

Argamassa de reboco com incorporação de resíduo de gesso reciclado

Klayce Santos Siqueira ¹, Cochiran Pereira dos Santos ², Fernanda Martins Cavalcante de Melo ¹,
Herbet Alves de Oliveira ^{1*}

¹ Instituto Federal de Sergipe, Av João Café Filho 260, Cidade Nova, 49200-00, Estância, Sergipe

² Universidade Federal de Sergipe, Av Marechal Rondon s/n, Jardim Rosa Elze, 49100-000, São Cristóvão, Sergipe

*herbet.oliveira@ifs.edu.br

Resumo:

O emprego do gesso na engenharia civil brasileira como acabamento do modo geral tem aumentado exponencialmente nos últimos anos. O descarte do gesso de forma incorreta vem se tornando um grande problema econômico e ambiental. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo produzir e avaliar as características de argamassas de reboco com adição de resíduo de gesso reciclado, gerado na construção civil, em substituição parcial à areia e cimento. Foram produzidos corpos-de-prova com sete formulações a partir da formulação padrão na proporção em volume de 1:0,61:6,19:1,2 (cimento, cal, areia e água), sendo elas uma formulação padrão sem nenhuma substituição de resíduo de gesso, duas formulações com substituição parcial da areia por resíduo de gesso em 12,5%, e 25%, e quatro formulações com substituição parcial do cimento por resíduo de gesso em 10%, 20%, 40%, e 50% respectivamente. A massa produzida foi analisada quanto às suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido. Os resultados obtidos foram analisados pelo ANOVA. Os resultados apontam que o gesso pode substituir parcialmente o cimento sem prejuízo das propriedades de resistência mecânica à compressão e absorção de água. Foi observado acréscimo na resistência de até 9% com substituição da areia pelo gesso em ($A_{12,5}$) e até (27%) em C_{20} quando substituiu o cimento por 20% de gesso.

Palavras-chaves: Argamassa de reboco; resíduo de gesso; sustentabilidade; resistência mecânica.

1. INTRODUÇÃO:

A área da construção e desenvolvimento urbano desempenha um papel significativo na extração intensiva de elementos provenientes da natureza. Como resultado direto desse processo, surge uma considerável parcela de geração de resíduos, principalmente em nações como o Brasil, onde boa parte das etapas construtivas ainda se realiza predominantemente por métodos manuais. Portanto, surge a necessidade de estudos que apresentem opções inovadoras para incorporar os resíduos e promover práticas sustentáveis na indústria. Isso visa impedir o depósito desses resíduos em locais inadequados, como terrenos vazios, bem como em zonas designadas para a conservação do meio ambiente [1].

No contexto brasileiro, segundo um estudo conduzido pela Associação Brasileira para a Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (Abrecon), no transcorrer do ano de 2020 a produção de entulhos oriundos de edificações e demolições atingiu cerca de 100 milhões de toneladas. Contudo, somente aproximadamente 20% dessa quantidade é reutilizada, ao passo que a porção predominante é descartada, frequentemente encontrando destino em instalações de disposição de resíduos [2].

O descarte inadequado de resíduos de construção civil acarreta uma série de consequências prejudiciais para o meio ambiente e a sociedade como um todo. A liberação de substâncias contaminantes provenientes desses resíduos pode resultar em impactos de longo prazo na saúde humana. A fim de mitigar esses efeitos negativos, é essencial implementar práticas sustentáveis de gerenciamento de resíduos, promovendo a redução, reutilização e reciclagem dos materiais. A conscientização das empresas e indivíduos quanto aos impactos ambientais do descarte inadequado é fundamental para uma mudança efetiva [3].

O gesso é um material amplamente utilizado na construção civil devido às suas propriedades físicas e químicas vantajosas. É composto por sulfato de cálcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), obtido a partir da mineração da gipsita, passando por processos de moagem e calcinação para se transformar em gesso em pó, que é a forma mais comum de utilização. Apesar de suas vantagens, a sua produção pode gerar impactos ambientais em termos de extração mineral e consumo energético na calcinação. Além de que o uso continuado acarreta a geração de grandes quantidades de resíduos [4].

Segundo a FGV [5], o gesso, também conhecido como gipsita, possui uma grande diversidade de uso industrial na construção civil, sobretudo como revestimento de paredes e adorno de modo geral, sendo um dos materiais mais utilizados na construção civil no mundo. O Brasil é o 16º maior produtor mundial de gipsita participando com cerca de 2 milhões de toneladas, sendo considerado também o segundo maior da América Latina. De acordo com o Ministério de Minas e Energia, no Brasil, o mineral é encontrado predominantemente no estado de Pernambuco (97%), seguido por Maranhão (1,5%), Ceará (0,8%) e Tocantins (0,7%). O polo gesseiro do Araripe, que se localiza na divisa dos estados de Pernambuco, Ceará e Piauí, é responsável por produzir cerca de 1,6 milhão de toneladas brutas de gipsita/ano. A quantidade de gipsita vendida, consumida ou transferida para industrialização em 2017 no polo foi de 699 mil toneladas, com um valor total de 112,6 milhões de reais [6].

Segundo Ahmed et al. [7] são gerados 15 milhões de ton/ano de resíduo de gesso em todo o mundo. Conforme dados do Sindicato da Indústria do Gesso do estado de Pernambuco Sindugesso [8], aproximadamente 5% do gesso acartonado, 4% dos produtos pré-moldados e 35% quando usado como revestimento em alvenaria são convertidos em resíduos durante as atividades de construção civil.

Devido à presença de sulfatos em sua composição, os resíduos de gesso descartado de forma inadequada ao entrarem em contato com umidade, material orgânico e água podem levar à contaminação do solo e dos lençóis freáticos, bem como contribuir para a produção de gases tóxicos e inflamáveis, como o sulfídrico (H_2S) [9]. De acordo com a resolução CONAMA nº 307/2002 artigo 5º, parágrafo 2, o gesso é pertencente à classe B, sendo considerado como resíduo reciclável para outras destinações [10].

Após passar pelo processo de reciclagem, o gesso se torna uma alternativa ambientalmente amigável para ser reutilizado. Sua aplicação encontra relevância na agricultura, onde desempenha um papel na reabilitação de solos com alto teor de sódio. Além disso, devido à sua composição rica em enxofre e cálcio, é empregue como um valioso fertilizante [9].

Na esfera da construção civil, o gesso desempenha múltiplos papéis, sendo utilizado na fabricação de revestimento para paredes e tetos, na fabricação de blocos e telhas cerâmicas, e na integração na produção de materiais cimentícios, tais como argamassa de assentamento e revestimento. Essa integração possibilita a substituição parcial de componentes como o aglomerante (cimento) e o agregado miúdo (areia) [11,12].

Com a finalidade de se analisar se é possível e viável a produção de argamassas com a adição de resíduo de gesso em questões de comportamento e propriedades físicas e mecânicas, pesquisas têm sido realizadas [1]. Foi estudada a resistência à compressão axial da argamassa de reboco produzida com adição de gesso reciclado em substituição parcial ao cimento Portland, nas proporções 0%, 3%, 7% e 15%. Os ensaios laboratoriais foram realizados com base em normas técnicas pertinentes ao estudo e os resultados revelaram que a argamassa produzida atingiu valores superiores a 8 MPa, sendo superior ao valor mínimo exigido pela NBR 13281 [13], que estabelece o valor de 1,5 MPa.

Santos [14] estudou a reutilização do resíduo da placa de 'drywall', incorporado em argamassa de revestimento, produzindo corpos-de-prova com incorporação de 15% de gesso acartonado. Os corpos com tal incorporação apresentaram uma redução na resistência à compressão, porém os resultados obtidos são positivos comparados a outras argamassas de revestimento, desta forma é viável a incorporação de gesso proveniente da placa de 'drywall', e contribui com a menor quantidade de resíduo para o meio ambiente.

Brun [15] avaliou as propriedades físico-mecânicas de uma argamassa com incorporação de resíduo de bloco cerâmico e resíduo de gesso, em substituição parcial do agregado miúdo, em seis traços com proporções diferentes de argamassa. Na argamassa com substituição parcial de resíduo de gesso pôde-se observar que a trabalhabilidade teve um aumento. A maior resistência à compressão foi de 7,15 MPa e resistência à tração na flexão de 4,35 MPa apresentou uma redução quando comparada aos demais traços.

O objetivo desse trabalho é avaliar a possibilidade de reaproveitar gesso reciclado da construção civil em argamassas de reboco na forma já hidratada. Foi realizada secagem em condições ambientais seguida de moagem, pois o gesso é bastante fino, higroscópico, e a secagem acima de 140 °C poderia remover a água e devolver ao gesso propriedades aglomerantes.

2. METODOLOGIA:

2.1. Caracterização dos materiais:

Os materiais utilizados para produção das argamassas de reboco foram caracterizados conforme as normas ABNT apresentadas a seguir. Os ensaios foram realizados no laboratório de materiais de construção do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe, campus Estância (IFS).

2.1.1. Cimento Portland:

O cimento utilizado para a produção dos corpos-de-prova foi o cimento Portland alta resistência inicial (CP V-ARI RS). Este cimento apresenta altíssima resistência inicial e final, e resistência a sulfatos. Suas propriedades físicas e químicas foram determinadas seguindo as normas apresentadas na Tab.1.

Tabela 1. Propriedades físicas e químicas do cimento Portland

Características	Normas
Índice de finura	ABNT NBR 11579:2013
Consistência normal	ABNT NBR 16606:2018
Tempo de pega	ABNT NBR 16607:2018
Massa específica real	ABNT NBR 16605:2017
Resistência à compressão	ABNT NBR 7215:2019

2.1.2. Cal:

A cal utilizada para a produção da argamassa de reboco foi uma cal hidratada submetida aos ensaios apresentados na Tab.2.

Tabela 2. Propriedades físicas da cal

Características	Norma
Análise granulométrica	ABNT NBR 7181:2018
Massa específica	ABNT NM 52:2009
Massa específica aparente	ABNT NM 52:2009

2.1.3. Areia:

A areia utilizada para a produção da argamassa de reboco foi uma areia natural, adquirida no município de Estância (SE), Brasil. Antes do seu uso, a areia foi submetida aos ensaios de caracterização de suas propriedades de acordo com as normas apresentadas na Tab.3.

Tabela 3. Propriedades físicas do agregado miúdo

Características	Normas
Granulométrica	ABNT NBR 7181:2018
Massa específica aparente	ABNT NBR 7185:2016
Massa unitária	ABNT NBR NM 45:2006

2.1.4. Água:

A água utilizada na argamassa foi proveniente do sistema de abastecimento público do município de Estância (SE) Brasil, fornecida pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto SAAE.

2.1.5. Resíduo de gesso:

O resíduo de gesso utilizado é proveniente de resto de construções. Após coletado, foi seco em estufa, na temperatura de (60 ± 5) °C. Tomou-se o cuidado de não secar acima de 140 °C a fim de evitar a perda de água e reidratação do gesso. Após secagem, o resíduo foi moído em moinho de bolas de porcelana com capacidade de 5 L, com 50% do volume ocupado por bolas de porcelana, e 25% pelo gesso. A razão bolas/gesso foi de 1,5. O tempo de moagem foi de 1 h, e após o resíduo foi passado na peneira ABNT 40 (0,425 mm). Em seguida, foi armazenado em saco plástico. Sua caracterização se deu por meio dos ensaios apresentados na Tab.4.

Tabela 4. Propriedades físicas do gesso

Características	Norma
Análise química por FRX	-
Difratometria por raios X (DRX)	-
Massa específica	ABNT NM 52:2009
Massa específica aparente	ABNT NM 52:2009

As análises químicas por fluorescência de raios X (FRX) das matérias-primas foram determinadas por análise semi quantitativa a vácuo (Bruker S4 Pioneer) em amostras de 10 g passadas em peneira nº 200 (0,075 mm), que foram prensadas em corpos cilíndricos com diâmetro 20 mm e espessura de 3 mm.

Para o ensaio de difratometria de raios X as matérias-primas foram devidamente secas, passadas em peneira de malha 150 µm. Foi usado um equipamento Bruker D8 Advance, com radiação Cu K_{α1} ($\lambda = 1,5418$ Å) utilizando varredura contínua, em intervalo angular de 5 a 60° (2 θ), com velocidade de varredura de 1°/min. A identificação das fases cristalinas do gesso foram realizadas de acordo com os padrões obtidos no banco de dados do ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*) utilizando-se o *software* Match versão demo.

Na análise termogravimétrica os eventos térmicos das amostra no intervalo entre 25 e 1000 °C foram registrados em medidas simultâneas de TGA. As medidas foram realizadas em um equipamento da TA Instruments, modelo SDT 2960. As amostras foram analisadas em cadinho de platina, sob fluxo de ar sintético com vazão de 100 ml/min e taxa de aquecimento de 10 °C/min.

2.2. Definição do traço e formulação das argamassas:

Foram utilizados na preparação das argamassas cimento, cal, areia, água e resíduo de gesso. De acordo com a Tab.5, foram produzidas sete formulações a partir do traço em volume 1:0,61:6,19:1,2 (cimento, cal, areia e água). Uma formulação de referência foi criada sem a adição de resíduo de gesso. Em seguida, foram desenvolvidas duas formulações designadas por A12,5 e A25, nas quais ocorreu uma substituição parcial da areia pelo resíduo de gesso em 12,5% e 25%, respectivamente. Também foram estabelecidas quatro formulações denominadas C10, C20, C40 e C50, com substituição parcial do cimento por resíduo de gesso em 10, 20, 40 e 50% em massa, respectivamente.

Tabela 5. Formulação das argamassas em volume

Matéria-prima (%)	Ref.	A12,5	A25	C10	C20	C40	C50
Cimento	1	1	1	1	1	1	1
Cal	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
Areia	6,19	6,19	6,19	6,19	6,19	6,19	6,19
Gesso	-	12,5*	25*	10**	20**	40**	50**
a/c	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

*Percentagem em substituição à areia. **Percentagem em substituição ao cimento

2.3. Preparação das argamassas:

Os componentes empregados na elaboração dos corpos-de-prova das argamassas foram devidamente pesados em balanças eletrônicas de alta precisão (0,01 g). A produção ocorreu utilizando um misturador mecânico com eixo vertical (conhecido como argamassadeira) com capacidade de 5 litros (Eduotec). Para garantir a correta mistura dos materiais, os procedimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 7215 [16] foram estritamente seguidos, tanto em relação à adição dos componentes como ao tempo de mistura.

2.4. Métodos de ensaios para caracterização das argamassas:

Nesta seção são expostos e explicados os testes conduzidos nas argamassas com o propósito de caracterizar suas propriedades tanto em sua condição inicial, conhecida como estado fresco, como em sua condição endurecida.

2.4.1. Propriedades da argamassa no estado fresco:

Índice de consistência: O método de avaliação do índice de consistência da argamassa em seu estado fresco inicial está padronizado pela norma ABNT NBR 13276 [17]. Esse ensaio permite identificar se é necessário melhorar a fluidez da argamassa, seja por meio da adição de plastificantes ou aumento da relação água/cimento. Após a preparação da argamassa, o molde tronco cônico foi preenchido em três camadas, e em cada uma delas foram aplicados 15, 10 e 5 golpes, respectivamente, utilizando um soquete de metal, de forma uniforme. Em seguida, a argamassa foi nivelada usando uma régua metálica. Após a retirada do molde a manivela da mesa foi girada por 30 vezes durante 30 segundos. Em seguida o diâmetro do espalhamento da argamassa foi medido em três pontos diferentes.

Massa específica aparente: O ensaio de massa específica aparente da argamassa foi padronizado pela norma ABNT NBR 9833 [18]. O ensaio determina a massa específica da argamassa no estado fresco. No ensaio a argamassa foi colocada num recipiente cilíndrico em quatro camadas com adensamento manual por meio de 30 golpes em cada camada. Ao final do adensamento a superfície é nivelada e o recipiente cilíndrico é pesado. A massa específica aparente foi determinada pela eq.1.

$$D_{ap} = \frac{m}{v} \cdot 1000 \quad (1)$$

Onde: D_{ap} é a massa específica aparente da argamassa (g/cm^3); m é a massa da argamassa (g); e v é o volume do recipiente, expresso em decímetros cúbicos (cm^3).

2.4.2. Propriedades da argamassa no estado endurecido:

Para a realização dos ensaios no estado endurecido foram moldados 12 corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro para cada formulação, sendo 4 para determinação da resistência à compressão e 8 para massa específica, absorção de água e durabilidade. Os corpos-de-prova foram moldados em 4 camadas com 30 golpes por camada com soquete metálico, permaneceram nas fôrmas cilíndricas por 24 horas, em seguida foram desmoldados, e submetidos à cura submersos por 28 dias de acordo com a ABNT NBR 7215 [19].

Resistência à compressão: A resistência a compressão nas argamassas investigadas foi determinada segundo a ABNT NBR 7215 [19], e após 28 dias os corpos foram rompidos utilizando uma prensa hidráulica (Pavitest HD 200T) a velocidade 0,6 MPa/s.

Massa específica real: O ensaio para determinação da massa específica real das argamassas foi padronizado de acordo com a ABNT NBR 9778 [20]. A massa específica real foi determinada pela eq.2:

$$D_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (2)$$

Onde: D_r é a massa específica real (g/cm^3); m_s é a massa da amostra seca em estufa (g); m_i é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

Absorção de água: O ensaio de absorção de água da argamassa foi realizado por adaptação da ABNT NBR 9778 [20], que determina os procedimentos para o ensaio de absorção de água. Após 28 dias de cura, oito amostras de cada formulação foram colocadas em estufa à $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$, por período de 72 h. Posteriormente foram submersas em água à $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, e em seguida foram progressivamente levadas à ebulição por um período de 3 horas. Após a ebulição, as amostras foram resfriadas e determinada sua massa submersa e a massa saturada. A absorção de água foi determinada pela eq.3.

$$A = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (3)$$

Sendo: A é a absorção de água (%); M_{sat} é a massa da amostra saturada em água após a imersão e fervura (g); e M_s é a massa da amostra seca em estufa (g).

Durabilidade: Para determinação da durabilidade foram usados 8 corpos de prova, sendo que foi avaliada a perda de massa após imersão em soluções de (NaOH) e (Na_2SO_4) durante 5 dias, seguido de secagem e escovação dos corpos de prova. O procedimento pode ser descrito da seguinte forma; após a desmoldagem, os corpos-de-prova foram curados por 28 dias. Em seguida os corpos-de-prova foram secos em estufa à $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$ por 24 horas. Quatro corpos foram imersos em solução Na_2SO_4 e outros quatro foram imersos na solução de (NaOH) ambos na concentração de 5%, durante o período de 5 dias. As faces dos corpos-de-prova receberam 4 escovações, sendo 2 na horizontal e 2 na vertical, e 20 escovações na lateral do corpo de prova, em seguida foi determinada a massa dos corpos-de-prova. O ensaio foi uma adaptação da norma ABNT NBR 13554 [21], que promove a escovação dos corpos de prova, em junção com a ASTM C1012-04 [22], que trata da durabilidade por ataque em sulfatos.

A durabilidade foi determinada por meio da perda de massa conforme a eq.4.

$$PM = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100$$

Onde: PM é a perda de massa (%); m_i é a massa seca inicial do corpo de prova (g); e m_f é a massa seca final do corpo de prova, após atingir massa constante (g).

2.5. Análise estatística:

Os dados coletados nos ensaios de caracterização dos concretos foram apresentados considerando a média aritmética das amostras, por formulação, seguida do desvio padrão. Para avaliação dos resultados obtidos nos ensaios, apurou-se a normalidade dos dados e, assim, foi realizada uma análise estatística por meio de ANOVA (análise de variância), através do software PAST (Paleontological Statistics), adotando-se uma probabilidade de significância (valor-p) menor que ou igual a 0,05 ($p \leq 0,05$), seguida do teste de Tukey que avalia entre quais formulações existe diferença significativa.

3. RESULTADO E DISCUSSÃO:

Nesse item são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização, tanto dos materiais utilizados, bem como a análise das argamassas produzidas.

3.1. Caracterização dos materiais:

Os resultados de caracterização do cimento Portland CP V-ARI RS são apresentados na Tab.6. Com relação à consistência os resultados estão de acordo com o padrão usual de 220 ± 1 mm. O tempo de pega foi avaliado de acordo com a ABNT NBR 16606 [23], e apresentou comportamento normal. A resistência mecânica foi testada de acordo com a ABNT NBR 7215 [24] para 7 dias e se apresentou dentro dos parâmetros. A massa específica real do cimento também se apresentou dentro dos padrões estabelecidos pela ABNT NBR 16605 [25].

Tabela 6. Resultados dos ensaios de caracterização do cimento Portland

Características	Unid.	CP V	Requisitos normativos
Consistência normal	cm	22	22 ± 1
Tempo de pega	min		60 ± 5
Massa específica	g/cm^3	3,14	$3,10 \pm 0,01$
Resistência à compressão	MPa	-	$> 40 \pm 2$
7 dias	MPa	-	34 ± 1

Os resultados de massa unitária e real dos materiais utilizados são apresentados na Tab.7. A cal apresentou massa específica real similar a outros trabalhos [26,27]. Da mesma forma o gesso, o cimento e a areia também apresentam resultados de acordo com outros autores [15].

Tabela 7. Resultados de massa unitária (MU) e massa específica real (MER) dos materiais utilizados

Características	MU (g/cm^3)	MER (g/cm^3)
Areia	1,64	2,65
Cal	0,65	2,38
Cimento	1,06	3,14
Gesso	1,10	2,41

A Fig.1 mostra as curvas granulométricas da areia e do resíduo de gesso utilizados nesta pesquisa. De acordo com a ABNT NBR 7211 [28], as areias que possuem módulo de finura entre os limites de $1,55 < MF < 2,2$ são classificadas como finas (zona utilizável inferior), entre $2,2 < MF < 2,9$ como médias (zona ótima) e de $2,9 < MF < 3,5$ como grossas (zona utilizável superior). De acordo com os resultados, pode-se observar que as amostras de areia e gesso se encontram na zona utilizável inferior.

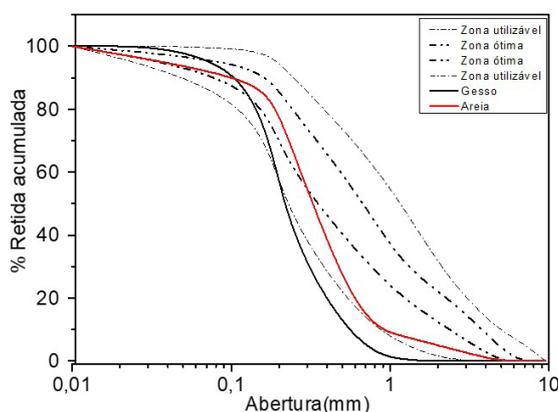


Figura 1. Curva granulométrica da areia e do resíduo de gesso

Na Tab.8 é apresentada a análise química do gesso, areia e cal. O resíduo de gesso é composto maioritariamente de óxido sulfúrico (70,1%) e óxido de cálcio (23,2%) resultado similar a outros trabalhos [29,30].

Tabela 8. Análise química por FRX dos materiais utilizados

(%)	Gesso	Areia	Cal
CaO	23,2	1,2	59,1
SiO ₂	1,1	97,8	2,0
Al ₂ O ₃	0,2	0,2	0,1
Fe ₂ O ₃	<0,1	0,3	0,2
SO ₃	70,1	0,2	0,5
MgO	0,2	0,3	0,4
K ₂ O	0,1	<0,1	0,1
PF	5,0	0	37,6

A massa específica do resíduo de gesso foi determinada conforme a ABNT NM 52 [31], resultando em 2,41 g/cm³. A Fig.2 mostra o difratograma de raios X do resíduo de gesso. O resultado da análise mostra que o material em questão, com suas respectivas fichas catalográficas, contém CaSO₄.2H₂O (anidrita), CaSO₄.2H₂O (bassanita), e ainda carbonato de cálcio, conforme outros trabalhos [36-37].

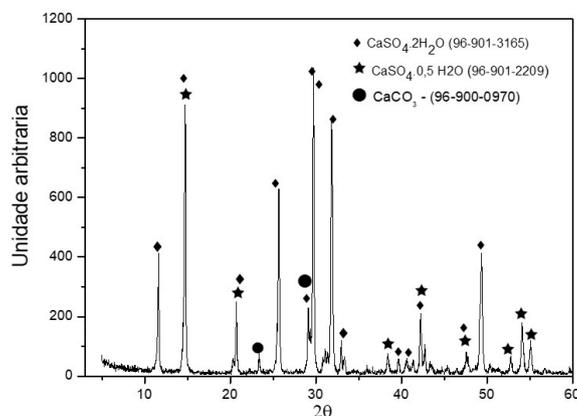


Figura 2. Difratoograma de raios X do resíduo de gesso

O DTG do gesso é apresentado na Fig.3. Pode-se observar que a cerca e 130 °C ocorreu reação de perda de água correspondente a meia molécula de água e a uma perda de 18% devida à liberação de água estrutural, com formação de bassanita (hemidrato). A 630 °C ocorre a decomposição do carbonato (impureza) presente no material, também observada nos trabalhos de Cipriano [38]. As reações de desidratação do gesso ou gesso reciclado apresentam as fases de desidratação quando submetidos a diferentes temperaturas. O gesso não pode ser seco nas temperaturas acima de 130 °C sob o risco de perder água alterando assim suas propriedades, de CaSO₄.2H₂O → CaSO₄.0,5H₂O + 1,5H₂O [38].

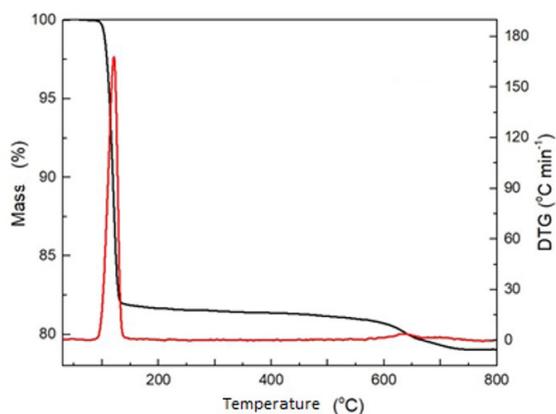


Figura 3. TG/DTG do resíduo de gesso

3.2. Resultados da caracterização das argamassas:

Nesse item serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das argamassas em estado fresco e estado endurecido.

3.2.1. Caracterização das argamassas em estado fresco:

Os resultados médios dos índices de consistência obtidos nos ensaios realizados nas argamassas estão de acordo com a ABNT NBR 13276 [17], e são apresentados na Fig.4. Não foi observada diferença significativa na consistência entre as amostras.

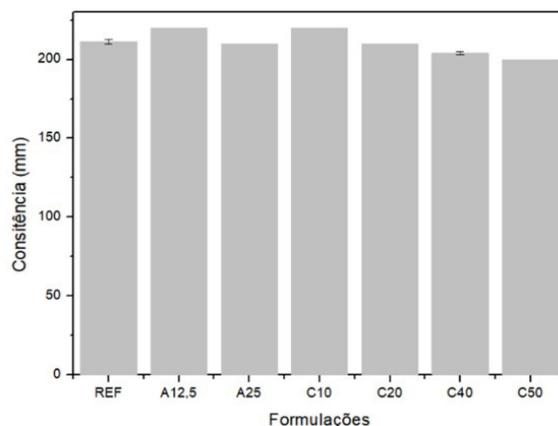


Figura 4. Índice de consistência das argamassas

Os resultados médios da massa específica aparente obtidos nos ensaios realizados com as argamassas são apresentados na Fig.5. A fim de verificar se as substituições da areia e do cimento pelo resíduo de gesso exercem influência significativa na massa específica aparente, foi realizada a análise de variância ($F=10,57$; $F_{\text{crítico}}=2,63$ e valor $p=5,119 \times 10^{-3}$) e teste Tukey, onde foi possível observar que existe diferença entre a formulação A12,5 e a formulação REF. Já as formulações de A25, até C50 não apresentaram diferença significativa em relação à referência (REF).

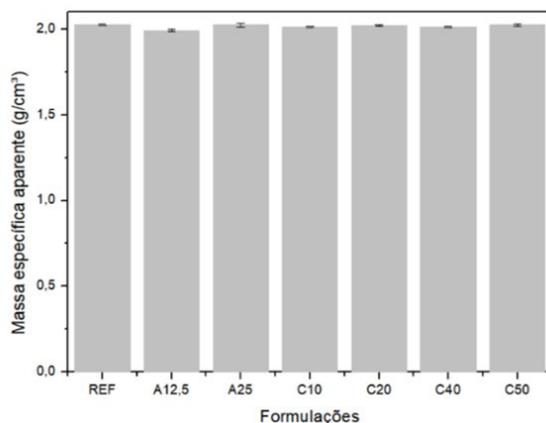


Figura 5. Massa específica aparente das argamassas

3.2.2. Caracterização das argamassas no estado endurecido:

Os resultados médios da resistência à compressão são apresentados na Fig.6. De acordo com a ANOVA e Tukey para $F=3,21$ e $F_{\text{crítico}}=2,57$, foi observada diferença significativa principalmente nas formulações

A12,5 e A25 em relação a REF. Para as formulações C20 a C50 não houve diferença significativa em relação à referência. Ou seja, o gesso substituindo o cimento não apresentou diferença de resistência à compressão. Segundo Taylor [33] a disponibilização de sulfato na matriz, proveniente de meio externo ou interno, promove novamente o desequilíbrio da relação sulfato/aluminato e nesse caso pode ocorrer a transformação do monossulfoaluminato em etringita, podendo aumentar a resistência mecânica.

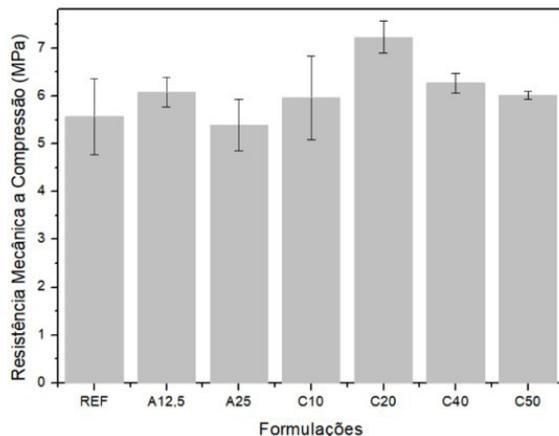


Figura 6. Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias

Os resultados médios das resistências à compressão antes e após a exposição ao Na_2SO_4 durante 28 dias obtidos nos ensaios realizados com as argamassas estão apresentados na Fig.7. De acordo com a ANOVA e teste Tukey com $F=6,56 \times 10^{-1}$ e $F_{\text{crítico}}=2,9 \times 10^{-1}$ com $p=0,07$, foi observado um aumento da resistência para todas as formulações que foram imersas em Na_2SO_4 quando comparadas às resistências iniciais. A imersão dos corpos de prova em Na_2SO_4 promoveu o aumento da resistência nos primeiros 28 dias. O Na_2SO_4 reage com o Ca(OH)_2 presente na forma CaO livre no cimento formando-se sulfato de cálcio que por sua vez reage com a aluminato, aumentando a resistência até certo limite, conforme representado na reação 1.



A reação (1) prossegue enquanto houver condições para tal. No entanto, se o Na_2SO_4 se acumular atingir-se-á um equilíbrio dependendo da concentração de Na_2SO_4 de acordo com a reação (2) [34].

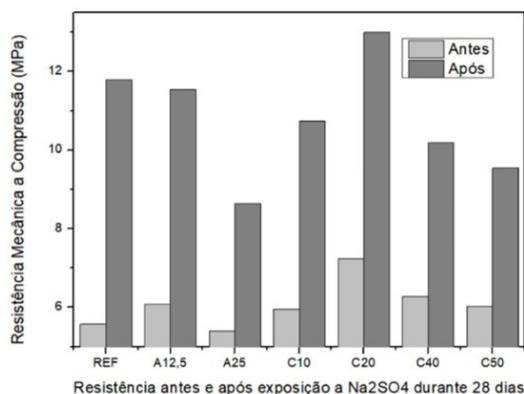


Figura 7. Resistência à compressão das argamassas antes e após a exposição a Na_2SO_4 durante 28 dias

Os resultados médios da absorção de água das argamassas são apresentados na Fig.8. De acordo com a ANOVA e teste Tukey para $F=52,6$ e $F_{\text{crítico}}=2,57$ e $p=1,07 \times 10^{-23}$ foi observada diferença significativa entre

as medias de substituição do gesso pela areia nas formulações REF até C10. No entanto, a substituição de cimento pelo gesso não apresentou diferenças significativas, principalmente nas formulações C20 a C50. Esse fato se deve ao gesso apresentar como principal componente o CaSO_4 , já presente no cimento, portanto não houve alterações nas fases cristalinas formadas. De acordo com a análise realizada, foi constatado que à medida que o teor de gesso é adicionado na mistura em substituição a areia a absorção de água aumenta em relação à formulação de referência REF. A porosidade da pasta de cimento no estado endurecido está associada ao empacotamento e ao grau de hidratação do cimento. Quanto menor a porosidade, maior é a densidade de empacotamento e menor é o grau de hidratação [35].

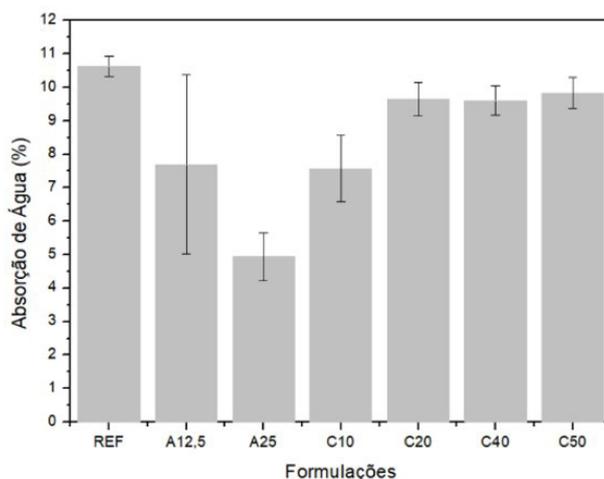


Figura 8. Absorção de água das argamassas aos 28 dias

O gráfico apresentado na Fig.9 mostra os resultados médios para a massa específica real das argamassas. De acordo com a ANOVA e teste Tukey para $F=28,04$, $F_{\text{crítico}}=2,29$ e $p=2,9 \times 10^{-14}$ foi observada variação nas formulações A12,5, A25 e C10 em relação a REF. As demais formulações apresentaram-se iguais à média. Ou seja, a substituição da areia pelo gesso alterou a massa específica real das argamassas.

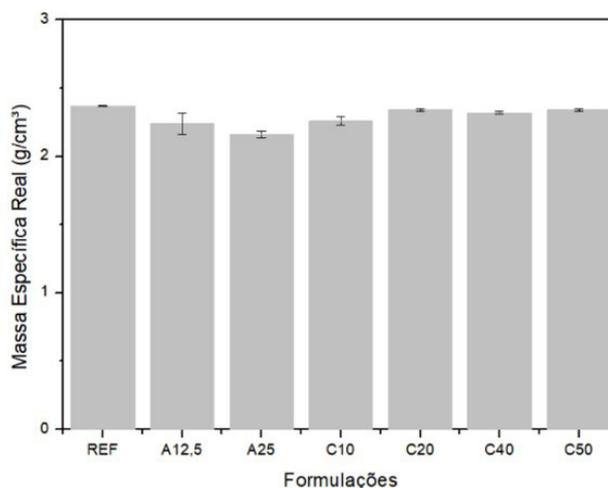


Figura 9. Massa específica real das argamassas

Os resultados médios para durabilidade das argamassas são apresentados na Fig.10. Pode-se observar que ao 5º dia de exposição nas soluções a formulação A25 apresentou uma perda maior de massa quando exposta à solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4) e hidróxido de sódio (NaOH), e as demais formulações não apresentaram perdas de massa significativas quando comparadas à formulação de referência. Por fim, o gesso prejudicou de modo geral a durabilidade em relação à referência, principalmente porque o acréscimo da $(\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O})$ apresentou-se como material inerte prejudicando o empacotamento.

Já aos 28 dias de exposição nas soluções, as argamassas obtiveram um ganho de massa, que se torna perceptível quando comparado às argamassas que foram expostas as mesmas soluções durante 5 dias. A absorção das soluções pelas partículas de gesso pode formar novos cristais que podem influenciar no aumento de volume e por consequência, na expansão das argamassas.

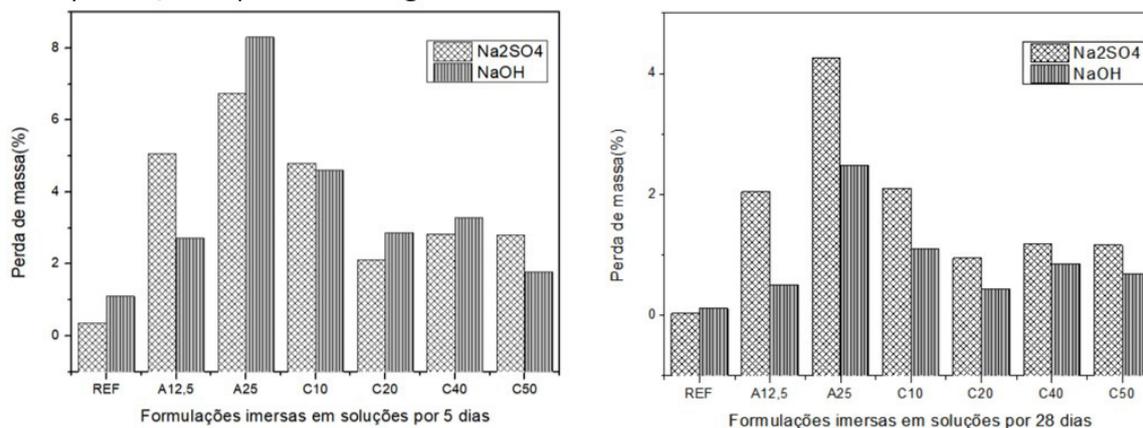


Figura 10. Durabilidade das argamassas imersas em soluções de Na₂SO₄ e NaOH durante 5 dias e 28 dias

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS:

O presente trabalho teve o propósito principal de produzir argamassas de reboco que incorporem resíduos de gesso reciclado, ao mesmo tempo em que avaliava minuciosamente as características tanto dos materiais empregados quanto das argamassas produzidas em diferentes estágios, ou seja, desde o estado fresco até o endurecido.

Em relação às argamassas em seu estado fresco pode-se concluir que: a incorporação do resíduo de gesso em substituição parcial da areia e do cimento em suas menores proporções inicialmente aumenta o índice de consistência da argamassa. Porém, quando o percentual de substituição aumenta, a consistência tem uma queda, não significativa, sendo necessária uma maior hidratação. A argamassa com menor teor de resíduo de gesso incorporado à mistura apresentou uma maior redução da massa específica aparente, quando comparada às demais formulações.

Em relação às argamassas em seu estado endurecido pode-se constatar que:

A maioria das formulações apresentou um ganho de resistência a compressão em relação à formulação de referência, exceto a formulação A25, com incorporação de 25% de resíduo de gesso em substituição parcial à areia, porém a variação não foi tão significativa.

Quanto à absorção de água, as argamassas com incorporação de resíduo de gesso apresentaram aumento significativo em relação à formulação de referência. As argamassas produzidas com substituição da areia pelo resíduo de gesso apresentaram redução da massa específica real, diferentemente das argamassas produzidas em substituição de cimento Portland.

A viabilidade da produção de argamassa com substituição parcial do cimento pelo resíduo de gesso em 10%, 20%, 40% e 50% se mostrou uma alternativa sustentável, visto que é uma opção para a destinação adequada dos resíduos. Adicionalmente, pode ser uma opção sustentável para produção de argamassa de reboco para ambientes internos.

FUNDO DE FINANCIAMENTO:

Esse trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa (FAPITEC) Edital 06/2022, PIBIC <https://fapitec.se.gov.br/>

REFERÊNCIAS:

- [1] Santos E B F D, 2019. Avaliação do desempenho de argamassas de revestimento com emprego de resíduos da construção civil. Apucarana: Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/5461>

- [2] Abrecon, 2023. A gestão dos resíduos da construção e demolição e o papel do engenheiro. Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção. <https://abrecon.org.br/a-gestao-dos-residuos-da-construcao-e-demolicao-e-o-papel-do-engenheiro/>
- [3] Santana I C, 2016. Análise dos impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos de construção e demolição em Conceição do Almeida, BA. Cruz das Almas: Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.
- [4] Cipriano P B, Galdino T S G, Santos Sá C, Ferraz A V, 2021. Avaliação dos parâmetros de calcinação do resíduo de gesso nas propriedades do gesso reciclado. *Matéria* 26, 3, 2. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13026>
- [5] FGV, 2023. Avanços e desafios rumo à promoção do trabalho decente: Análise situacional. Fundação Getúlio Vargas. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---americas/---ro-lima/---ilo-brasilia/documents/publication/wcms_817898.pdf
- [6] Brasil, 2017. Anuário mineral estadual. Pernambuco: Departamento Nacional de Produção Mineral. <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-estadual>
- [7] Ahmed A, Ugai K, Kamei T, 2011. Investigation of recycled gypsum in conjunction with waste plastic trays for ground improvement. *Construction and Building Materials* 25, 1, 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.036>
- [8] Sindusgesso, 2011. Polo Gesseiro. Força para o gesso de Pernambuco. Sindicato das Indústrias de Extração e Beneficiamento de Gipsita, Calcários, Derivados de Gesso e de Minerais Não-Metálicos do estado de Pernambuco.
- [9] Grassi, J T, 2018. Análise das propriedades termo acústicas de blocos de gesso reciclado fabricados a partir de gesso pós-consumo: Uma revisão da literatura. Curitiba: Especialização em Construções Sustentáveis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- [10] Brasil, 2002. Resolução CONAMA n° 307. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.
- [11] Lapa J S, 2011. Estudo de viabilidade técnica de utilização em argamassas do resíduo de construção oriundo do próprio canteiro de obra. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [12] Kochen K, 2016. Potencialidades de logística reversa do resíduo de gesso da indústria da construção civil. Medianeira: Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- [13] ABNT NBR 13281, 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [14] Santos B Y, 2018. Incorporação de gesso acartonado proveniente da placa de drywall em argamassa de revestimento. Maringá: UNICESUMAR.
- [15] Brun F G, 2018. Influências da substituição de agregado miúdo natural por resíduos de bloco cerâmico e gesso nas propriedades físico-mecânicas de argamassas. UNIJUI.
- [16] ABNT NBR 7215, 2019. Cimento Portland. Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [17] ABNT NBR 13276, 2016. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [18] ABNT NBR 9833, 2009. Concreto fresco. Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [19] ABNT NBR 7215, 2019. Cimento Portland. Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [20] ABNT NBR 9778, 2009. Argamassa e concreto endurecidos. Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [21] ABNT NBR 13554, 2012. Solo-cimento. Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [22] ASTM C 1012-04, 2009. Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution. ASTM International.
- [23] ABNT NBR 16606, 2018. Cimento Portland. Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [24] ABNT NBR 7215, 2019. Cimento Portland. Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [25] ABNT NBR 16605, 2017. Cimento Portland e outros materiais em pó. Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [26] Oliveira A I, 2022. Uso da cal em substituição da cal hidratada em argamassas mistas de revestimento. Pelotas: Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Pelotas. <http://guaiaca.ufpel.edu.br/handle/prefix/8577>
- [27] Silva F F, Silva Fiuza G F, Souza Bandeira L H S, Costa Gomes G J, 2018. Estudo da influência de cal hidratada na permeabilidade do concreto. *Teccen* 11, 1, 02-09. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1211>
- [28] ABNT NBR 7211, 2022. Agregados para concreto. Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [29] Qiang A N, Pan H, 2022. Strength development and microstructure of recycled gypsum-soda residue-GGBS based geopolymer. *Construction and Building Materials* 331, 127-312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127312>
- [30] Wu J, Liu L, Deng Y, Zhang G, Zhou A, Xiao H, 2022. Use of recycled gypsum in the cement-based stabilization of very soft clays and its micro-mechanism. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 14, 3, 909-921. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.10.002>
- [31] ABNT NBR NM 52, 2009. Agregado miúdo. Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

- [32] Antunes M L P, Sá A, Oliveira P S, Rangel E C, 2019. Utilization of gypsum from construction and demolition waste in Portland cement mortar. *Cerâmica* 65 1-6. <https://doi.org/10.1590/0366-6913201965S12588>
- [33] Taylor H F W, 1998. *Cement chemistry*. 2 ed. London: Thomas Telford.
- [34] Skalny J, Johansen V, Thaulow E A, Palomo N, 1996. Una forma de ataque por sulfatos. *Materiales de Construcción* 46, 244. <https://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc>
- [35] Ai Qin W, Chengzhi Z, Ningsheng Z, 1997. Study of the influence of the particle size distribution on the properties of cement. *Cement Concrete Research* 685-695. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00060-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00060-4)
- [36] Esan, M T. Review of gypsum reinforced composites as building materials. *Discover Civil Engineering*, v. 1, n. 1, p. 1-25, 2024. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00005-x>
- [37] Bumanis, G., Zorica, J., Korjamins, A., & Bajare, D. (2022). Processing of gypsum construction and demolition waste and properties of secondary gypsum binder. *Recycling*, 7(3), 30. <https://doi.org/10.3390/recycling7030030>
- [38] P. B Cipriano., T. S. G., C. S Galdino, Sá, A. D. V & Ferraz, Avaliação dos parâmetros de calcinação do resíduo de gesso nas propriedades do gesso reciclado. *Matéria* (Rio de Janeiro), 26, 2021.