) apresenta efeito positivo significativo. PA² (-10,41) tem um impacto negativo acentuado, indicando que altas concentrações de resíduo de poda diminuem a resistência. BCS² (-1,57) também reduz a resistência em concentrações mais altas. A/G² (+379) tem um impacto positivo moderado. A/G:PA (-10,60) é fortemente negativa, reduzindo a resistência.

A/G:BCS (+4,88) é positiva, contribuindo para o aumento da resistência em certas condições. Este modelo é o mais confiável, explicando 83,05% da variância nos dados. A adição de BCS apresentou um efeito positivo na redução da absorção de água (-579) e da capilaridade (-439). Esse comportamento é comparável ao observado por Krüger et al. (2020), que destacaram o papel de compostos estabilizadores na redução da permeabilidade em misturas cimentícias. Além disso, a estabilização promovida pela BCS assemelha-se aos efeitos da incorporação de polímeros hidrofóbicos discutidos por Silva et al. (2022).

4. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo evidenciam o potencial inovador do compósito de gesso, reforçado com resíduos de poda de árvores (PA) e aditivado com baba de cupim sintética (BCS), para aprimorar as propriedades físico-mecânicas. A utilização do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) possibilitou uma análise sistemática dos efeitos das variáveis independentes — relação água/gesso (A/G), teor de BCS e teor de PA — sobre as variáveis resposta, como absorção de água (AA), capilaridade (CAP) e resistência à compressão (RC).

Os modelos ajustados revelaram interações complexas entre as variáveis, destacando o efeito negativo da relação A/G na capilaridade e absorção de água, enquanto o teor de resíduos de poda se mostrou benéfico para a resistência à compressão, dentro de limites específicos. A adição de BCS foi eficaz na redução da capilaridade e absorção de água, contribuindo para a coesão e estabilidade do material. No entanto, um aumento excessivo do teor de PA resultou em diminuição da resistência mecânica, ressaltando a necessidade de otimização nas proporções dos componentes. Contudo, o coeficiente de determinação disponibilizados pelo DCCR não foram suficientes para validar os modelos de previsão.

A validação de modelos de previsão foi possível por meio de regressão polinomial com auxílio da linguagem computacional Python, com coeficientes de determinação R^2 entre 77,55% e 83,05%, sendo o modelo para resistência à compressão o mais robusto. Esses achados confirmam a abordagem adotada e estabelecem uma base sólida para futuras estratégias na otimização desse compósito.

Conclui-se que os compósitos formulados com gesso-PA-BCS apresentam um significativo potencial para ampliar a aplicabilidade do gesso em construções sustentáveis, promovendo a reutilização de resíduos urbanos e a substituição parcial de materiais convencionais. Este trabalho contribui para o avanço técnico-científico na área de materiais de construção e sugere direções para estudos futuros voltados à otimização do compósito e à validação de sua viabilidade econômica e ambiental em escala industrial.

5. BIBLIOGRAFIA

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12127: Gesso para construção civil - Determinação das propriedades físicas do pó.** Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12128: gesso para construção: determinação das propriedades físicas da pasta.** Rio de Janeiro 2017.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12130 - Gesso para construção - Determinação de água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidro sulfúrico – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13207: Gesso para construção civil.** Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13279: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos.** Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7251: Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária.** Rio de Janeiro, 1982.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9778-05 - Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção água vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9779: Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação da Absorção de Água Por Capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.

Al Shammar, A.F. Implementation of Multiple Regression using Least Squares and Gradient Descent in Python. *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887) Volume 186 – No.21, May 2024.

BELDJILALI, S.; BOUGARA, A.; AGUIAR, J.; BOUHAMOU, N. E.; DABBEBI, R. Properties of a new material based on a gypsum matrix incorporating waste brick. **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 120416, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120416>.

BRANDIĆ, I.; PEZO, L.; BILANDŽIJA, N.; PETER, A.; ŠURIĆ, J.; VOĆA, N. Comparison of Different Machine Learning Models for Modelling the Higher Heating Value of Biomass. **Mathematics** 2023, 11, 2098. <https://doi.org/10.3390/math11092098>.

CHEN, C.; LU, J.; MA, T.; ZHANG, Y.; GU, L.; CHEN, X. Applications of vegetable oils and their derivatives as Bio-Additives for use in asphalt binders: A review. **Construction and Building Materials**, v. 383, p. 131312, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131312>.

de ALMEIDA, K. S.; SOARES, R. A. L.; DE MATOS, J. M. E.; ALMEIDA, C. D. S. M.; DE ALMEIDA, J. S. Incorporação de resíduo de gesso em formulação para adoquim cerâmico. **Cerâmica Industrial**, v. 25, n. spe, p. 1-11, 2021. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2020.005>.

FABRI, A. A.; DOS ANJOS AZAMBUJA, M.; BATTISTELLE, R. A. G. Construção com terra: adobe com adição de óleos vegetais. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 7, n. 53, 2019. <https://doi.org/10.17271/2318847275320192168>.

FARIA, O. B.; BATTISTELLE, R. A. G.; NEVES, C. Influence of the addition of "synthetic termite saliva" in the compressive strength and water absorption of compacted soil-cement. **Ambiente Construído**, v. 16, p. 127-136, 2016. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000300096>.

GEROLLI, M.; FLORIAN, F.; DE MARCO, G.. Reaproveitamento de resíduos na construção civil: TCC. **REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE**, v. 1, n. 5, p. e1545-e1545, 2021. <https://doi.org/10.47820/acertte.v1i5.45>.

JANKOVIC, A.; CHAUDHARY, G.; GOIA, F. Designing the design of experiments (DOE) – An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems. *Energy and Buildings*, v. 250, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111298>.

KRÜGER, A. M.; LIMA, P. D. M. T.; ABDALLA FILHO, A. L.; DE GEUS MORO, J.; DE CARVALHO, I. Q.; ABDALLA, A. L.; JOBIM, C. C. Dry matter concentration and corn silage density: Effects on forage quality. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, v. 8, n. 1, p. 20-27, 2020. [https://doi.org/10.17138/tgft\(8\)20-27](https://doi.org/10.17138/tgft(8)20-27).

MACHADO, L. F. M.; CAVALCANTE, E. H.; ALBUQUERQUE, F. S.; SALES, A. T. C. Adição de uma associação polimérica a um solo argilo-arenoso com vistas à estabilização química de materiais para pavimentos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 3, p. e11870, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170003.0204>.

MARCHUK, A.; RENGASAMY, P.; MCNEILL, A. Influence of organic matter, clay mineralogy, and pH on the effects of CROSS on soil structure is related to the zeta potential of the dispersed clay. **Soil Research**, v. 51, n. 1, p. 34-40, 2013. <https://doi.org/10.1071/SR13012>.

MEDEIROS, A. S. D.; SANTANA, C. S. A.; VIEIRA DA SILVA, M. A. Avaliação do comportamento mecânico do solo estabilizado com asfalto utilizando emulsão asfáltica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 29, n. 4, p. e20240533, 2024. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0533>.

MEDEIROS, L. D.; DE MELO FERREIRA, S. R.; DA CUNHA VIEIRA, M. I. M. Evolução da estabilização química em solos expansivos. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 8, n. 2, p. 123-139, 2023. <https://doi.org/10.24221/jeap.8.2.2023.5294.123-139>.

MORO, M. K.; ANDREATTA, D.; OLIVEIRA, B. C.; BIMBATO, R. M.; SIMONELLI, G. Application of central composite rotational delineation (ccrd) in the study of biodiesel properties. **BRAZILIAN JOURNAL OF PETROLEUM AND GAS**, v. 11, n. 4, p. 187-195, 2017. doi:10.5419/bjpg2017-0016.

PEREIRA, F. R.; PINHEIRO, E. C. M.; ALVES, R. B. **Portal Blindasolo**. Disponível em: <https://blindasolo.com.br/>. Acesso em: 23 out. 2025.

SAN ANTONIO GONZÁLEZ, A.; SANTOS JIMÉNEZ, M. D. R.; RÍO MERINO, M. D.; GONZÁLEZ CORTINA, M.; VIÑAS ARREBOLA, C. Feasibility of recycling CDW as raw material in gypsum composites. **Athens journal of technology & engineering**, v. 2, n. 3, p. 149-159, 2015. <https://doi.org/10.30958/ajte.2-3-1>.

SANTANNA, M. S. **Uso de resíduos lignocelulósicos provenientes da poda de árvores do Distrito Federal para produção de biocombustíveis**. 2022. xvii, 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) — Universidade de Brasília, Brasília,

2022. Disponível em: <http://www.rlbea.unb.br/jspui/handle/10482/45419>. Acesso em: 5 jan. 2025;

SILVA, M. G. S. **Desenvolvimento de compósitos à base de gesso e pó de fibras de coco**. 2013. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) — Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2013. Disponível em: <https://ri.ufs.br/jspui/handle/123456789/3503>. Acesso em: 12 dez. 2024.

SILVA, Thainá Kelly dos Santos; FERRAZ, Andréa de Vasconcelos; ANJOS, Débora Santos Carvalho dos. Estudo da impermeabilização do gesso de revestimento através da síntese do compósito hidrofóbico de gesso/silicone. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 4, p. e20220173, 2022.

ULIANA, D.; VAGUETTI, M. A. O.; DOS SANTOS, T. C. Construções sustentáveis: um estudo de caso de apo da casa popular eficiente da UFSM. **MIX Sustentável**, v. 8, n. 4, p. 133-139, 2022. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2022.v8.n4.133-139>.

van CRANENBURGH, S.; WANG, S.; VIJ, A.; PEREIRA, F.; WALKER, J. Choice modelling in the age of machine learning - Discussion paper. **Journal of Choice Modelling**, v. 42, March 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jocm.2021.100340>.

VELOSO, M. C. R. D. A.; VILLELA, L. S.; MESQUITA, L.; VALLE, M. L. A.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES, J. B. Produção e caracterização de compósitos à base de gesso reforçado com partículas de resíduo da agroindústria do cacau. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 01, p. e12945, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210001.1245>.

CAPÍTULO III

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PPERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

3.1 CONCLUSÕES GERAIS

O presente estudo demonstrou a viabilidade técnica e ambiental da produção de um compósito inovador à base de gesso, resíduos de poda de árvores (PA) e baba de cupim sintética (BCS), com potencial de aplicação na fabricação de pré-moldados para sistemas construtivos do tipo *Light Steel Frame*. A metodologia adotada integrou caracterizações físico-químicas dos materiais, planejamento experimental via DCCR e modelagem estatística por regressão polinomial utilizando Python®, o que possibilitou o ajuste de modelos com considerável poder preditivo.

Os resultados revelaram que a incorporação de PA e BCS ao gesso contribuiu significativamente para a melhoria das propriedades físico-mecânicas do compósito, com destaque para o aumento da resistência à compressão, redução da capilaridade e diminuição da absorção de água. Os modelos ajustados apresentaram coeficientes de determinação superiores a 77%, com o modelo da resistência à compressão atingindo R^2 de 0,83, evidenciando a robustez do ajuste estatístico e a eficiência da modelagem computacional adotada.

Além disso, o reaproveitamento de resíduos lignocelulósicos urbanos e o uso de aditivo de origem vegetal agregam valor ambiental ao produto final, promovendo a economia circular e o desenvolvimento de materiais sustentáveis. A pesquisa reafirma o potencial de inovação no setor da construção civil e contribui para a ampliação do uso de compósitos ambientalmente responsáveis.

3.2 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Dando continuidade aos avanços obtidos neste trabalho, futuras investigações poderão explorar novas combinações de resíduos e otimizações de formulação visando aprimorar ainda mais as propriedades do compósito desenvolvido. Entre as possibilidades, destacam-se:

- **Utilização de fibras de coco verde**, com seu elevado teor de lignina e resistência mecânica, como reforço estrutural para potencializar a tenacidade e a durabilidade do compósito.
- **Incorporação de resíduos de garrafas PET trituradas**, tanto na forma de fibras quanto de particulados, como alternativa para melhoria da ductilidade e redução de densidade do material.

- **Avaliação do desempenho do compósito com gessos contendo teores de semi-hidrato acima de 85%**, visando melhorar ainda mais a resistência mecânica e reduzir a porosidade em função da contribuição do BCS combinado ao semi-hidrato.
- **Realização de ensaios de tempo de pega com as formulações do compósito em forma de pasta**, segundo os protocolos das normas técnicas (como a NBR 12128), permitindo entender os efeitos dos componentes da formulação nas cinéticas de reidratação (endurecimento).
- **Desenvolvimento de protótipos em escala real** de placas ou elementos estruturais fabricados com o compósito, para avaliação do comportamento mecânico, térmico e higroscópico em condições ambientais controladas e de campo.
- **Aplicação de técnicas de aprendizado de máquina** para prever propriedades do compósito com maior acurácia, usando bases de dados mais amplas e variáveis adicionais, como temperatura de cura, umidade relativa e granulometria dos resíduos.

Essas direções futuras reforçam o compromisso com a inovação sustentável e expandem o leque de possibilidades técnicas e ambientais para o uso de compósitos alternativos na construção civil contemporânea.

APÊNDICE 1

CÓDIGO EM PYTHON PARA OBTENÇÃO DE SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS DOS MODELOS DE REGRESSÃO OBTIDOS A PARTIR DE AJUSTES DOS DADOS EXPERIMENTAIS

```
# Importar bibliotecas necessárias
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures
from sklearn.metrics import r2_score

# Definir os dados experimentais
data = {
    'A/G': [0.78, 0.78, 0.78, 0.78, 0.82, 0.82, 0.82, 0.82, 0.76, 0.83, 0.80, 0.80, 0.80,
            0.80, 0.80, 0.80, 0.80, 0.80, 0.80, 0.80],
    'BCS': [0.79, 0.79, 1.84, 1.84, 0.79, 0.79, 1.84, 1.84, 1.32, 1.32, 0.44, 2.20, 1.32,
            1.32, 1.32, 1.32, 1.32, 1.32, 1.32, 1.32],
    'PA': [0.79, 1.84, 0.79, 1.84, 0.79, 1.84, 0.79, 1.84, 1.32, 1.32, 0.44, 2.20, 0.44,
            2.20, 1.32, 1.32, 1.32, 1.32, 1.32, 1.32],
    'AA': [31.68, 43.19, 3.88, 16.33, 30.98, 8.68, 15.34, 28.33, 25.70, 31.82, 43.63,
            10.65, 23.53, 14.13, 34.59, 30.44, 21.88, 20.30, 28.51, 23.86],
    'CAP': [13.97, 21.28, 1.20, 6.76, 14.31, 18.18, 6.96, 16.28, 14.85, 13.41, 21.32,
            5.73, 13.29, 11.78, 14.01, 13.92, 10.36, 9.14, 15.71, 9.23],
    'RC': [4.03, 4.18, 4.02, 3.91, 3.67, 2.86, 3.35, 3.31, 5.17, 3.59, 4.26, 3.12, 5.26,
            3.71, 3.71, 3.41, 4.27, 3.66, 3.96, 3.56]
}

# Converter os dados em um DataFrame
df = pd.DataFrame(data)

# Definir variáveis independentes e dependentes
X = df[['A/G', 'BCS', 'PA']]
responses = {'AA': df['AA'], 'CAP': df['CAP'], 'RC': df['RC']}

# Preparar variáveis polinomiais de segunda ordem
poly = PolynomialFeatures(degree=2, include_bias=False)
X_poly = poly.fit_transform(X)
```

```

# Função para plotar superfícies de resposta
def plot_surface(model, x1_label, x2_label, fixed_label, fixed_value, X,
response_name):
    grid_x1, grid_x2 = np.meshgrid(
        np.linspace(X[x1_label].min(), X[x1_label].max(), 30),
        np.linspace(X[x2_label].min(), X[x2_label].max(), 30)
    )
    grid_fixed = np.full_like(grid_x1, fixed_value)
    grid_df = pd.DataFrame({x1_label: grid_x1.ravel(), x2_label: grid_x2.ravel(),
fixed_label: grid_fixed.ravel()})
    grid_poly = poly.transform(grid_df[['A/G', 'BCS', 'PA']])
    z_pred = model.predict(grid_poly).reshape(grid_x1.shape)

    fig = plt.figure(figsize=(10, 8))
    ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
    ax.plot_surface(grid_x1, grid_x2, z_pred, cmap='viridis', alpha=0.7)
    ax.scatter(X[x1_label], X[x2_label], responses[response_name], color='red',
label='Experimental Data')
    ax.set_xlabel(x1_label)
    ax.set_ylabel(x2_label)
    ax.set_zlabel(response_name)
    ax.set_title(f'{response_name} as a function of {x1_label} and {x2_label}')
    ax.legend()
    plt.show()

# Loop para ajustar modelos e gerar gráficos
for response_name, y in responses.items():
    # Ajustar modelo de regressão polinomial
    model = LinearRegression()
    model.fit(X_poly, y)

    # Calcular e exibir R²
    y_pred = model.predict(X_poly)
    r2 = r2_score(y, y_pred)
    print(f"\nModel for {response_name}:")
    print(f"R²: {r2:.4f}")
    print(f"Intercept: {model.intercept_:.4f}")
    print("Coefficients:")
    for feature, coef in zip(poly.get_feature_names_out(['A/G', 'BCS', 'PA']),
model.coef_):

```

```
print(f" {feature}: {coef:.4f}")

# Gerar gráficos de superfícies de resposta
plot_surface(model, 'A/G', 'BCS', 'PA', X['PA'].mean(), X, response_name)
plot_surface(model, 'A/G', 'PA', 'BCS', X['BCS'].mean(), X, response_name)
plot_surface(model, 'BCS', 'PA', 'A/G', X['A/G'].mean(), X, response_name)
```

APÊNDICE 2

CÓDIGO EM PYTHON PARA AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS MODELOS DE PREVISÃO

```
# Importação das bibliotecas necessárias
import pandas as pd # Para manipulação de dados
import numpy as np # Para operações matemáticas
import matplotlib.pyplot as plt # Para geração de gráficos
from sklearn.linear_model import LinearRegression # Para realizar regressão linear
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures # Para criar termos polinomiais
from sklearn.metrics import r2_score # Para calcular o coeficiente de determinação (R²)

# Definição dos dados experimentais
# As variáveis independentes são: A/G (razão água/gesso), BCS (teor de baba de cupim sintética) e PA (teor de resíduo de poda de árvores)
# As variáveis dependentes são: AA (absorção de água), CAP (capilaridade) e RC (resistência à compressão)
data = {
    'A/G': [0.78, 0.78, 0.78, 0.78, 0.82, 0.82, 0.82, 0.82, 0.76, 0.83, 0.80, 0.80, 0.80, 0.80, 0.80, 0.80, 0.80, 0.80, 0.80],
    'BCS': [0.79, 0.79, 1.84, 1.84, 0.79, 0.79, 1.84, 1.84, 1.32, 1.32, 0.44, 2.20, 1.32, 1.32, 1.32, 1.32, 1.32, 1.32, 1.32],
    'PA': [0.79, 1.84, 0.79, 1.84, 0.79, 1.84, 0.79, 1.84, 1.32, 1.32, 0.44, 2.20, 0.44, 2.20, 1.32, 1.32, 1.32, 1.32, 1.32],
    'AA': [31.68, 43.19, 3.88, 16.33, 30.98, 8.68, 15.34, 28.33, 25.70, 31.82, 43.63, 10.65, 23.53, 14.13, 34.59, 30.44, 21.88, 20.30, 28.51, 23.86],
    'CAP': [13.97, 21.28, 1.20, 6.76, 14.31, 18.18, 6.96, 16.28, 14.85, 13.41, 21.32, 5.73, 13.29, 11.78, 14.01, 13.92, 10.36, 9.14, 15.71, 9.23],
    'RC': [4.03, 4.18, 4.02, 3.91, 3.67, 2.86, 3.35, 3.31, 5.17, 3.59, 4.26, 3.12, 5.26, 3.71, 3.71, 3.41, 4.27, 3.66, 3.96, 3.56]
}

# Conversão dos dados para um DataFrame do Pandas para facilitar a manipulação
df = pd.DataFrame(data)

# Definição das variáveis independentes (entradas do modelo)
X = df[['A/G', 'BCS', 'PA']]
```

```

# Definição das variáveis dependentes (respostas do modelo)
responses = {'AA': df['AA'], 'CAP': df['CAP'], 'RC': df['RC']}

# Criação de termos polinomiais de segunda ordem para incluir interações e
quadráticos
poly = PolynomialFeatures(degree=2, include_bias=False)
X_poly = poly.fit_transform(X) # Gera um novo conjunto de variáveis com
interações e termos quadráticos

# Dicionário para armazenar os resultados de cada variável resposta
results = {}

# Loop para ajustar um modelo de regressão polinomial para cada variável
resposta
for response_name, y in responses.items():
    # Inicialização do modelo de regressão linear
    model = LinearRegression()

    # Treinamento do modelo com os dados polinomiais gerados
    model.fit(X_poly, y)

    # Predição dos valores utilizando o modelo ajustado
    y_pred = model.predict(X_poly)

    # Cálculo do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para avaliar a qualidade do ajuste
    r2 = r2_score(y, y_pred)

    # Armazena os resultados do modelo no dicionário
    results[response_name] = {
        'R²': r2, # Variância explicada pelo modelo
        'intercept': model.intercept_, # Interceptação do modelo
        'coefficients': model.coef_, # Coeficientes dos termos polinomiais
        'features': poly.get_feature_names_out(['A/G', 'BCS', 'PA']), # Nome das
variáveis polinomiais geradas
        'y_pred': y_pred, # Valores preditos
        'y_true': y # Valores reais
    }

# Plotagem do gráfico de valores preditos vs. valores reais
plt.figure(figsize=(8, 6))

```

```

plt.scatter(y, y_pred, color='blue', alpha=0.7, label='Predito vs Real')
plt.plot([min(y), max(y)], [min(y), max(y)], color='red', linestyle='--', label='Ajuste Ideal')
plt.xlabel('Valores Reais')
plt.ylabel('Valores Preditos')
plt.title(f'Modelo para {response_name}: Verdadeiro vs Predito\nR²: {r2:.4f}')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

```

Impressão dos resultados para cada variável resposta

```

for response_name, result in results.items():
    print(f'Modelo para {response_name}:')
    print(f'R² (Coeficiente de Determinação): {result["R²"]:.4f}')
    print(f'Intercepto: {result["intercept"]:.4f}')
    print("Coeficientes do modelo:")

```

Exibe os coeficientes de cada variável polinomial gerada

```

for feature, coef in zip(result['features'], result['coefficients']):
    print(f' {feature}: {coef:.4f}')

```

```

print("\n") # Pula uma linha para melhor visualização dos resultados

```

APÊNDICE 3



870250024581



27/03/2025

19:54

29409162335280178

Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2025 006123 6

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 2

Nome ou Razão Social: VALDEMIR ALEXANDRE DOS SANTOS

Tipo de Pessoa: Pessoa Física

CPF/CNPJ: 07974310472

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: Rua Leonardo da Vinci, 112 apto 2121, Imbiribeira

Cidade: Recife

Estado: PE

CEP: 51190-350

País: Brasil

Telefone: (81)33390523

Fax: (81)33390523

Email: valdemir.alexandre@hotmail.com

Depositante 2 de 2

Nome ou Razão Social: PADRÃO GYPSUM INDÚSTRIAS E TRANSPORTE LTDA

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 12219928000140

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Pessoa Jurídica

Endereço: Rodovia PE 615, km 13,1, s/n Zona Rural

Cidade: Araripina

Estado: PE

CEP: 56280-000

País: BRASIL

Telefone: (85) 387 31727

Fax:

Email: rafael@padraogypsumbrasil.com.br

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): PROCESSO DE PRODUÇÃO DE COMPÓSITO À BASE DE GESSO E RESÍDUO DE PODA DE ÁRVORE ADITIVADO COM BABA DE CUPIM SINTÉTICA PARA PRODUÇÃO DE PRÉ-MOLDADOS

Resumo: A presente invenção detalhada neste documento refere-se a um PROCESSO DE PRODUÇÃO DE COMPÓSITO À BASE DE GESSO E RESÍDUO DE PODA DE ÁRVORE ADITIVADO COM BABA DE CUPIM SINTÉTICA PARA A FABRICAÇÃO DE PRÉMOLDADOS. Este modelo de utilidade apresenta um compósito inovador, ambientalmente sustentável e funcional, concebido a partir da combinação de gesso de fundição, resíduos lignocelulósicos provenientes de podas de árvores e baba de cupim sintética como agente modificador de propriedades físico-químicas. A formulação do compósito foi desenvolvida com o objetivo de aprimorar significativamente as características de desempenho do material, resultando em percentuais máximos de 0,5% de absorção de água e capilaridade, além de um incremento maior que 90% na resistência à compressão em comparação ao gesso convencional. O processo descrito viabiliza a produção de elementos pré-moldados com propriedades otimizadas, atendendo às demandas da construção civil contemporânea por materiais de alta eficiência estrutural, durabilidade e reduzido impacto ambiental.

Dados do Inventor (72)

Inventor 1 de 5

Nome: ALCIDES MIGUEL DA SILVA JÚNIOR

CPF: 62118510497

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Engenheiro, arquiteto e afins

Endereço: Rua Demócrito de Souza filho 156 - apto 2103 B - Madalena

Cidade: Recife

Estado: PE

CEP: 50610-120

País: BRASIL

Telefone: (81) 999 309417

Fax:

Email: Alcidesmsjunior@gmail.com

Inventor 2 de 5

Nome: DANIEL DE MORAIS SOBRAL

CPF: 05357336407

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Engenheiro, arquiteto e afins

Endereço: Rua Pastor José Amaro da Silva

Cidade: Recife

Estado: PE

CEP: 51021-230

País: BRASIL

Telefone: (81) 996 170499

Fax:

Email: dmsobral@gmail.com

Inventor 3 de 5

Nome: LEONARDO BANDEIRA DOS SANTOS

CPF: 90738810487

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: Rua Izabel Magalhães, 93, Apto. 703 Boa Viagem

Cidade: Recife

Estado: PE

CEP: 51030-330

País: BRASIL

Telefone: (81) 301 97926

Fax:

Email: leonardo.bandeira@iati.org.br

Inventor 4 de 5

Nome: SERGIO MURILO MACIEL FERNANDES

CPF: 16650352420

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: Avenida Beira Rio Número 165 - apto 1501 Bairro: Madalena

Cidade: Recife

Estado: PE

CEP: 50610-100

País: BRASIL

Telefone: (81) 988 102119

Fax:

Email: smmfast@gmail.com

Inventor 5 de 5

Nome: VALDEMIR ALEXANDRE DOS SANTOS

CPF: 07974310472

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: Rua Izabel Magalhães

Cidade: Recife

Estado: PE

CEP: 51030-330

País: BRASIL

Telefone: (81) 301 97926

Fax:

Email: valdemir.santos@unicap.br

