

Desenvolvimento e caracterização de argamassa sustentável com reaproveitamento de resíduo de gesso

Development and characterization of sustainable mortar with reuse of gypsum waste

Camila Silva Santos¹, Cochiran Pereira dos Santos², Fernanda Martins Cavalcante de Melo³, Vanessa Gentil de Oliveira Almeida⁴, Herbet Alves Oliveira⁵

RESUMO: O gesso é um material amplamente utilizado na construção civil, mas seu uso inadequado gera resíduos, contribuindo para problemas ambientais. Na indústria cimenteira, o gesso atua como retardante da pega do cimento, já no setor agrícola, o gesso é utilizado para corrigir a acidez do solo e melhorar suas propriedades. Em relação à indústria de transformação do gesso, seus resíduos podem ser parcialmente reincorporados aos processos de produção. Este estudo objetivou produzir argamassas de reboco com reaproveitamento de resíduos de gesso. Foram definidos sete traços a partir da referência na proporção em volume 1:5:2 (cimento, agregado miúdo e cal), sem gesso e três traços com substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de gesso em 10%, 20% e 30%, e três traços com substituição parcial de cimento por resíduos de gesso em 5%, 10% e 20%, respectivamente. As argamassas produzidas foram analisadas quanto às suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido. Os resultados obtidos foram analisados através da análise de variância e apontaram que o gesso pode substituir o agregado miúdo em até 10%, sem prejuízo das propriedades, reduzindo assim, o impacto ambiental causado pelo seu descarte irregular, além de fornecer uma nova opção de reciclagem.

Palavras-chave: Construção civil; Gerenciamento; Reciclagem.

ABSTRACT: Gypsum is a widely used material in civil construction, but its improper use generates waste, contributing to environmental problems. In the cement industry, gypsum acts as a retardant for cement setting, while in the agricultural sector, gypsum is used to correct soil acidity and improve its properties. Regarding the gypsum processing industry, its waste can be partially reincorporated into production processes. This study aimed to produce plaster mortars using gypsum waste. Seven mixes were defined based on the reference in a volume ratio of 1:5:2 (cement, fine aggregate, and lime), without gypsum, and three mixes with partial replacement of fine aggregate by gypsum waste at 10%, 20%, and 30%, and three mixes with partial replacement of cement by gypsum waste at 5%, 10%, and 20%, respectively. The produced mortars were analyzed for their properties in the fresh and hardened states. The results obtained were analyzed using analysis of variance and indicated that gypsum can replace fine aggregate by up to 10%, without compromising its properties, thus reducing the environmental impact caused by its improper disposal, in addition to providing a new recycling option.

Keywords: Civil construction; Management; Recycling.

Autor correspondente: Herbet Alves de Oliveira

E-mail: heretalves148@gmail.com

Recebido em: 2025-11-30

Aceito em: 2025-12-02

¹ Graduada em Engenharia Civil pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe (IFS), Estância (SE), Brasil.

² Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Sergipe (UFS). Professor Externo - Stricto Sensu do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e Docente Interno do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da UFS, São Cristóvão (SE), Brasil.

³ Mestra em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Sergipe (UFS). Professora Efetiva do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe (IFS), Estância (SE), Brasil.

⁴ Doutoranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe (IFS), Estância (SE), Brasil.

⁵ Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Sergipe (UFS). Professor e pesquisador efetivo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe (IFS), Estância (SE), Brasil.



1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um setor que consome uma grande quantidade de recursos naturais, como argila e calcário, utilizados na produção de cimento, além de areia e brita, extraídas de rochas feldspáticas, empregadas na produção de argamassas e concreto. Esses materiais são responsáveis por uma significativa geração de resíduos, especialmente em países como o Brasil, onde muitos processos construtivos ainda são executados de forma manual (Leal, 2021; Masuero, 2021).

O reaproveitamento de resíduos tem ganhado destaque, especialmente no contexto da sustentabilidade, onde a preocupação central é o aprimoramento de tecnologias que visem reduzir a exploração de recursos naturais como areia, argila e rochas utilizadas na produção de brita (Al-Fakih, 2019). Apesar das inúmeras pesquisas realizadas ao redor do mundo, apenas uma pequena parcela dos resíduos tem sido efetivamente reaproveitada (Brasil, 2002; Brasil, 2010; Bundhoo, 2018).

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021 (Lira *et al.*, 2021), os municípios brasileiros coletaram cerca de 47 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD). Isso equivale a uma média de 221,2 kg de resíduos por habitante ao ano. No entanto, apenas 59,1% desses resíduos são destinados a aterros sanitários adequados (Brasil, 2021), o que evidencia a necessidade de melhorias na gestão e destinação dos resíduos gerados pelo setor da construção.

A falta de sustentabilidade ambiental resultante das atividades antrópicas, representa um dos problemas mais significativos em escala global. Para enfrentar essas preocupações, a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável foi estabelecida em Nova Iorque em 2015. Nesta iniciativa, os membros da Organização das Nações Unidas (ONU, 2024) e as principais Organizações Não Governamentais (ONGs) comprometeram-se a implementar metas voltadas para a promoção do desenvolvimento sustentável, mediante a uma agenda abrangente, composta por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas específicas, que têm como objetivo garantir uma vida mais sustentável nos âmbitos econômico, social e ambiental. Esses objetivos visam promover o bem-estar das pessoas, proteger o meio ambiente e fortalecer a cooperação global para um desenvolvimento equilibrado e inclusivo (Tothova; Heglasova, 2022).

Esta pesquisa alinhou-se com alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), tais como o 11, que trata de cidades e comunidades sustentáveis; o 12, que aborda o consumo e a produção responsáveis; o 13, focado em ações contra as mudanças climáticas; e o 15º, que visa à preservação da vida terrestre. Esses objetivos buscam promover práticas mais sustentáveis e conscientes para minimizar os impactos ambientais e sociais, contribuindo para o equilíbrio ecológico e a sustentabilidade global (ONU, 2024). Para alcançar seus objetivos, a indústria da construção civil enfrenta o desafio de aprimorar seus processos produtivos, de forma a reduzir a geração de resíduos. Isso inclui otimizar o uso de materiais, implementar técnicas mais eficientes e adotar tecnologias inovadoras. Além de reduzir os custos de produção, essas medidas são essenciais para mitigar o descarte inadequado de resíduos como o de gesso gerado na construção civil e, consequentemente, diminuir o impacto ambiental do setor, promovendo práticas mais sustentáveis e responsáveis.

A geração de resíduos de gesso ocorre principalmente quando ele é aplicado manualmente como revestimento sobre alvenaria. Além disso, os resíduos gerados no canteiro de obras geralmente estão contaminados com metais (pregos, perfis), madeira e tinta, o que dificulta seu reaproveitamento (Campanolo, 2002; Rosseto, 2016).

Estima-se que, de acordo com o Sindicato da Indústria do Gesso do Estado de Pernambuco (SINDUGESSO, 2019), cerca de 5% do gesso acartonado, 4% dos pré-moldados e 35% do gesso aplicado como revestimento em alvenaria acabam se transformando em resíduos durante o processo construtivo. No cenário mundial, segundo Oliveira (2019), a produção anual de gesso gira em torno de 125 milhões de toneladas, sendo que o Brasil contribui com cerca de 2 milhões de toneladas. De acordo com Nunes e Mahle (2020), cerca de 8% dos resíduos de gesso coletados anualmente são destinados a usinas de reciclagem ou aterros inertes.

Após a reciclagem, o gesso se torna uma opção sustentável para o reuso, especialmente na agricultura. Ele é utilizado na recuperação de solos sódicos (Laadila, 2021) e como fertilizante, devido ao seu conteúdo de enxofre e cálcio, elementos essenciais para o desenvolvimento de plantas (Gonçalves, 2022). Na construção civil, o gesso reciclado tem sido aplicado em revestimentos de paredes e tetos, na produção de blocos e telhas cerâmicas, além de ser incorporado na fabricação de materiais cimentícios, como argamassa de assentamento e revestimento, substituindo parcialmente o cimento ou o agregado miúdo (Zhixin, 2016).

Com a finalidade de avaliar o comportamento e a influência das propriedades físicas e mecânicas das argamassas de reboco com incorporação de resíduo de gesso, pesquisas têm sido realizadas. O gesso reciclado seco ao ar, pode ser reaproveitado em argamassa substituindo o agregado miúdo até 10% sem prejuízo das propriedades (Siqueira, 2024).

Thymotie *et al.* (2019) estudaram a incorporação de resíduo de gesso na neutralização de gases sulfurosos de combustão em um forno, o qual foi calcinado a 150°C retomando suas propriedades aglomerantes. O gesso substituiu com 3%, 5% e 10% em peso, as cinzas volantes utilizadas como componente em um concreto. Foram realizados trabalhos experimentais, incluindo testes de trabalhabilidade, tempo de pega e resistência à compressão. A trabalhabilidade das pastas misturadas no estado fresco diminuiu com o aumento da quantidade de gesso calcinado, enquanto a resistência à compressão melhorou. Verificou-se que uma menor quantidade de gesso calcinado a 3% é mais eficaz no aumento da resistência nas idades iniciais, enquanto uma maior quantidade do resíduo, a 10%, obteve mais efeito no aumento na resistência em idades avançadas. O gesso calcinado aumentou o composto sulfato na mistura e por sua vez elevou a formação de etringita que favoreceu o aumento da resistência.

Portanto, fundamentado nessas pesquisas, o objetivo deste trabalho visou explorar o potencial de reaproveitamento do gesso reciclado na forma calcinada a 150 °C para ser reutilizado de forma eficaz em argamassas de reboco, contribuindo para práticas construtivas mais sustentáveis e mitigando o impacto ambiental do descarte de resíduos de gesso.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Essa pesquisa objetivou a produção de argamassa de reboco com a incorporação de resíduo de gesso calcinado que atenda aos requisitos da norma NBR 13281 (ABNT, 2023) como: densidade no estado fresco maior do que 1.800 kg/m³, densidade no estado curado após 28 dias maior do que 2.000 kg/cm³ e resistência a compressão maior do que 5 MPa. O tipo da pesquisa foi de abordagem quantitativa, visto que foram produzidos corpos de prova de argamassas. A pesquisa foi de natureza aplicada, com objetivos exploratórios pois a meta foi conhecer as propriedades do gesso reciclado incorporado à argamassa de reboco.

2.1 PREPARAÇÃO DAS MATÉRIAS- PRIMAS PARA CARACTERIZAÇÃO

Os materiais utilizados para produção das argamassas foram caracterizados no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Sergipe (IFS), Campus Estância e no Laboratório de Física da Universidade Federal de Sergipe (UFS), Campus São Cristóvão.

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland composto com fíler e classe de resistência à compressão de 32 MPa (CP II F 32), submetido aos seguintes ensaios de caracterização: índice de finura - NBR 11579 (ABNT, 2013), consistência normal - NBR 16606 (ABNT, 2018a), ponto de pega - NBR 16607 (ABNT, 2018b), massa específica - NBR 16605 (ABNT, 2017) e resistência à compressão - NBR 7215 (ABNT, 2019).

O agregado miúdo e cal utilizado na produção da argamassa foi proveniente do município de Estância - SE. A areia foi seca em estufa a 100 ± 5 °C e peneirada na peneira nº 12 (1,18 mm). Antes de seu uso, o agregado miúdo foi submetido a ensaios de caracterização de suas propriedades, conforme as normas descritas. Para a composição química realizou-se a análise de fluorescência de raios-X (FRX), assim como a composição granulométrica e massa unitária de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2011), e massa específica aparente de acordo com NBR 7185 (ABNT, 2016).

A água utilizada na produção da argamassa foi proveniente do sistema de abastecimento público do município de Estância - SE, fornecida pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE). Esta água atende aos requisitos estabelecidos pela NBR 15900-1 (ABNT, 2009a), que especifica os critérios para sua adequação no preparo de pastas cimentícias.

O resíduo de gesso utilizado foi obtido a partir do descarte de uma empresa especializada na fabricação de placas para forros residenciais. Esse material foi coletado, moído em almofariz, seco em estufa a uma temperatura de 160 ± 5 °C e, em seguida, processado em um moinho de bola para gerar grãos menores. Para sua aplicação na produção da argamassa, o resíduo foi peneirado em uma peneira nº 40 (0,295 mm). A caracterização do resíduo foi realizada através de ensaios de análise térmica gravimétrica (DTG), difratometria de raios X (DRX), além de avaliações da massa específica aparente e real.

2.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Com o objetivo de determinar a composição química das matérias-primas, os óxidos constituintes das amostras foram analisados por meio de pesquisa semiquantitativa utilizando a técnica de FRX. As análises foram realizadas a vácuo, em um equipamento *Bruker*, modelo S4 *Pioneer*. As amostras, com massa aproximada de 10 g, foram prensadas em corpos cilíndricos de 20 mm de diâmetro e cerca de 3 mm de espessura.

Para a DRX, foi utilizada para identificar as fases cristalinas do resíduo de gesso, de acordo com os padrões obtidos no banco de dados do *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) e analisados pelo software *Match!*, versão demo. Para a realização desse método, foi necessário que o resíduo de gesso fosse seco em estufa a uma temperatura de 160 ± 5 °C por 24 h e, posteriormente, peneirado em uma peneira de abertura nº 100 (0,177 mm). Para realização do ensaio, foi usado um equipamento D8- *Advance Bruker*, com radiação CuK α_1 ($\lambda = 1,5418$ Å), em modo de varredura contínua, em intervalo angular de 5 a 70° (2θ), com velocidade de varredura de 1°/min.

Os eventos térmicos apresentados pela amostra no intervalo de temperaturas 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 medidas em cadrinho de platina, sob fluxo de ar sintético com vazão de 100 mL/min e taxa de aquecimento de 10 °C/min.

2.3 Preparação das formulações de argamassas

Para avaliação das propriedades das argamassas foram produzidas sete formulações, a partir do traço 1:2:5 (cimento, cal e areia), uma formulação de referência, denominada STD, sem incorporação de resíduo de gesso, três formulações denominadas A₁₀, A₂₀ e A₃₀, com substituição parcial da areia pelo resíduo, em 10%, 20% e 30%, respectivamente, e três formulações denominadas C₅, C₁₀ e C₂₀ com substituição parcial do cimento por resíduo, em 5%, 10% e 20%, respectivamente, apresentadas na Tabela 1. A relação água cimento (a/c) foi definida de modo a manter a abertura da consistência entre 200 a 210 mm. As formulações das argamassas expressas em massa estão representadas. Em cada formulação é apresentada a massa utilizada para a confecção de 6 corpos de prova ou 1.200 cm³.

Tabela 1. Formulações de massa

| Matéria-prima | STD | A ₁₀ | A ₂₀ | A ₃₀ | C ₅ | C ₁₀ | C ₂₀ |
|---------------|---------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Cimento | 205,97 | 205,97 | 205,97 | 205,97 | 195,67 | 185,37 | 164,78 |
| Areia | 1730,15 | 1557,13 | 1384,12 | 1211,11 | 1730,15 | 1730,15 | 1730,15 |
| CaO | 224,92 | 224,92 | 224,92 | 224,92 | 224,92 | 224,92 | 224,92 |
| Gesso | 0 | 173,02 | 346,03 | 519,01 | 10,3 | 20,6 | 41,19 |
| Água | 339,86 | 463,43 | 587,01 | 741,49 | 322,85 | 305,86 | 271,89 |

Os materiais utilizados na preparação da argamassa foram devidamente pesados em balanças eletrônicas com precisão de 0,01 g e homogeneizados por meio da utilização de um misturador mecânico de eixo vertical (argamassadeira) com capacidade de 5 litros, da marca Edutec. O processo de adição dos materiais e tempo de mistura das argamassas seguiram os procedimentos descritos na NBR 7215 (ABNT, 2019).

2.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

O ensaio foi realizado para todas as formulações, em concordância com a NBR 13276 (ABNT, 2016). Seu princípio consiste em medir o espalhamento da argamassa confinada em um recipiente que após ser submetida a 30 golpes na mesa de consistência (*flow table*), ocorre seu espalhamento de acordo com sua fluidez.

O ensaio de massa específica aparente da argamassa foi realizado em conformidade à NBR 9833 (ABNT, 2009), que determina a massa específica do concreto fresco, e foi calculada por meio da Equação 1.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} \times 1000 \quad (1)$$

Em que ρ_{ap} é a massa específica aparente do concreto, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3); m é a massa de concreto, expressa em quilogramas (kg); e V é o volume do recipiente, expresso em decímetros cúbicos (dm^3).

2.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Para a realização dos testes das amostras no estado endurecido, foram moldados dez corpos de prova cilíndricos de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro para cada formulação, dos quais, 5 para resistência à compressão e 5 para massa específica, absorção de água e durabilidade. Os corpos de prova foram moldados em 4 camadas com 30 golpes, por camada, (Figura 1), com a utilização de soquete metálico, e permaneceram nas fôrmas cilíndricas por 24 h. Após 1 dia foram desmoldados e submetidos à cura úmida por 28 dias.



Figura 1. Processo produtivo das argamassas

A resistência à compressão foi avaliada nas argamassas estudadas consoante às recomendações da NBR 7215 (ABNT, 2019), que apresenta diretrizes para determinação da resistência à compressão de corpos de provas cilíndricos. As rupturas dos corpos de prova foram realizadas aos 28 dias, na prensa hidráulica *Pavitest HD-200T*. Para o cálculo da resistência à compressão, foi utilizada a Equação 2.

$$R = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Em que R é a resistência expressa em Mega Pascal (MPa); F é a força aplicada em Newton (N); e A é a área em milímetros quadrados (mm^2).

O ensaio para determinação da massa específica real das argamassas foi realizado de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 9778 (ABNT, 2009b), calculado por meio da Equação 3.

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (3)$$

Em que ρ_r é a massa específica real, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3); m_s é a massa da amostra seca em estufa; e m_i é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

O ensaio de absorção de água da argamassa foi realizado por meio de uma adaptação da NBR 9778 (ABNT, 2009b), que determina os procedimentos para o ensaio de absorção de água. Após 28 dias de cura, três amostras de cada formulação foram colocadas em estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, por período de 72 horas. Posteriormente, foram submersas em água à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, em seguida foram progressivamente levadas à ebulação, por um período de 3 horas. Após a ebulação, as amostras foram resfriadas e determinada sua massa submersa e a massa saturada utilizando o método de arquimedes. A absorção de água é calculada por meio da Equação 4.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (4)$$

Em que A é a absorção de água, em porcentagem (%); m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após a imersão e fervura; m_s é a massa da amostra seca em estufa.

Para determinação da durabilidade, foi avaliada a perda de massa dos corpos de prova após imersão em solução $\text{Na}_2\text{SO}_4 5\%$ após 1 e 7 dias. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram curados por 28 dias em água. Em seguida, os corpos de prova foram secos em estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24 horas e imergidos em solução de sulfato de sódio.

As faces dos corpos de prova receberam 4 escovações, sendo duas na horizontal e duas 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 NBR 13553 (ABNT,

2012), que recomenda a escovação dos corpos de prova. O cálculo da durabilidade foi realizado por meio da perda de massa, conforme a Equação 5.

$$Pm (\%) = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad (5)$$

Em que P_i é o peso inicial seco do corpo de prova, em gramas (g); e P_f é o peso final seco após a escovação do corpo de prova, em gramas (g).

Os resultados médios e os desvios padrões obtidos dos ensaios de laboratório foram analisados por meio do método estatístico de Análise de Variância (ANOVA) *one way*. A análise foi realizada por meio do programa *Excel* da Microsoft, versão 2019 e o programa *Past*.

A análise de variância objetivou comparar a variação resultante de fontes específicas com a variação entre os indivíduos que deveriam ser semelhantes. A constatação da significância de uma determinada variável ou grupo de variáveis sobre uma variável dependente é constatada por meio da comparação entre um valor calculado ($F_{calculado}$) e os valores tabelados ($F_{tabelado}$) (distribuição de probabilidades de Fischer). Para que a influência seja considerada significativa, o $F_{calculado}$ deve ser maior que o valor de $F_{tabelado}$ (Walpole, 2009).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos dos ensaios de caracterização do cimento CP II F-32 são apresentados. Com relação à consistência, os resultados atenderam ao padrão usual (220 ± 1 mm, e o tempo de pega atendeu as expectativas, ou seja, o tempo mínimo de 60 minutos, conforme a NBR 16607 (ABNT, 2018b). A resistência mecânica apresentou resultados de acordo com a norma aos 3 e 7 dias, 11 e 21 MPa enquanto a massa específica ficou dentro dos padrões 3,12 g/cm³. Na Figura 2 é apresentado o difratograma de raios-X do resíduo de gesso e o DTG.

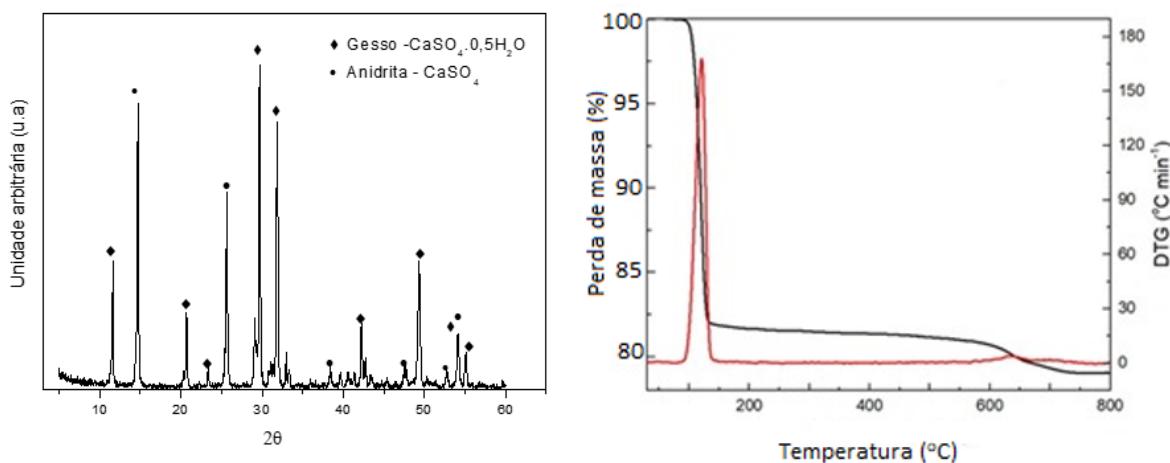


Figura 2. Caracterização do resíduo de gesso: (a) DRX do resíduo de gesso; (b) DTG do resíduo de gesso.

O difratograma de raios-X do resíduo de gesso seco em estufa (Figura 2a) é constituído pelo mineral anidrita, seguido do gesso mono hidratado, conforme composição observada por outros autores (Lamaria, 2023; Cipriano, 2021). Em relação ao DTG do gesso apresentado na Figura 2b, foi observado um pico exotérmico em aproximadamente 140 °C referente à perda de cerca de 17% de água estrutural do gesso. Adicionalmente, essa perda evidenciada faz com que o gesso ganhe novamente suas propriedades aglomerantes conforme observado por (Geraldo, 2017).

Em relação aos resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo, cal e gesso, esses estão apresentados na Tabela 2, e estão de acordo com (Del Rio, 2022 e Reginato, 2023).

Tabela 2. Caracterização das matérias-primas (%) passante

| Análise | Gesso | Areia | CaO |
|-------------------------------------|--------|-------|-------|
| > 60 µm | 0,0 | 20,0 | 0,00 |
| 2-60 µm | 100,00 | 80,0 | 100,0 |
| < 2 µm | 0,0 | 0,00 | 0,00 |
| Dens real (g.cm ⁻³) | 2,25 | 2,53 | 2,28 |
| Dens aparente (g.cm ⁻³) | 1,10 | 2,65 | 0,63 |

Com relação à granulometria, o gesso foi passado na peneira de malha nº 40 (0,42mm), e apresenta-se mais fino do que o agregado miúdo, conforme apresentado na Tabela 3, em que 100% das partículas estão entre 2-60 µm, enquanto o agregado miúdo somente 80% da amostra está nessa faixa.

De acordo com a Tabela 3, pode-se observar que o resíduo de gesso é composto por óxido sulfúrico (70,11%) e óxido de cálcio (23,22%), elementos, normalmente presentes no cimento que garantem a formação da etringita e sulfo aluminatos (Borges, 2021). Já o agregado miúdo apresenta basicamente SiO₂, o qual atua como carga o material e enchimento, e a cal, constituida basicamente por CaO.H₂O e tem ação aglomerante e estão de acordo com outros trabalhos (Ann, 2022; Del Rio, 2022). O resíduo de gesso foi então previamente calcinado para utilização, ganhando novamente suas propriedades aglomerantes podendo ajudar na trabalhabilidade das argamassas.

Os resultados médios dos índices de consistência obtidos nos ensaios realizados nas argamassas ficaram entre 200 e 210 cm. Foi realizada a análise de variância e teste Tukey para os resultados dos índices de consistência das argamassas. Os resultados mostraram que existe uma diferença entre as médias $F = 12,61$; $f_{\text{crítico}} = 2,85$ e valor-p = $6,06403E^{-05}$.

Observou-se também, que ao aumentar a porcentagem de resíduo de gesso na argamassa em substituição ao agregado miúdo, seu índice de consistência diminui, A₁₀(5%) e A₂₀(10%) em relação ao de referência (STD). Essa redução está atribuída ao fato de o gesso ter sido seco em estufa a temperatura de 150 ± 5 °C, ao passar pelo processo de calcinação, com a perda de uma molécula de água e adquirindo novamente suas características ligantes naturais (Ferreira, 2017). Já Silva (2014) discorre que a consistência é influenciada pelo teor de finos, uma vez que aumenta a compacidade da pasta da argamassa. Por sua vez, pode-se afirmar que as argamassas produzidas com a

substituição do agregado miúdo pelo resíduo de gesso, houve uma demanda maior de hidratação, logo o aumento do índice de consistência da formulação A₃₀ está atribuído a esse fator. Adicionalmente, a substituição do gesso pelo cimento não apresentou variação na consistência, pois o gesso apresenta propriedades aglomerantes como o cimento, também verificado por (Silva, 2014).

Tabela 3. Composição química

| Óxidos | Gesso | Areia | CaO |
|--------------------------------|-------|-------|-------|
| CaO | 23,22 | 1,17 | 59,14 |
| SiO ₂ | 1,07 | 97,87 | 2,04 |
| Al ₂ O ₃ | 0,23 | 0,17 | 0,7 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,30 | 0,29 | 0,15 |
| SO ₃ | 70,11 | 0,23 | 0,51 |
| MgO | 0,23 | 0,10 | 0,36 |
| K ₂ O | 0,10 | 5,01 | 0,11 |
| PF | 5,01 | 5,01 | 37,62 |
| Total | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

Os ensaios realizados para determinar a massa específica aparente das argamassas no estado fresco apresentaram resultados médios consistentes, variando de 2,02 a 2,03 g/cm³. Esses valores estão em conformidade com os obtidos por Ann (2022), não indicando variações significativas entre as amostras analisadas.

A resistência à compressão esta apresentada na Figura 3a. As formulações foram comparadas por meio de análise de variância ($F = 8,14$; $F_{\text{crítico}} = 2,92$; $p = 8,44 \times 10^{-4}$) e teste de Tukey. Observou-se uma redução na resistência à compressão com a substituição do agregado miúdo por gesso, especialmente nas formulações A10 (5%), A20 (17%) e A30 (50%). Esse comportamento pode ser atribuído à redução do fator de empacotamento, causada pelo excesso de partículas finas, o que compromete a resistência mecânica (Ferreira, 2017).

Por outro lado, a substituição parcial do cimento por gesso resultou em um aumento na resistência para C5 (18%), seguido por uma redução quando maiores quantidades de gesso foram utilizadas. De acordo com Hirsch (2023), o gesso (CaSO₄) pode reagir com o CaO livre presente no cimento, formando Ca(OH)₂, que, por sua vez, reage com aluminatos para produzir etringita, aumentando a resistência. Entretanto, quando o CaO livre já foi consumido, o excesso de gesso passa a reduzir a resistência, devido à falta de reações secundárias que contribuem para o ganho de propriedades mecânicas.

Os resultados médios da absorção de água obtidos pelos ensaios realizados com as argamassas estão apresentados na (Figura 3b), e foram analisados por meio de análise de variância no ANOVA e método Tukey, em que foi possível observar que existe uma diferença significativa entre as médias ($F = 43,14$; $f_{\text{crítico}} = 2,85$ e valor-P = 3,07E⁻⁰⁸).

Foi observado que, na substituição do agregado miúdo pelo gesso, a resistência diminuiu e a absorção de água aumentou A₁₀ (4%), A₂₀(66%) e A₃₀(280%). Por sua vez, quando o cimento foi substituído pelo gesso nas formulações, a absorção de água apresentou-se similar a (STD) em C₅ e C₁₀ e aumentou em C₂₀ (66%). O gesso favorece a redução do empacotamento, aumentando a porosidade da pasta de cimento e a absorção de água conforme observado por (Hirsh, 2023).

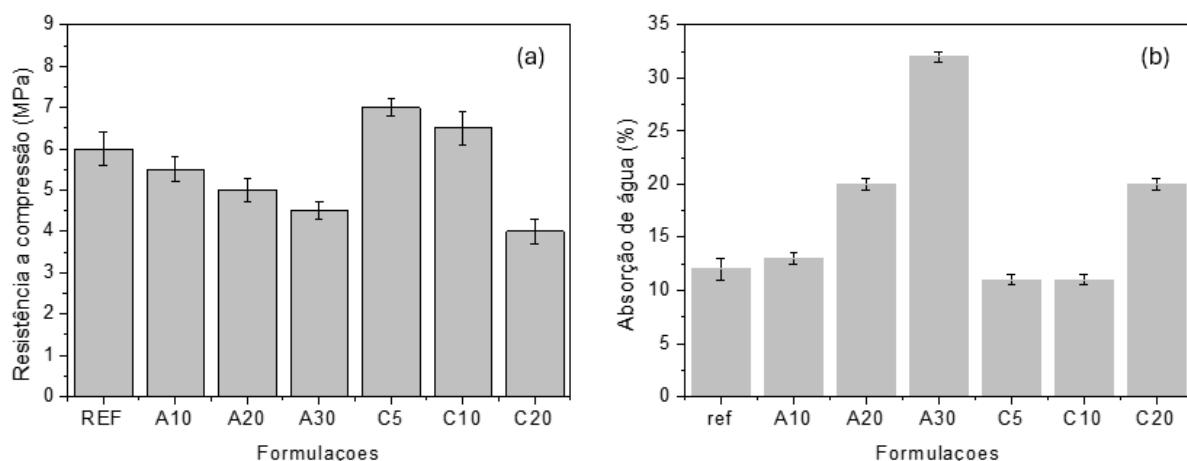


Figura 3. Resultados de resistência à compreensão e absorção em água: (a) resistência à compreensão aos 28 dias; (b) absorção de água.

Os resultados da durabilidade determinados por perda de massa estão apresentados na Figura 4. Pode-se observar que as formulações nas quais o resíduo de gesso substituiu o cimento, C₁₀ e C₂₀, foram as que apresentaram menor perda de massa entre o primeiro e o sétimo dia de exposição na solução agressiva. Isso pode ser explicado, pois o Na₂SO₄, tende a reagir com a etringita e aluminatos presentes no cimento promovendo o desgaste. À medida que ocorreu a substituição do cimento pelo gesso, os compostos como etringita e CaO livre, presentes no cimento, diminuíram e favoreceram a redução da perda de massa (Hirsch, 2023).

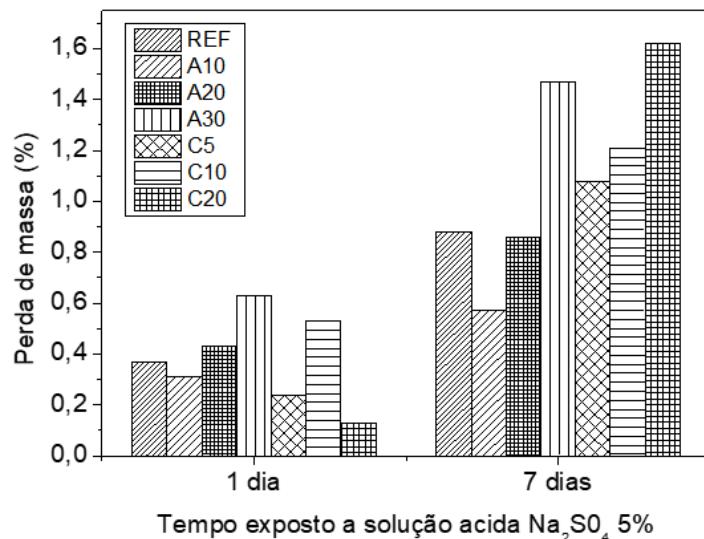


Figura 4. Perda de massa dos corpos de prova

Em geral, o ataque por sulfatos incide sobre o aluminato tricálcico do cimento hidratado 3CaO.Al₂O₃ (designação simplificada C3A). Outros autores afirmam ainda, que as soluções de Na₂SO₄ podem reagir com o aluminato tricálcico do cimento hidratado ou com a alumina do agregado, causando expansões, fissuração, descamação e desintegração, enquanto o gesso apenas reage com o aluminato de cálcio hidratado para formar sulfo aluminato de cálcio (Rojas, 2020).

4 CONCLUSÃO

Dante da análise dos resultados, em que nas argamassas foi incorporado o resíduo de gesso calcinado em substituição ao cimento e ao agregado miúdo, conclui-se:

(I) em seu estado fresco, a incorporação do resíduo de gesso calcinado em substituição da areia, influência de forma moderada na consistência e praticamente não há influência, quando esse substitui o cimento, porque o gesso apresenta propriedades aglomerantes.

(II) No que diz respeito às argamassas em seu estado endurecido, constatou-se queda na resistência mecânica quando o agregado miúdo foi substituído pelo resíduo de gesso. Observou-se que a presença de gesso, devido à sua granulometria mais fina, aumenta a demanda por água, o que contribui para a redução da resistência mecânica. Por sua vez, ao substituir o cimento pelo resíduo de gesso, foi observado aumento na resistência mecânica de até 10% de 2,7 MPa para 3,2 MPa em C₁₀. O fato pode ser explicado pois o gesso apresenta o CaSO_{4,0,5} H₂O que reagiu com o CaO livre do cimento, aumentando a etringita. Para substituições maiores, o sulfato fica em excesso diminuindo a resistência e, consequentemente, aumentou a absorção de água.

(III) Com relação à durabilidade, os corpos de prova expostos durante um dia na solução de sulfato de sódio não foram conclusivos. Por sua vez, os corpos de prova expostos após sete dias, apresentaram durabilidade inferior à referência, exceto A₁₀, quando substituiu 10% do agregado miúdo pelo gesso. Concluiu-se que quanto maior a presença do cimento favorece a reações com água formando sulfatos, favorecendo o desgaste, e o acréscimo do agregado miúdo favorece a formação de poros em função da dificuldade de compactação.

É necessário identificar as características técnicas mais adequadas para a execução de uma edificação ecologicamente correta, para que os empreendimentos sejam dotados de tecnologias e materiais que minimizem os impactos ao meio ambiente. Assim, esse trabalho propõe isso, reduzir insumos, energia e sobretudo otimizando os recursos minerais disponíveis.

REFERÊNCIAS

AL-FAKIH, A.; MOHAMMED, B.; LIEW, M. S.; NIKBAKHT, E. Incorporation of waste materials in the manufacture of masonry bricks: an update review. **Journal of Building Engineering**, v. 21, p. 37-54, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.017>.

AN, Q.; PAN, H.; ZHAO, Q.; DU, S.; WANG, D. Strength development and microstructure of recycled gypsum-soda residue-GGBS based geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 331, p. 127312, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL. **A gestão dos resíduos da construção e demolição e o papel do engenheiro**. Disponível em: <https://abrecon.org.br/a-gestao-dos-residuos-da-construcao-e-demolicao-e-o-papel-do-engenheiro/>. Acesso em: 19 abr. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: água para amassamento do concreto Parte 1: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: cimento Portland: determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7185**: solo: determinação da massa específica aparente, in situ, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606**: cimento Portland: determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: cimento Portland: determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: determinação da absorção de água e densidade do agregado miúdo. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

BORGES, A. K. D. S. M.; NETO, O. D. M. M., & Mendonça, A. M. G. D. (2021). Análise química-mineralógica de cimentos Portland comerciais. **Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis**, 15(1), 66-73, 2021. Disponível em: <https://seer.ucp.br/seer/index.php/REVCEC/article/view/2104>. Acesso em: Out 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos**. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2020.

BRASIL. **Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA nº 307, de 17 julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, DF: CONAMA, [2002]. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=305. Acesso em: 19 fev. 2023.

BUNDHOO, Z. M. Solid waste management in least developed countries: current status and challenges faced. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, n. 3, p. 1867-1877, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0728-3>.

CAMPAGNOLO, R. B.; MARTINS, D. C. C.; POLASTRI, P.; JUNIOR, L. R. T. Análise do gerenciamento de resíduos de gesso em uma empresa de médio porte localizada na cidade de Maringá-PR. In: 6º Congresso Sul Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, Foz do Iguaçu, 2023. **Anais** [...]. Piratininga/SP IBEAS - Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2023, p. 1-5.

CIPRIANO, P. B.; GALDINO, T. S. G.; SÁ, C. S.; FERRAZ, A. V. Avaliação dos parâmetros de calcinação do resíduo de gesso nas propriedades do gesso reciclado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, p. e13026, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13026>

DEL RÍO-M., VIDALLES-BARRIGUETE, A.; PIÑA-RAMÍREZ, C. VITIELLO, V.; SANTA CRUZ-ASTORQUI, J.; CASTELLUCCIO, R. A review of the research about gypsum mortars with waste aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 45, p. 103338, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103338>.

FERREIRA, F. C. **Estudo de caracterização do gesso para revestimento produzido no Polo Gesseiro do Araripe**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

GERALDO, R. H.; PINHEIRO, S. M.; SILVA, J. S. ANDRADE, H. M.; DWECK, J.; GONÇALVES, J. P.; CAMARINI, G. Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 288-300, 2017. DOI: [10.1016/j.jclepro.2017.06.203](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.203).

HIRSCH, T.; MATSCHEI, T.; STEPHAN, D. The hydration of tricalcium aluminate ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) in Portland cement-related systems: A review. **Cement and Concrete Research**, v. 168, p. 107150, 2023. DOI: [10.1016/j.cemconres.2023.107150](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107150).

LAADILA, M. A.; LEBIHAN, Y.; CARON, R. F.; VANEECKHAUTE, C. Construction, renovation and demolition (CRD) wastes contaminated by gypsum residues: Characterization, treatment and valorization. **Waste Management**, v. 120, p. 125–135, 2021. DOI: [10.1016/j.wasman.2021.05.013](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.013).

LIMA, K. P. B. A.; SILVA, B. P. D.; CUNHA, A. L. X.; CAVALCANTI, K. V. M.; LIMA, F. B.; ARAÚJO, F. W. C. D.; PÓVOAS, Y. V. Estudo das propriedades do gesso de fundição com adição de aditivo hidrofugante. **Ambiente Construído**, v. 23, p. 273-287, 2023. DOI: [10.1590/S1678-86212023000100514](https://doi.org/10.1590/S1678-86212023000100514).

LIRA, D. S.; DE OLIVEIRA LIMA, D.; MOLANO, J. C. A.; NETO, J. D. C. M.; MORAES, I. C. F. Panorama da coleta dos resíduos sólidos no Brasil: Cenário do país após 10 anos da

instauração da política nacional dos resíduos sólidos. **Centro**, v. 4, p. 270, 2020. DOI: 10.55449/congea.13.22. XI-006.

MASUERO, A. B. Desafio da Construção Civil: crescimento com sustentabilidade ambiental. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 26, n. 4, p. e13123, 2021. DOI: 10.1590/S1517-707620210004.13123.

NUNES, K. R. A.; MAHLER, C. F. Comparison of construction and demolition waste management between Brazil, European Union and USA. **Waste Management & Research**, v. 38, n. 4, p. 1-8, 2020. DOI: 10.1177/0734242X20902814.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de desenvolvimento sustentável**. ONU, 2024. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 18 out. 2024.

OLIVEIRA, S. J. P.; GIOVANETTI EL-D. S. Produção de gesso no Araripe Pernambucano: Impactos Ambientais e Perspectivas futuras. **Revista AIDIS De Ingeniería Y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo Y Práctica**, v. 12, n. 3, p. 496–509, 2019. DOI: 0000-0003-1826-1746.

REGINATO, L.; RAFAELA, G. G. O. Efeito da substituição parcial do agregado miúdo por calcário calcítico em argamassas de reparo: Propriedades mecânicas. In: **Comitê Brasileiro de Barragens - XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens**, Foz do Iguaçu, ago. 2023.

ROJAS, M. A.; BRITO, J. DE; FLORES-C., I.; PEREIRA, M. F. C.; RUBIO-DE-HITA, P. Influence of gypsum wastes on the workability of plasters: Heating process and microstructural analysis. **Journal of Building Engineering**, v. 29, p. 101143, 2020. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101143.

SILVA, E. J.; SILVA, P. D.; MARQUES, M. L. Resistência à compressão de argamassas em função da adição de fibra de coco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 12, p. 1268-1273, jul. 2014. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v18n12p1268-1273.

SINDICATO DAS INDÚSTRIAS DO GESENTO. **Pólo Gesseiro – PAINEL IV – Importância Econômica do Arranjo Produtivo Gesso para o Desenvolvimento Regional**. SINDUGESSO, 2019. Disponível em: <https://www.aspacer.com.br/wp-content/uploads/2016/10/SINDUSGESSO-ASPACER-2019.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2024.

SUAREZ, S.; ROCA, X.; GASSO, S. Product-specific life cycle assessment of recycled gypsum as a replacement for natural gypsum in ordinary Portland cement: application to the Spanish context. **Journal of Cleaner Production**, v. 117, p. 150-159, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.01.022.

THYMOTIE, A.; CHANG, T. P.; NGUYEN, H. A. Improving properties of high-volume fly ash cement paste blended with β -hemihydrate from flue gas desulfurization gypsum. **Construction and Building Materials**, v. 261, p. 120494, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120494.

TOTHOVA, D.; HEGLASOVA, M. Measuring the environmental sustainability of 2030 Agenda implementation in EU countries: How do different assessment methods affect results. **Journal of Environmental Management**, v. 322, p. 116152, 2022. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116152.

ZHIXIN, L.; JIAHUI, P.; HAIXIN, Z.; XINGXING, Q.; MIN, Z. Grindability, grading and wettability of recycled plaster. **Transactions of Tianjin University**, v. 22, p. 480-485, 2016. DOI: 10.1007/s12209-016-0094-3.

WALPOLE, R. E.; MYERS, R. H.; MYERS, S. L.; YE, K. **Probabilidade & estatística para engenharia e ciências**. 8. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.