

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

ELVIA SORAYA SANTOS NASCIMENTO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE GESSO
NAS CARACTERÍSTICAS DO TIJOLO SOLO-CIMENTO**

São Cristóvão, SE
Julho de 2025

ELVIA SORAYA SANTOS NASCIMENTO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE GESSO
NAS CARACTERÍSTICAS DO TIJOLO SOLO-CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Sergipe como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: **Dra. ZÉLIA SOARES MACEDO**
Co-orientador: **Dr. HERBET ALVES DE OLIVEIRA**

São Cristóvão, SE
Julho de 2025

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SIBIUFS
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

N244e Nascimento, Elvia Soraya Santos Nascimento
Estudo da influência da incorporação de resíduo de gesso nas características do tijolo solo-cimento / Elvia Soraya Santos Nascimento ; orientador Zélia Soares Macedo. – São Cristóvão, SE, 2025.
108 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)
- Universidade Federal de Sergipe, 2025.

1. Ciência dos materiais. 2. Matérias – testes. 3. Solo-cimento.
4. Resíduos como material de construção. 5. Sustentabilidade. I.
Macedo, Zélia Soares, orient. II. Título.

CDU 620.1

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE
GESSO NAS CARACTERÍSTICAS DO TIJOLO SOLO-CIMENTO

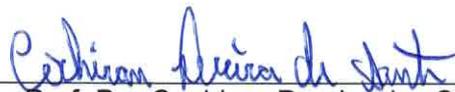
Elvia Soraya Santos Nascimento

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS.

Aprovada por:



Profa. Dra. Zélia Soares Macedo



Prof. Dr. Cochiran Pereira dos Santos



Profa. Dra. Iara de Fátima Gimenez

SÃO CRISTÓVÃO, SE – BRASIL

Julho/2025

**Dedico este trabalho a todos que
sonham, mesmo quando o caminho
parece improvável.
À minha mãe, por ser meu chão.
Aos que me ensinaram que desistir
nunca foi uma opção.
E a mim mesma, por ter seguido em
frente mesmo quando duvidei que
conseguiria.**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser o alicerce da minha vida e por me sustentar nos momentos de cansaço, incerteza e superação. Sem Sua presença constante, nada disso teria sentido ou seria possível.

À minha família, pelo amor incondicional, pelos conselhos sinceros e pelo apoio silencioso em todos os momentos, em especial à minha mãe, exemplo de força e fé, cuja dedicação foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

À minha orientadora, professora Zélia Macedo, pela orientação segura, pelo olhar crítico e por acreditar na relevância desta pesquisa. Sua orientação foi essencial para a construção deste trabalho.

Ao meu coorientador, professor Herbet Alves, a quem dedico uma gratidão especial. Mais que um orientador técnico, foi um incentivador incansável. Suas palavras de confiança e sua sensibilidade diante das dificuldades foram fundamentais para que eu não desistisse, mesmo nos momentos mais desafiadores.

Ao professor Cochiran Santos, por sua disponibilidade, pelas contribuições valiosas e pelas conversas que enriqueceram tanto o desenvolvimento acadêmico quanto pessoal.

Ao Instituto Federal de Sergipe – IFS, pelo suporte técnico, pela infraestrutura laboratorial e pelo ambiente de acolhimento à pesquisa científica. Sem esse espaço, a realização prática deste trabalho não seria possível.

A todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, colegas, amigos e demais professores, deixo aqui meu sincero agradecimento. Cada gesto, conselho ou palavra de incentivo foi significativo para mim.

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), cujos auxílios foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradecemos também aos Laboratórios de Solos e de Materiais do Instituto Federal de Sergipe e aos Laboratórios Multiusuários do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, pela infraestrutura e suporte técnico essenciais à realização dos experimentos e análises.

Esta pesquisa utilizou as instalações do Centro Multiusuário de Nanotecnologia da Universidade Federal de Sergipe (CMNano-UFS), uma organização sem fins lucrativos membro dos Centros Nacionais Multiusuários patrocinados pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). Agradecemos à equipe técnica do CMNano pelo suporte durante os experimentos realizados sob o número de proposta 080-2024.

“Eu sou feita de cicatrizes, de recomeços e de fé. E é isso que me move.”

— **Conceição Evaristo**

Resumo da Dissertação apresentada ao P²CEM/UFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE GESSO NAS CARACTERÍSTICAS DO TIJOLO SOLO-CIMENTO

Elvia Soraya Santos Nascimento

Julho de 2025

Orientador: prof^ª. Dr^ª. Zélia Soares Macedo

Coorientador: prof. Dr. Herbet Alves De Oliveira

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

Esta dissertação investigou o uso de resíduo de gesso reciclado como substituinte parcial do cimento na produção de compósitos de solo-cimento, com foco na avaliação do desempenho físico-mecânico e na viabilidade ambiental da proposta. O solo utilizado foi caracterizado quanto à composição granulométrica, química e aos limites de consistência. O cimento Portland CP V-ARI foi selecionado por sua elevada resistência inicial, compatível com a programação dos ensaios experimentais. O descarte inadequado de resíduos de gesso representa um desafio ambiental crescente, especialmente pela possibilidade de liberação de sulfatos no solo e em corpos hídricos. A proposta deste estudo buscou mitigar esse impacto por meio da reutilização desse resíduo em formulações de solo-cimento. O gesso foi processado por secagem, moagem e peneiramento antes de sua incorporação em diferentes proporções às misturas. As análises físico-químicas e estruturais dos materiais incluíram FRX, DRX, FTIR e MEV/EDS. Corpos de prova cilíndricos foram moldados com 0%, 10%, 20% e 40% de substituição de cimento por gesso, e submetidos a ensaios de resistência à compressão e absorção de água após 7 e 28 dias de cura. Os compósitos com até 20% de gesso apresentaram resistência à compressão de até 3,87 MPa aos 28 dias, com absorção de água inferior a 18%, desempenho compatível com aplicações não estruturais. Em contrapartida, a formulação com 40% de gesso apresentou redução significativa de resistência e evidências de degradação microestrutural, com formação excessiva de etringita identificada por DRX e MEV. Esses achados destacam a importância do controle do teor de gesso para a estabilidade do compósito. Conclui-se que a incorporação de gesso reciclado em teores de até 20% representa uma solução tecnicamente viável, ambientalmente estratégica e economicamente acessível, capaz de transformar um passivo ambiental em um insumo sustentável para a construção civil.

Palavras-chave: Solo-cimento; Resíduo de gesso; Sustentabilidade; Materiais alternativos; Desempenho mecânico.

Abstract submitted to P²CEM/UFS as part of the requirements for obtaining the Master's Degree in Materials Science and Engineering.

STUDY ON THE INFLUENCE OF GYPSUM WASTE INCORPORATION ON THE CHARACTERISTICS OF SOIL-CEMENT BRICKS

Elvia Soraya Santos Nascimento

July/2025

Advisor: D.Sc Zélia Soares Macedo

Co-advisor: D.Sc Herbet Alves de Oliveira

Graduate Program in Materials Science and Engineering

This dissertation investigated the use of recycled gypsum waste as a partial replacement for cement in the production of soil-cement composites, focusing on the evaluation of physical-mechanical performance and the environmental feasibility of the proposed solution. The soil used was characterized in terms of particle size distribution, chemical composition, and consistency limits. Portland cement CP V-ARI was selected for its high early strength, suitable for the experimental schedule. Improper disposal of gypsum waste poses a growing environmental concern, particularly due to the potential release of sulfates into soil and water bodies. This study aimed to mitigate such impacts by reusing this waste in soil-cement formulations. The gypsum was dried, ground, and sieved prior to incorporation in varying proportions. The materials were characterized using XRF, XRD, FTIR, and SEM/EDS. Cylindrical specimens were molded with 0%, 10%, 20%, and 40% gypsum replacing cement, and were tested for compressive strength and water absorption after 7 and 28 days of curing. Composites with up to 20% gypsum showed compressive strength of up to 3.87 MPa at 28 days and water absorption below 18%, meeting performance requirements for non-structural applications. In contrast, the 40% gypsum formulation exhibited significant strength reduction and microstructural degradation, with excessive ettringite formation confirmed by XRD and SEM. These findings highlight the need for careful control of gypsum content to ensure composite stability. It is concluded that incorporating up to 20% recycled gypsum is a technically viable, environmentally strategic, and economically feasible solution, capable of converting an environmental liability into a sustainable input for civil construction.

Keywords: Soil-cement; Gypsum waste; Sustainability; Alternative materials; Mechanical performance.

LISTA DE SIGLAS

- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ACV** – Análise do Ciclo de Vida
- AQUA-HQE** - Alta Qualidade Ambiental – Haute Qualité Environnementale
- ANOVA** – Análise de Variância
- ASTM** – American Society for Testing and Materials
- CONAMA** - Conselho Nacional do Meio Ambiente
- C-S-H** – Silicato de Cálcio Hidratado
- CP V-ARI** – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
- DEF** – Formação Expansiva de Etringita Tardia (Delayed Ettringite Formation)
- DRX** – Difração de Raios X
- DTG** – Derivada da Termogravimetria
- EDS** – Espectroscopia de Energia Dispersiva
- EDXRF** – Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia
- FTIR** – Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
- IP** – Índice de Plasticidade
- LEED** – Leadership in Energy and Environmental Design
- LL** – Limite de Liquidez
- LP** – Limite de Plasticidade
- MEV** – Microscopia Eletrônica de Varredura
- NBR** – Norma Brasileira Regulamentadora
- ODS** – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
- PAST** – Paleontological Statistics (software estatístico)
- pH** – Potencial Hidrogeniônico
- SF** – Formulação sem adição de gesso (Solo-cimento de Referência)
- TGA** - Análise Termogravimétrica
- USGS** – United States Geological Survey
- WBCSD** – World Business Council for Sustainable Development

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Casa popular construída com tijolos solo-cimento.	8
Figura 2. Tijolo de Solo-Cimento	10
Figura 3. Desenvolvimento da microestrutura durante a hidratação do cimento.	14
Figura 4. a) Estrutura cristalina do gesso di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); b) Ciclo produtivo do gesso, desde a extração da rocha até sua aplicação e possibilidade de reutilização..	21
Figura 5. Fluxograma do delineamento experimental.	32
Figura 6. Resistência à compressão das formulações com diferentes teores de areia (0%, 10%, 20% e 40%) e sob três níveis de compactação (5 MPa, 10 MPa e 15 MPa), todos com 10% de umidade. Observa-se que a formulação com 10% de areia apresentou o melhor desempenho mecânico em todos os níveis de pressão aplicada.	33
Figura 7. Corpos de prova cilíndricos ($6,0 \times 4,0$ cm) moldados com diferentes proporções de solo, cimento e gesso reciclado. As amostras foram identificadas e organizadas para cura natural antes da realização dos ensaios físico-mecânicos.....	35
Figura 8. Prensa hidráulica manual utilizada na moldagem dos corpos de prova cilíndricos.	36
Figura 9. Etapas realizadas para ensaio de resistência à compressão. Corte dos tijolos ao meio; Capeamento das partes; Máquina utilizada para realizar o ensaio de resistência à compressão	42
Figura 10. Distribuição granulométrica do solo obtida por peneiramento a seco, conforme ASTM D6913/D6913M. Observa-se predominância de frações arenosas e presença significativa de partículas finas.	44
Figura 11. Difratoograma de raios X do solo analisado, indicando as principais fases cristalinas identificadas: quartzo (Q), mica (M), feldspato (F), illita (I), calcita (C), caulinita (K) e alita (A). A análise foi realizada com radiação $\text{CuK}\alpha$ no intervalo de 2θ de 5° a 70°	46
Figura 12. Curvas termogravimétrica (TG) e derivada (DTG) do solo analisado. Observa-se a perda de massa associada à liberação de água adsorvida ($50\text{--}150^\circ\text{C}$), desidroxilação de argilominerais ($400\text{--}600^\circ\text{C}$) e decomposição térmica da calcita ($700\text{--}850^\circ\text{C}$).	48
Figura 13. Difratoograma de raios X do cimento CP V-ARI. Identificam-se como principais fases cristalinas a alita ($\text{A} - \text{Ca}_3\text{SiO}_5$), responsável pelo rápido ganho de resistência; a larnita ($\text{L} - \text{Ca}_2\text{SiO}_4$), associada à hidratação a longo prazo; e a calcita ($\text{C} - \text{CaCO}_3$), proveniente de carbonatação superficial. A análise confirma a composição mineral típica de cimentos de alta resistência inicial.....	54
Figura 14. Difratoograma de raios X do gesso reciclado. Observa-se predominância da fase hemidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), identificada como bassanita (B), além da presença de anidrita ($\text{An} - \text{CaSO}_4$) em menor proporção. Essas fases influenciam diretamente a reatividade e o comportamento do gesso em sistemas cimentícios.....	58
Figura 15. Curvas termogravimétrica (TG) e derivada (DTG) do gesso reciclado. Observa-se uma perda de massa acentuada entre 100°C e 200°C , correspondente à desidratação da bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), e uma segunda faixa mais suave entre 600°C e 750°C , associada à decomposição da anidrita (CaSO_4).	60
Figura 16. Difratoogramas de raios X das formulações SF, G5, G10, G20 e G40. As análises revelam a presença de quartzo (Q) como fase majoritária, seguida por calcita (C), illita (I)	

e gesso residual (G). A formação de etringita (E) foi identificada nas formulações com maiores teores de gesso, enquanto fases secundárias como paragonita (P) e inesita (In) indicam reações com os aluminatos e a liberação de íons sulfato.....	62
Figura 17. Resistência à compressão simples das formulações de solo-cimento com diferentes teores de gesso reciclado (G5, G10, G20 e G40) comparadas à referência (STD), após 7 e 28 dias de cura. Observa-se que a formulação G10 apresentou o melhor desempenho mecânico aos 28 dias (26,67 MPa), enquanto G20 e G40 apresentaram reduções associadas ao excesso de sulfato no sistema.	66
Figura 18. Relação entre a resistência à compressão dos tijolos moldados com a formulação padrão (SF) e os respectivos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias. Ensaio realizado conforme a NBR 10836 (ABNT, 2013).	67
Figura 19. Absorção de água das formulações de solo-cimento com diferentes teores de gesso reciclado após 7 dias de cura. Verifica-se que o aumento do teor de gesso resultou em elevação gradual na absorção, indicando maior porosidade nas formulações G20 e G40. Esse comportamento pode comprometer a durabilidade dos compósitos, especialmente em ambientes úmidos.....	69
Figura 20. Perda de massa (%) dos compósitos solo-cimento após ciclos de molhagem e secagem, conforme a NBR 13558 (ABNT, 2017).	71
Figura 21. Imagens de MEV das formulações solo-cimento com 0% (a), 10% (b) e 40% (c) de gesso reciclado após 28 dias de cura. A amostra SF apresenta matriz compacta com porosidade moderada e presença de C-S-H. A formulação G10 exhibe microestrutura densa, com cristais aciculares de etringita preenchendo vazios e promovendo maior coesão. Em contraste, a G40 revela porosidade elevada, aglomerados de gesso não reagido e microtrincas associadas à formação excessiva de etringita, indicando degradação estrutural.....	74
Figura 22. Espectros de EDS obtidos nas superfícies de fratura das amostras SF, G10 e G40. As amostras SF e G10 apresentam picos evidentes de Ca, Si e Al, compatíveis com a formação de fases hidratadas como C-S-H e C-A-S-H. A amostra G40 apresenta distribuição elemental heterogênea, com maior concentração de S (enxofre) e menor intensidade de picos de Si e Al, sugerindo maior quantidade de gesso não reagido e menor grau de hidratação.....	77
Figura 23. Espectros de FTIR das formulações solo-cimento com 0% (SF), 10% (G10) e 40% (G40) de gesso reciclado, após 28 dias de cura. Observam-se bandas associadas ao grupo hidroxila (O-H), água molecular (H-O-H), carbonato (C-O), sulfato (SO ₄ ²⁻) e ligações Si-O-Si e Al-O. A atenuação da banda de portlandita (~3640 cm ⁻¹) nas amostras G10 e G40 sugere consumo em reações pozolânicas ou por carbonatação. A maior intensidade das bandas de sulfato e carbonato nessas formulações indica a formação de etringita e calcita, enquanto a redução das bandas Si-O e Al-O em G40 pode estar relacionada à menor formação de fases cimentícias hidratadas.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos Resíduos da Construção Civil segundo a Resolução CONAMA nº 307/2002	4
Tabela 2 – Produção Mundial de Gesso em 2022 em (milhões de toneladas)	17
Tabela 3 – Produção de Gesso no Brasil por Estado (2022)	17
Tabela 4 - Composições das formulações preliminares de solo-cimento com variação no teor de areia (% em massa).....	33
Tabela 5 - Composições das formulações experimentais com substituição do cimento por gesso (% em massa).....	34
Tabela 6 – Propriedades físicas do solo utilizado.....	44
Tabela 7 – Composição química do solo que foi seco em estufa a 105 °C por 24 horas, moído em almofariz de porcelana até obtenção de pó fino e peneirado em malha ABNT 200 (75 µm), assegurando granulometria uniforme para análise elementar, reportada na forma de óxidos (% em massa), em consonância com as normas técnicas utilizadas para esse tipo de análise.	45
Tabela 8 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP V-ARI utilizadas nas formulações de solo-cimento. Os ensaios seguiram as normas técnicas aplicáveis para caracterização de materiais cimentícios.	50
Tabela 9 - Composição química do cimento CP V-ARI utilizado nas formulações de solo-cimento.	52
Tabela 10 - Propriedades físicas do gesso reciclado utilizado nas formulações solo-cimento.	55
Tabela 11 - Composição química do gesso reciclado utilizado como substituinte parcial do cimento nas formulações solo-cimento.	56
Tabela 12 - Proporção estimada das fases cristalinas nas formulações com gesso reciclado (obtidas por DRX e análise via Match!)......	63

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVO GERAL.....	2
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1	SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	3
2.1.1	Sustentabilidade Econômica: Redução de Custos e Valorização Regional.....	5
2.1.2	Sustentabilidade Social: Inclusão, Capacitação e Habitação de Qualidade.....	6
2.1.3	Convergência com Indicadores e Certificações.....	7
2.2	SOLO-CIMENTO: CONCEITO, VANTAGENS E APLICAÇÕES.....	7
2.2.1	Aspectos técnicos de fabricação e propriedades do solo-cimento.....	9
2.2.2	Mecanismos de Interação entre Argilominerais e Produtos de Hidratação.....	11
2.3	GESSO: CARACTERÍSTICAS, IMPACTO AMBIENTAL E RECICLAGEM.....	16
2.4	APLICAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO.....	18
2.4.1	Resíduo de gesso reciclado na construção civil.....	19
2.4.2	Morfologia e Distribuição de Fases Hidratadas (C–S–H, Etringita) sob Ação do Gesso.....	23
2.4.3	Alterações Microestruturais por Carbonatação e Ciclos de Umidade.....	24
2.5	GESSO RECICLADO EM SOLO-CIMENTO.....	25
2.5.1	Aplicações do gesso reciclado em compósitos cimentícios e lacunas na literatura.....	27
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	28
3.1.1	Solo.....	28
3.1.2	Cimento.....	29
3.1.3	Gesso Reciclado.....	29
3.2	METODOLOGIA.....	29
3.2.1	Caracterização dos Materiais de Partida.....	29
3.2.1.1	Solo.....	29
3.2.1.2	Cimento.....	30
3.2.1.3	Gesso.....	31
3.3	PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	32
3.3.1	Definição das Proporções e Formulações.....	34
3.3.2	Pesagem e Preparação dos Materiais.....	34

3.3.3	Adição de Água e Homogeneização.....	34
3.3.4	Moldagem dos Corpos de Prova.....	35
3.3.5	Processo de Cura	36
3.3.6	Número de Amostras e Repetibilidade	37
3.4	TECNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES	37
3.4.1	Difração de Raios X (DRX)	37
3.4.2	Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia (EDXRF).....	37
3.4.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).....	38
3.4.4	Termogravimetria (TGA/DTG)	38
3.4.5	Determinação da Área Superficial Específica (Método de Blaine).....	39
3.4.6	Determinação da Densidade Real e Densidade Aparente.....	39
3.4.7	Análise Granulométrica.....	39
3.4.8	Ensaio de Plasticidade (Solo).....	39
3.5	ENSAIOS MECÂNICOS, FÍSICOS E DE DURABILIDADE.....	40
3.6	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO TIJOLO DE SOLO-CIMENTO	40
3.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA	42
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	PROPRIEDADES DO SOLO	43
4.1.1	Físico-Geotécnicas.....	43
4.1.2	Composição Química	45
4.1.3	Mineralogia.....	46
4.1.4	Comportamento Térmico.....	46
4.2	PROPRIEDADES DO CIMENTO	48
4.2.1	Físicas	48
4.2.2	Composição química – FRX	50
4.2.3	Análise mineralógica – DRX.....	52
4.3	PROPRIEDADES DO GESSO	54
4.3.1	Físicas	54
4.3.2	Composição química	55
4.3.3	Análise mineralógica (DRX).....	57
4.3.4	Comportamento térmico (TGA/DTG).....	59
4.4	CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO SOLO-CIMENTO COM ADIÇÃO DE GESSO RECICLADO	61

4.5	DESEMPENHOS MECÂNICOS	64
4.5.1	Resistência a Compressão	64
4.5.2	Avaliação Mecânica de Tijolos Solo-Cimento em Escala Real.....	66
4.5.3	Absorção de água.....	68
4.5.4	Durabilidade	69
4.6	ANÁLISE MICROESTRUTURAL	72
4.6.1	Espectroscopia de energia dispersiva (EDS).....	75
4.6.2	Análise de FTIR	77
4.6.3	Análise Integrada dos Resultados e Contribuições Tecnológicas e Ambientais.	79
5.	CONCLUSÕES	81
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
	REFERÊNCIAS	84

1. INTRODUÇÃO

A construção civil enfrenta desafios significativos para alcançar a sustentabilidade, principalmente em razão da elevada demanda por recursos naturais, da geração de resíduos e dos impactos ambientais associados, como as emissões de CO₂ e o alto consumo de energia e água. Um dos principais entraves é a baixa integração de práticas sustentáveis ao longo do ciclo de vida das edificações (Ribeiro et al., 2024; Bortoluzzi, 2017; Nascimento et al., 2022). Além disso, a adoção de materiais reciclados e de técnicas de estabilização sustentável ainda é limitada por barreiras regulatórias, econômicas e pela ausência de incentivos (Furukawa, 2011).

Também se destacam desafios relacionados à ineficiência energética, à escassez hídrica e à resistência do mercado à implementação de certificações ambientais, como o *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) (Azevedo et al., 2019). No entanto, observa-se uma evolução no conceito de sustentabilidade na engenharia civil, que passa a abranger também aspectos sociais e econômicos, como a geração de empregos e o desenvolvimento regional (Wang et al., 2024; Bismarchi & Loschiavo dos Santos, 2012).

A transição para práticas mais sustentáveis pode gerar benefícios econômicos duradouros. A aplicação de materiais inovadores, como concreto auto-regenerativo, cimento de baixo carbono e aço reciclado, reduz os custos operacionais ao longo da vida útil das construções, ao mesmo tempo em que minimiza perdas na fase de execução (Kumar Mehta & Monteiro, 2014). Iniciativas voltadas à eficiência energética também demonstram viabilidade técnica e financeira.

Entre as soluções construtivas de menor impacto ambiental, o tijolo solo-cimento se destaca por dispensar a queima em fornos, reduzindo as emissões de CO₂ em até 82% em comparação aos tijolos cerâmicos tradicionais (Silva, 2003). Sua produção local favorece a economia regional, reduzindo custos logísticos e fomentando micro e pequenas empresas (Campos, Weber & Borba, 2017). Estima-se que o uso dessa técnica pode reduzir em até 41% os custos de construção em habitações sociais no Brasil, mantendo a qualidade e durabilidade (Menezes et al., 2007).

Diversas iniciativas no Nordeste têm incorporado resíduos da construção civil à matriz do solo, promovendo maior sustentabilidade. França (2018) destaca o uso de resíduos e a ativação alcalina como estratégias para melhorar o desempenho dos compósitos e diminuir sua pegada de carbono. Em nível internacional, políticas públicas

na Índia e na Colômbia têm incentivado o uso do solo-cimento como alternativa em habitações de interesse social (Fortunato, 2014).

Apesar dos avanços, ainda há uma lacuna na literatura quanto ao uso de resíduos contendo sulfato, como o gesso, em matrizes cimentícias de base terrosa. Considerando seu alto volume de geração e potencial poluidor, a hipótese deste trabalho é que o resíduo de gesso, devidamente processado e dosado, pode ser incorporado ao solo-cimento como substituto parcial do cimento Portland, sem comprometer a resistência e a estabilidade do compósito. Assim, o objetivo geral deste estudo é avaliar o impacto da substituição parcial do cimento por resíduo de gesso reciclado nas propriedades físicas e mecânicas de tijolos de solo-cimento, com ênfase na viabilidade técnica e ambiental da proposta.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo geral investigar a viabilidade do uso de resíduos de gesso como substituto parcial do cimento em tijolos de solo-cimento para aplicação em engenharia civil.

Como objetivos específicos, tomaram-se:

- a) Caracterizar os materiais empregados (solo, cimento, areia e resíduo de gesso reciclado), com ênfase em suas propriedades físico-químicas.
- b) Avaliar o impacto da incorporação do resíduo de gesso nas seguintes propriedades dos tijolos:
 - b.1) Resistência à compressão;
 - b.2) Absorção de água;
 - b.3) Durabilidade frente a ciclos de umedecimento e secagem.
- c) Determinar a proporção ideal de substituição de cimento por gesso que mantenha a integridade estrutural do compósito.
- d) Avaliar a contribuição ambiental da proposta por meio da redução do consumo de cimento Portland e do reaproveitamento de resíduos sólidos da construção civil.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O setor da construção civil é historicamente um dos maiores consumidores de recursos naturais e um dos principais geradores de resíduos sólidos urbanos. Essa realidade, somada aos impactos ambientais intensos, como a degradação de áreas naturais, emissão de gases de efeito estufa, poluição do solo e das águas, evidencia a necessidade urgente de soluções sustentáveis que tornem os processos construtivos ambientalmente mais responsáveis. Nesse cenário, o reaproveitamento de resíduos da construção civil desponta como uma das estratégias mais eficazes para mitigar tais impactos, promovendo a economia circular, reduzindo o desperdício de materiais e gerando benefícios sociais e econômicos ao longo da cadeia produtiva.

Segundo Leal (2021), a construção civil responde por um volume expressivo de resíduos sólidos urbanos, sendo responsável por mais de 50% dos rejeitos em algumas cidades brasileiras. Esses resíduos, quando descartados sem tratamento adequado, geram passivos ambientais significativos, como a contaminação de lençóis freáticos, aumento da poluição atmosférica e sobrecarga de aterros sanitários. A reutilização e a reciclagem, realizadas in loco ou por empresas especializadas, configuram práticas viáveis e eficientes para a redução desses impactos.

Além dos ganhos ambientais, o reaproveitamento de resíduos também contribui para impactos econômicos e sociais positivos. Batista (2022) aponta que a separação adequada dos resíduos nos canteiros de obras permite o encaminhamento para empresas recicladoras, o que fomenta a geração de emprego e renda e fortalece mercados locais. A elaboração e implementação de um Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC), conforme defendido por Leal (2021), constitui uma etapa fundamental para assegurar o controle, a rastreabilidade e a valorização dos materiais descartados, possibilitando sua transformação em insumos reaproveitáveis com valor agregado.

Diversos tipos de resíduos vêm sendo estudados como substituição parcial de materiais convencionais na construção. Dentre os mais utilizados, destacam-se os resíduos de concreto, cerâmica, cinzas volantes, escórias e resíduos agrícolas como a cinza da casca de arroz (CCA). Em um estudo de Silva et al. (2019), foi avaliada a viabilidade da substituição parcial do cimento Portland por 10% de CCA, combinado com 25% de agregado reciclado. Os resultados mostraram que o concreto produzido

apresentou viabilidade estrutural, embora com ligeira redução no módulo de elasticidade. Já Rocha e Kolling (2021) testaram misturas de concreto autoadensável com até 45% de substituição dos agregados finos por resíduos de concreto, demonstrando que a formulação com 40% superou, após 56 dias de cura, a resistência do traço de referência, reforçando o potencial desses materiais em formulações otimizadas.

A legislação brasileira também tem avançado no estímulo ao reaproveitamento de resíduos. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307/2002 estabelecem diretrizes para o gerenciamento dos resíduos da construção, priorizando sua não geração, redução, reutilização e reciclagem. Essa resolução organiza os resíduos em quatro categorias (ver Tabela 1), destacando-se a Classe C, que abrange materiais para os quais ainda não existem tecnologias consolidadas ou aplicações economicamente viáveis para reciclagem e reaproveitamento. É nesse grupo que se enquadram, por exemplo, os resíduos derivados do gesso. Além disso, normas como a ABNT NBR 15112 tratam da utilização de resíduos reciclados como agregados em concretos, oferecendo suporte técnico à adoção dessas práticas em projetos construtivos.

Tabela 1 – Classificação dos Resíduos da Construção Civil segundo a Resolução CONAMA nº 307/2002

Classe	Descrição	Exemplos de Resíduos
Classe A	Reutilizáveis ou recicláveis como agregados	Tijolos, blocos, telhas, concreto, argamassa, solos provenientes de terraplenagem
Classe B	Recicláveis para outras destinações	Plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras
Classe C	Sem tecnologia viável para reciclagem ou recuperação	Gesso e seus derivados (quando não tratados adequadamente), lã de vidro, certos resíduos contaminados
Classe D	Perigosos oriundos do processo construtivo ou contaminados	Tintas, solventes, óleos, amianto, resíduos de demolições com contaminantes, lodo de fossa, materiais contaminados por substâncias nocivas à saúde

Fonte: Adaptado de Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002.

O uso do solo-cimento como base tecnológica tem se destacado como uma alternativa viável e estratégica para a descarbonização do setor da construção civil. Ao eliminar a etapa de queima exigida na produção de tijolos cerâmicos, essa técnica reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa associadas ao processo construtivo. Segundo Leão et al. (2022), a análise do ciclo de vida (ACV) da alvenaria com tijolos de solo-cimento demonstrou uma pegada de carbono e energia consideravelmente menor em comparação com alvenarias cerâmicas e de concreto no Brasil, mesmo com a inclusão dos impactos de revestimentos e transporte.

Adicionalmente, o aproveitamento de resíduos industriais ou da construção civil na formulação dos tijolos solo-cimento potencializa os benefícios ambientais. Santa Rosa et al. (2023) evidenciaram que a substituição de até 50% dos materiais por resíduos de mármore e construção resultou em compósitos com excelente resistência à compressão e ganhos ambientais relevantes, validando a viabilidade técnica e ecológica da proposta.

A valorização de resíduos de gesso se insere nesse contexto como uma estratégia de economia circular, reduzindo a extração de gipsita natural e os impactos ambientais associados ao descarte inadequado, como a liberação de sulfatos. A gestão adequada e a reutilização desses materiais também se alinham aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, especialmente os ODS 11 e 12, ao promoverem práticas de consumo e produção mais responsáveis (Jiménez-Rivero; García-Navarro, 2020).

No âmbito da cadeia produtiva do cimento, cujo processo responde por cerca de 8% das emissões globais de CO₂, alternativas envolvendo substituições parciais do clínquer têm sido amplamente estudadas. Rošković e Bjegović (2005) destacam que o uso de adições minerais, como cinzas volantes e escórias, pode reduzir significativamente o consumo de energia térmica e as emissões associadas à fabricação do cimento. Complementarmente, He et al. (2019) demonstraram que o uso de cimento reciclado, produzido a partir de resíduos de demolição, pode reduzir as emissões de CO₂ em até 94%, consolidando o potencial das substituições sustentáveis no setor construtivo.

2.1.1 Sustentabilidade Econômica: Redução de Custos e Valorização Regional

A incorporação de resíduos de gesso na produção de tijolos de solo-cimento apresenta benefícios relevantes do ponto de vista da sustentabilidade econômica e ambiental. Estudos recentes apontam que a substituição parcial do cimento por até 15% de resíduo de gesso pode resultar em compósitos com desempenho satisfatório em termos

de resistência à compressão e absorção de água, ao mesmo tempo em que reduz significativamente o consumo de cimento Portland, um dos insumos mais onerosos e ambientalmente impactantes da construção civil (Silva et al., 2023). Essa estratégia, além de reduzir os custos diretos de produção, contribui para a mitigação dos impactos ambientais relacionados ao descarte inadequado de resíduos de gesso, especialmente no contexto urbano, onde a disposição final desse tipo de resíduo ainda representa um desafio logístico e ambiental.

Do ponto de vista econômico-regional, o reaproveitamento de resíduos de gesso pode favorecer cadeias produtivas locais, promovendo a valorização regional e a geração de empregos. Assim, a adoção dessa tecnologia representa uma solução tecnicamente viável e ambientalmente coerente, além de constituir um modelo de desenvolvimento sustentável que integra eficiência econômica e responsabilidade territorial.

2.1.2 Sustentabilidade Social: Inclusão, Capacitação e Habitação de Qualidade

Em relação à dimensão social da sustentabilidade, a tecnologia do solo-cimento demonstra potencial para inclusão produtiva e geração de oportunidades em comunidades vulneráveis. Por requerer equipamentos simples e processos de produção acessíveis, ela facilita a capacitação de mão de obra local e o fortalecimento da economia comunitária. A adoção dessa técnica tem sido especialmente benéfica em projetos habitacionais de interesse social que operam por meio de mutirões, parcerias com universidades e programas de extensão, ampliando o alcance social da construção civil.

Segundo Barros et al. (2019), o uso do solo-cimento em contextos comunitários não apenas viabiliza moradias de baixo custo, mas também promove autonomia e empoderamento em populações de baixa renda. O desempenho técnico dos tijolos de solo-cimento também apresenta vantagens relevantes. Souza et al. (2023) destacam que alvenarias com esse tipo de material mantêm temperaturas internas mais estáveis, fator determinante para conforto térmico em regiões de clima quente e seco como o semiárido brasileiro.

A versatilidade da matriz cimentícia permite a incorporação de diferentes tipos de resíduos, o que amplia ainda mais os benefícios funcionais e ambientais. Singh et al. (2024) demonstraram que a adição de borracha moída ou hydrochar a rebocos de base cimentícia pode gerar ganhos expressivos de isolamento térmico e acústico, o que contribui para a qualidade da habitação e o bem-estar dos ocupantes.

2.1.3 Convergência com Indicadores e Certificações

A abordagem metodológica adotada neste estudo, que envolve a caracterização físico-química dos resíduos, a análise das propriedades mecânicas e de durabilidade, bem como a avaliação do desempenho ambiental, está em consonância com os critérios de certificações internacionais de sustentabilidade. Entre elas, destacam-se o *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) e a Alta Qualidade Ambiental – *Haute Qualité Environnementale* (AQUA-HQE), que valorizam o uso de materiais reciclados ou recicláveis, com menor impacto ambiental, ciclo de vida prolongado e origem responsável. Tais diretrizes reforçam a importância da pesquisa como contribuição prática e alinhada às exigências contemporâneas de sustentabilidade na construção civil.

2.2 SOLO-CIMENTO: CONCEITO, VANTAGENS E APLICAÇÕES

O solo-cimento tem se consolidado, ao longo das últimas décadas, como uma técnica construtiva de baixo impacto ambiental, elevada eficiência funcional e custo reduzido. Sua difusão em larga escala remonta ao período pós-Segunda Guerra Mundial, quando países europeus enfrentavam crises habitacionais agudas e demandavam soluções construtivas ágeis e acessíveis. Na França, a política habitacional das décadas de 1950 e 1960 priorizou a industrialização da construção civil por meio dos chamados *grands ensembles*, incorporando técnicas racionais como a pré-fabricação pesada e a experimentação com materiais alternativos, incluindo o solo-cimento. Essa estratégia buscava não apenas acelerar a produção habitacional, mas também integrar os empreendimentos ao planejamento urbano com enfoque social (Legoullon, 2016; Le Goullon & Fourcaut, 2014; Delemontey, 2007).

Experiências similares ocorreram no Reino Unido, onde programas emergenciais de habitação empregaram tecnologias não convencionais, como painéis pré-moldados em solo estabilizado com cimento. Esses métodos contribuíram para conter o déficit habitacional e favoreceram a adoção de práticas mais racionais e sustentáveis na construção (Vagtholm et al., 2023).

Com foco em sustentabilidade e economia circular, diferentes resíduos industriais têm sido incorporados ao solo-cimento. Ferraz et al. (2021) apontam a viabilidade técnica de adições como cinza volante, escória de alto-forno e gesso reciclado. Santa Rosa et al. (2023) demonstraram que substituições de até 50% por resíduos de mármore e da construção civil resultaram em alto desempenho mecânico, reforçando a viabilidade

ecológica do compósito. Complementarmente, estudos recentes indicam que fibras naturais e recicladas ampliam a resistência e a durabilidade dos tijolos, inclusive em condições tropicais e de fundações pouco profundas (Mitikie et al., 2024; Jafari et al., 2025).

Do ponto de vista social, o solo-cimento continua sendo uma solução estratégica em programas de habitação popular em países como Brasil, Índia e Colômbia (Figura 1). Por exigir ferramentas simples e mão de obra local, promove geração de emprego, capacitação técnica e autonomia produtiva em comunidades vulneráveis (Batista et al., 2022; Fortunato, 2014). A articulação com universidades e programas públicos tem potencializado seus impactos sociais, favorecendo a construção de moradias mais acessíveis e ambientalmente responsáveis.



Figura 1. Casa popular construída com tijolos solo-cimento.

Fonte: HABITARE (2004).

A versatilidade do solo-cimento tem motivado investigações voltadas ao seu desempenho em diferentes contextos geotécnicos e climáticos, com ênfase na durabilidade dos compósitos frente às intempéries. Estudos contemporâneos têm explorado variações nas proporções dos constituintes da mistura, bem como a incorporação de adições minerais e fibras vegetais, com o objetivo de melhorar características como a resistência à tração e o desempenho sob ciclos de molhagem e secagem, que são determinantes para a vida útil de edificações expostas a ambientes agressivos. Nesse contexto, Ghobarah et al. (2024) demonstraram que a adição de zeólita natural e fibras de palma a compósitos de solo-cimento contribuiu significativamente para

a redução da perda de resistência à compressão após 15 ciclos de umedecimento e secagem: 24,5% de redução nas amostras modificadas contra 30,3% nas amostras controle, evidenciando ganhos relevantes em termos de durabilidade.

Complementarmente, pesquisas envolvendo fibras vegetais como o cânhamo também têm apresentado resultados promissores. Segundo Aziz et al. (2019), a incorporação de fibras de cânhamo a solos estabilizados promoveu melhorias expressivas na resistência à tração e no comportamento mecânico sob ciclos de exposição à umidade, indicando o potencial dessas fibras na formulação de materiais de construção mais resilientes e ambientalmente sustentáveis. Tais estratégias se alinham aos princípios da construção verde e da economia circular, ao integrar resíduos renováveis à matriz cimentícia sem comprometer o desempenho técnico dos compósitos.

Dessa forma, tanto a evolução histórica quanto os avanços científicos reforçam o papel estratégico do solo-cimento como alternativa sustentável na construção civil.

2.2.1 Aspectos técnicos de fabricação e propriedades do solo-cimento

Os tijolos de solo-cimento (Figura 2) são produzidos por meio da estabilização mecânica e química do solo, mediante adição controlada de cimento Portland e água, seguida de compactação mecânica e cura úmida.

A resistência e a durabilidade dos blocos de solo-cimento dependem diretamente das características do solo utilizado, especialmente sua granulometria, plasticidade e composição mineralógica. Dentre esses fatores, a distribuição granulométrica adequada exerce papel fundamental na melhoria das propriedades mecânicas.

Misturas de solo e areia com faixas bem ajustadas favorecem a compactação, resultando em menor porosidade e maior densidade, o que se traduz em ganhos significativos de resistência à compressão e à flexão. Estudos recentes demonstram que a substituição de areia natural por areias alternativas, como aquelas provenientes de solos escavados ou resíduos graníticos, pode manter ou até melhorar o desempenho do

compósito, desde que a proporção de finos e a forma dos grãos sejam controladas para otimizar o empacotamento das partículas (Saad et al., 2025).

A maior compactidade, por sua vez, favorece a formação de uma matriz cimentícia mais coesa, reduz a absorção de água e aumenta a durabilidade, o que reforça seu potencial para aplicações sustentáveis.

Além da granulometria, a plasticidade influencia diretamente a trabalhabilidade da mistura e a tendência à fissuração durante a secagem. Solos com alto índice de plasticidade tendem a comprometer o desempenho estrutural dos blocos.

No que se refere à composição mineralógica, a presença de minerais expansivos, como a montmorilonita, pode reduzir significativamente a resistência dos compósitos, enquanto a caulinita apresenta impacto menos severo, como evidenciado por Narloch et al. (2020).

Dessa forma, a seleção criteriosa do solo, considerando sua composição física e química, é essencial para garantir o desempenho técnico e a durabilidade dos blocos de solo-cimento.



Figura 2. Tijolo de Solo-Cimento

Fonte: O Autor, 2025.

Em termos de desempenho mecânico, os tijolos de solo-cimento apresentam resistência compatível com sua utilização como elementos estruturais não armados. Para isso, é essencial seguir práticas técnicas rigorosas, especialmente no que se refere à dosagem solo-cimento, à compactação mecânica e à etapa de cura. A cura úmida, em particular, desempenha papel fundamental na promoção das reações de hidratação do cimento, responsáveis pela formação de produtos cimentantes que conferem coesão e resistência ao compósito.

Zhang et al. (2023) observaram que a resistência à flexão dos tijolos de solo-cimento evolui significativamente com o tempo de cura, registrando um aumento de até 65% entre os dias 7 e 28. Esse resultado reforça a importância de um período mínimo de 28 dias para se atingir o desempenho mecânico ideal. De forma complementar, o estudo de Dhane et al. (2019) destaca que a manutenção da umidade por pelo menos sete dias é indispensável para evitar a fissuração por retração e promover uma estrutura interna mais densa e durável.

A adoção de práticas adequadas de cura, portanto, não apenas potencializa a resistência dos blocos, mas também assegura sua durabilidade frente às ações ambientais ao longo do tempo. Esses aspectos, contudo, não podem ser plenamente compreendidos sem considerar as interações físicoquímicas que ocorrem entre os componentes do solo e os produtos de hidratação do cimento. Nesse contexto, destaca-se a importância de analisar os mecanismos de interação entre os argilominerais presentes na matriz terrosa e as fases hidratadas formadas ao longo do processo de cura, uma vez que essas interações influenciam diretamente a microestrutura e, conseqüentemente, o desempenho global dos compósitos.

2.2.2 Mecanismos de Interação entre Argilominerais e Produtos de Hidratação

A estrutura cristalina e as propriedades físicoquímicas dos argilominerais afetam o equilíbrio iônico da solução intersticial, impactando o desenvolvimento das fases hidratadas. Solos com altos teores de caulinita, ilita ou montmorilonita apresentam comportamento coloidal, elevada área superficial específica e grande capacidade de retenção de água, o que influencia a disponibilidade de reagentes para as reações de hidratação (Silva et al., 2024).

A caulinita, um argilomineral do tipo 1:1, possui estrutura lamelar estável e baixa capacidade de troca catiônica (CTC). Embora apresente baixa reatividade química, sua alta afinidade por água promove a adsorção física de parte da água de amassamento, reduzindo a fração efetivamente disponível para hidratação. Esse fenômeno pode retardar a cinética de hidratação inicial e comprometer o desenvolvimento de resistência, sobretudo em sistemas com baixa relação água/cimento (Silva et al., 2024; Zunino & Scrivener, 2022).

Argilominerais do tipo 2:1, como a ilita e a montmorilonita, apresentam maior CTC e estrutura expansível, o que intensifica a competição por íons cálcio (Ca^{2+}) e íons

hidratados presentes na solução intersticial. Essa competição limita a supersaturação da solução com relação à portlandita, dificultando a nucleação e o crescimento de fases como o silicato de cálcio hidratado (C–S–H), além de favorecer a adsorção de íons silicato e aluminato, afetando o equilíbrio termodinâmico do sistema (Maier et al., 2021; Silva et al., 2024).

Tais efeitos tornam-se mais relevantes em formulações com baixo teor de cimento, como é comum em blocos de solo-cimento. Nesses casos, a alcalinidade inicial é reduzida e a disponibilidade de cálcio é limitada, o que leva ao prolongamento do tempo de pega e à redução na taxa de liberação de calor. Esse comportamento decorre da menor taxa de dissolução das fases C_3S e C_3A e da inibição da formação precoce de C–S–H, conforme relatado por Zunino e Scrivener (2022).

A elevada área superficial dos argilominerais, embora favoreça a nucleação de produtos de hidratação, também contribui para a formação de géis de menor densidade e maior porosidade capilar. Essa microestrutura menos compacta pode comprometer a durabilidade do compósito, facilitando a penetração de agentes agressivos e processos de degradação, como carbonatação e ciclos de umedecimento e secagem (Silva et al., 2024).

Assim, solos com alta fração argilosa não apenas impactam a reologia e a demanda de água da mistura, mas também influenciam diretamente os mecanismos de hidratação e a formação das fases cimentícias. Para compreender esses efeitos, é necessário considerar a composição e o comportamento do cimento Portland, principal agente ligante nos compósitos.

O clínquer de cimento Portland é produzido pela calcinação de calcário, argila e adições corretivas a aproximadamente 1450 °C, resultando na formação de quatro fases minerais principais: silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e aluminoferrita tetracálcica (C_4AF). A proporção dessas fases e suas propriedades físico-químicas determinam a reatividade do cimento e seu desempenho em termos de resistência e durabilidade (Hacini-Chikh & Arabi, 2024).

O C_3S , fase majoritária e mais reativa, é o principal responsável pela resistência inicial dos compósitos, por meio da formação do gel de silicato de cálcio hidratado (C–S–H) e da portlandita. Estudos demonstram que a aceleração da hidratação de C_3S pode ser favorecida por mecanismos de nucleação de C–S–H em escala micro, o que reduz a energia de ativação das reações e promove ganhos precoces de resistência (Li et al., 2024). Já o C_2S apresenta hidratação mais lenta, contribuindo para a resistência a longo prazo, especialmente após os 28 dias iniciais de cura (Das et al., 2024).

Adicionalmente, a reatividade das fases do clínquer está associada às suas propriedades de superfície, como demonstrado por Zunino et al. (2024), que identificaram elevada afinidade do C_3S e do C_3A por adsorventes polares, influenciando diretamente a cinética de hidratação. Por outro lado, elementos residuais presentes na matéria-prima, como o tungstênio, podem se incorporar preferencialmente às fases C_4AF e C_3S , alterando sua estrutura eletrônica e estabilidade (Zhu et al., 2024). Tais alterações estruturais podem impactar a formação e a evolução dos produtos hidratados, sobretudo em sistemas com presença significativa de argilominerais.

A hidratação do aluminato tricálcico (C_3A) em cimentos Portland ocorre de maneira extremamente rápida, o que pode provocar a pega instantânea e comprometer a trabalhabilidade da pasta. Para controlar esse processo, adiciona-se gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), que reage com o C_3A formando etringita primária ($C_6A\hat{S}_3H_{32}$), um produto hidratado que preenche os poros iniciais da matriz e retarda a progressão da reação do aluminato, garantindo maior tempo de manuseio.

Estudos recentes demonstram que sais de sódio, como o Na_2SO_4 , podem potencializar esse efeito, promovendo a formação precoce de etringita e reduzindo a rigidez inicial da pasta (Axthammer et al., 2024). Além disso, análises quantitativas confirmam que o teor de gesso, a finura do C_3A e a razão água/cimento influenciam significativamente a cinética de hidratação e a extensão da formação de etringita, impactando diretamente o desempenho reológico e mecânico da pasta (Joseph et al., 2019). Esses achados reforçam o papel crucial do controle da hidratação do C_3A para garantir a estabilidade e funcionalidade do cimento nas fases iniciais.

Aditivos como alkanolaminas têm sido empregados para modular a estabilidade das fases AFt e AFm , interferindo na cinética de formação da etringita e nas fases posteriores de hidratação (Kang et al., 2024). Adicionalmente, observações laboratoriais revelam que a etringita pode ser sensível à presença de solventes utilizados em experimentos de parada de hidratação, demonstrando vulnerabilidade em determinadas condições experimentais (Bílek et al., 2024).

Contudo, a estabilidade da etringita pode ser comprometida sob condições ambientais adversas, como altas temperaturas ou ciclos prolongados de umidade. Nesses casos, ocorre a reprecipitação tardia da fase, fenômeno conhecido como formação tardia de etringita (*Delayed Ettringite Formation* – DEF), que pode induzir expansões internas, microfissuração e, conseqüentemente, comprometer a durabilidade do compósito (Scrivener, Snellings & Lothenbach, 2018).

A aluminoferrita tetracálcica (C_4AF), embora menos reativa que o C_3A , participa das reações de hidratação de forma complementar, formando produtos semelhantes, mas com menor contribuição para o calor de hidratação e tempo de pega. Além disso, é responsável pela coloração acinzentada típica do cimento Portland (Mehta & Monteiro, 2014).

O processo de hidratação do cimento Portland ocorre em estágios consecutivos. Inicialmente, há uma rápida dissolução das fases mais solúveis do clínquer, elevando a concentração de íons na solução porosa e promovendo a formação de produtos iniciais, como C-S-H amorfo e etringita. Essa etapa é seguida pelo período de indução, no qual a taxa de reação diminui temporariamente devido à formação de uma barreira de produtos hidratados ao redor dos grãos, o que preserva a trabalhabilidade da pasta por um tempo adequado (Taylor, 1997) (Figura 3).

Com o avanço do processo, inicia-se a fase de aceleração. Nessa etapa, intensifica-se a hidratação do silicato tricálcico (C_3S), com liberação significativa de calor e produção acelerada de C-S-H e portlandita ($Ca(OH)_2$), promovendo o ganho de resistência mecânica e o endurecimento da matriz cimentícia. Rastogi et al. (2024) confirmam que o C_3S é o principal responsável pela resistência nas primeiras idades, enquanto o silicato dicálcico (C_2S) atua de forma mais lenta, consolidando a microestrutura em estágios posteriores.

Além disso, como demonstrado por Jiang et al. (2025), formulações com maior proporção de C_2S e menor teor de C_3S tendem a formar matrizes mais densas e menos suscetíveis à lixiviação de íons cálcio, o que favorece a durabilidade a longo prazo. A taxa de hidratação também é influenciada por variáveis como a temperatura de cura e a incorporação de adições minerais, que afetam o desenvolvimento das fases hidratadas e a resistência final (Chen et al., 2025).

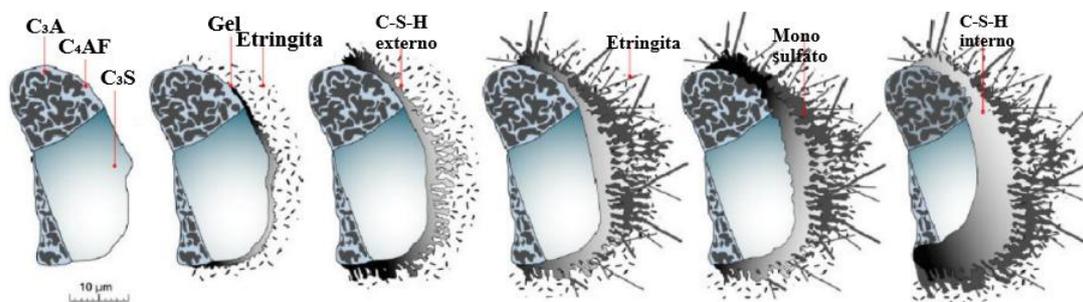


Figura 3. Desenvolvimento da microestrutura durante a hidratação do cimento.

Fonte: Adaptada de GARTNER, (1984)

Mesmo após as primeiras semanas de cura, a hidratação do cimento Portland prossegue de forma gradual, especialmente quando há disponibilidade contínua de umidade. Nessa etapa, reações secundárias ganham relevância, como a formação de monossulfato e carboaluminatos, particularmente em sistemas que incorporam adições minerais reativas, como argilas calcinadas (Wang e Plank, 2024).

A fase hidratada predominante e mais associada ao desenvolvimento da resistência mecânica continua sendo o gel de silicato de cálcio hidratado (C–S–H), cuja estrutura amorfa apresenta elevada porosidade intrínseca e grande área superficial. Por outro lado, a portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), embora essencial para a manutenção do pH alcalino e para a ativação das reações pozolânicas, é menos estável termodinamicamente.

Ao longo do tempo, essa fase pode ser consumida por processos de carbonatação, transformando-se em carbonatos como a calcita e, sob determinadas condições, em aragonita (Huang et al., 2024). Estudos recentes indicam que essa carbonatação pode ocorrer de forma acelerada, com conversão significativa da portlandita já nos primeiros dez minutos de exposição ao CO_2 (Ferrara et al., 2024), o que afeta diretamente a estabilidade química, a densificação e a durabilidade da matriz cimentícia.

Adições minerais com alto teor de sulfato, como o gesso reciclado, influenciam diretamente os mecanismos de hidratação do cimento Portland. Ponduru et al. (2025) demonstraram que o aumento da disponibilidade de íons sulfato intensifica a formação de etringita, alterando sua morfologia, distribuição espacial e dimensões dentro da matriz cimentícia.

Essa etringita, quando formada em excesso, tende a se concentrar em regiões localizadas, criando heterogeneidades estruturais que favorecem a ocorrência de zonas de fragilidade. Yang et al. (2024) observaram que a reação acelerada entre o C_3A e o gesso leva à nucleação precoce de etringita, aumentando a área superficial da pasta e prejudicando sua trabalhabilidade.

Além disso, a presença de sulfato em excesso pode interferir na estrutura do gel C–S–H, reduzindo sua densidade e comprometendo a coesão entre partículas. Esse efeito impacta diretamente a resistência mecânica e a durabilidade do material. Assim, o controle da composição mineralógica do clínquer e das adições torna-se fundamental na formulação de cimentos mais eficientes e ambientalmente sustentáveis.

2.3 GESSO: CARACTERÍSTICAS, IMPACTO AMBIENTAL E RECICLAGEM

O gesso é um dos materiais mais empregados na construção civil, com aplicações que vão desde revestimentos internos até elementos decorativos. Sua popularidade se deve à leveza, versatilidade, boa trabalhabilidade e ao acabamento fino que proporciona. Elementos como forros, molduras, divisórias em *drywall* e placas pré-moldadas são alguns dos principais produtos à base de gesso utilizados em edificações modernas (Erbs et al., 2018).

No contexto brasileiro, destaca-se o polo gesseiro do Araripe, situado na região Nordeste, responsável por cerca de 95% da produção nacional de gesso. Essa concentração regional oferece vantagens logísticas e fomenta a economia local, sendo essencial para a cadeia produtiva da construção civil no país. No entanto, essa centralização também implica em desafios ambientais, uma vez que os impactos da extração e beneficiamento da gipsita se concentram em uma área geográfica restrita (Weimann et al., 2021).

Apesar do gesso ser tecnicamente reciclável, seu reaproveitamento ainda enfrenta barreiras significativas no Brasil. Durante processos de construção e demolição, grandes volumes de resíduos de gesso são gerados. Quando descartados inadequadamente, esses resíduos podem liberar sulfatos, afetando a qualidade do solo e das águas subterrâneas. Além disso, a presença de contaminantes como tinta, cimento ou matéria orgânica dificulta a reciclagem direta, exigindo processos de limpeza e separação que ainda são pouco disseminados no país (Bumanis et al., 2022).

Por outro lado, estudos recentes mostram que o gesso reciclado pode apresentar propriedades físico-mecânicas semelhantes ao material virgem, o que amplia suas possibilidades de reutilização. Segundo Jafari e Sadeghian (2024), a reutilização do gesso pode contribuir significativamente para a redução dos custos com matérias-primas e transporte, além de preservar reservas naturais de gipsita. A reinserção do gesso reciclado no ciclo produtivo também colabora para a diminuição da pegada de carbono do setor da construção.

Além disso, há um crescente interesse em empregar o gesso reciclado na produção de argamassas, painéis e revestimentos. Os resultados obtidos por Weimann et al. (2021) apontam que, com o tratamento adequado, é possível utilizar esse material sem comprometer o desempenho técnico dos produtos. Isso reforça a viabilidade técnica e ambiental da reciclagem do gesso como prática sustentável.

No cenário mundial, a produção de gipsita ultrapassou 300 milhões de toneladas em 2022, sendo os maiores produtores a China, os Estados Unidos, a Turquia e a Índia. O Brasil ocupa a 8ª posição no ranking global, com uma produção estimada em 5,5 milhões de toneladas, de acordo com dados do USGS (*United States Geological Survey*, 2023), conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2 – Produção Mundial de Gesso em 2022 em (milhões de toneladas)

País	Produção Estimada
China	130,0
Estados Unidos	22,3
Irã	16,0
Turquia	15,0
Espanha	10,0
México	9,5
Tailândia	8,0
Brasil	5,5
Outros	84,0
Total	300,3

Fonte: USGS Mineral Commodity Summaries

De acordo com dados do Sindusgesso (2022), cerca de 95% da produção nacional se origina de Pernambuco, com contribuições residuais de estados como Ceará, Maranhão e Tocantins, conforme exposto na Tabela 3.

Tabela 3 – Produção de Gesso no Brasil por Estado (2022)

Estado	Produção Estimada (milhões de toneladas)	Participação (%)
Pernambuco	5,3	95%
Maranhão	0,16	3%
Ceará	0,08	1,5%
Tocantins	0,02	0,3%
Total	5,56	100%

Fonte: Sindusgesso (2022)

Apesar desse cenário promissor, o consumo per capita de gesso no Brasil ainda é inferior ao registrado em países desenvolvidos, o que sinaliza ampla margem para crescimento até 2030, sobretudo com o avanço de sistemas construtivos a seco e o incentivo à reciclagem no setor.

Internacionalmente, países como a Índia têm adotado o reaproveitamento do gesso em projetos de habitação popular e infraestrutura rural. O governo indiano, por meio de programas como o *Pradhan Mantri Awas Yojana*, incentiva o uso de materiais alternativos e reciclados, incluindo o gesso, como forma de reduzir custos e emissões de carbono. Em países da União Europeia, o reaproveitamento de gesso é regulamentado por diretivas que estimulam a reinserção dos resíduos no processo produtivo, em consonância com os princípios da economia circular.

Assim, o reaproveitamento do gesso na construção civil, especialmente no Brasil, representa uma oportunidade concreta para integrar sustentabilidade, inovação e eficiência econômica. A superação dos desafios técnicos, como a separação dos resíduos, o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem e a normatização do uso do gesso reciclado, é essencial para consolidar essa prática como uma alternativa viável e responsável para o setor.

2.4 APLICAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO

A geração de resíduos sólidos na construção civil representa uma das principais preocupações ambientais e logísticas da atualidade. Essa atividade, responsável por aproximadamente 35% dos resíduos sólidos urbanos em países industrializados (Androšević, 2025), contribui significativamente para a degradação ambiental e para o desperdício de recursos naturais. Durante todas as fases do ciclo de vida das edificações, observa-se a geração contínua de resíduos, cuja destinação inadequada compromete corpos hídricos, qualidade do solo e gera emissões expressivas de gases de efeito estufa. Além dos impactos ecológicos, a ausência de estratégias integradas de gestão representa também perdas econômicas associadas à não reutilização de materiais tecnicamente reaproveitáveis.

Como resposta a esse cenário, o desenvolvimento de soluções tecnológicas sustentáveis tem se intensificado, especialmente por meio da aplicação de princípios da economia circular. D'Angelo (2025) demonstrou que a substituição do cimento Portland por geopolímeros oriundos de entulho pode reduzir em até 80% as emissões de CO₂ durante a produção, sem comprometer a viabilidade técnica do material. A abordagem

consiste na ativação alcalina de resíduos de demolição, promovendo a incorporação de agregados reciclados em matrizes ligantes de elevado desempenho ambiental.

Outras frentes de inovação incluem resíduos considerados de baixa reciclabilidade. Bulínska et al. (2025) avaliaram o uso de vidro proveniente de painéis fotovoltaicos desativados, observando aumento de até 13% na resistência à compressão de compósitos cimentícios com 15% de substituição do agregado fino convencional. Já Lopes et al. (2025) utilizaram HDPE marinho reciclado para impressão 3D de componentes arquitetônicos, demonstrando propriedades estruturais equivalentes às de elementos comerciais, além de contribuir para a redução de até 20 kg de resíduos plásticos por m² de componente produzido.

Apesar dos avanços, permanecem entraves à ampla adoção desses materiais. Jaya et al. (2025) destacam que mais de 60% dos profissionais entrevistados apontaram a falta de normativas técnicas como principal obstáculo à implementação de soluções baseadas em resíduos. Além disso, a heterogeneidade composicional dos rejeitos e o desconhecimento das propriedades a longo prazo geram resistências por parte do setor construtivo. Por outro lado, os autores ressaltam que os ganhos em inovação, redução de custo e alinhamento a políticas ambientais têm incentivado pesquisas e desenvolvimento de novas formulações.

Nesse contexto, a incorporação de resíduos sólidos na construção civil se consolida como estratégia eficaz para mitigar impactos ambientais e reduzir o consumo de matérias-primas não renováveis. Diversos materiais têm sido avaliados quanto à sua viabilidade técnica e ambiental, com destaque para aqueles com potencial de reaproveitamento em compósitos cimentícios.

2.4.1 Resíduo de gesso reciclado na construção civil

Entre esses resíduos, o gesso reciclado, oriundo de processos industriais, sobras de obra ou demolições, apresenta características ligantes e composição rica em sulfato de cálcio, que o tornam um candidato promissor à substituição parcial do cimento. A seguir, serão discutidas as implicações técnicas e ambientais dessa aplicação, considerando seus efeitos sobre a hidratação, resistência e durabilidade do compósito.

Quimicamente, o gesso é composto predominantemente por sulfato de cálcio diidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), mineral conhecido como gipsita. Essa fase cristaliza no sistema monoclinico e apresenta clivagem perfeita ao longo do plano {010}, conferindo-lhe características favoráveis para processamento e aplicação (Aquilano et al., 2024).

Durante o beneficiamento industrial, a gipsita é submetida à calcinação em temperaturas entre 150 °C e 180 °C, resultando na formação do hemidrato de sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), comumente denominado gesso de construção. Ao ser reidratado com água, esse hemidrato recristaliza rapidamente em diidrato, liberando calor e formando uma matriz rígida — processo essencial para aplicações em moldagens, placas e revestimentos (Cheng et al., 2023).

Estudos recentes mostram que a adição de modificadores químicos, como o sulfato de alumínio, pode influenciar a reidratação do hemidrato. Esses aditivos afetam a orientação do crescimento cristalino, a densidade da microestrutura formada e, conseqüentemente, o desempenho mecânico e térmico de compósitos à base de gesso (Channouf et al., 2024).

A reação de reidratação pode ser expressa como:

$$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} + 1 \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{calor}.$$

Essa característica de pega rápida pode ser modulada com o uso de aditivos, o que possibilita o controle de tempo de endurecimento conforme as necessidades do sistema construtivo.

A estrutura química do gesso e seu processo de produção são fundamentais para compreender seu comportamento em materiais cimentícios, conforme ilustrado na Figura 4a, apresenta a estrutura cristalina típica do sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), conhecido como gipsita, evidenciando os arranjos atômicos dos íons cálcio (esferas verdes), grupos sulfato (SO_4^{2-} , com enxofre em amarelo e oxigênio em vermelho) e moléculas de água coordenadas, que influenciam diretamente o comportamento físico-químico do gesso. Já a Figura 4b ilustra o ciclo produtivo do gesso, desde a extração da rocha natural até sua aplicação na construção civil, incluindo as etapas de moagem, calcinação e reidratação, que permitem ao material retornar à forma endurecida após sua aplicação. Esse ciclo evidencia a natureza reversível do processo e reforça o potencial de reutilização do resíduo de gesso, o que é fundamental para estratégias de sustentabilidade.

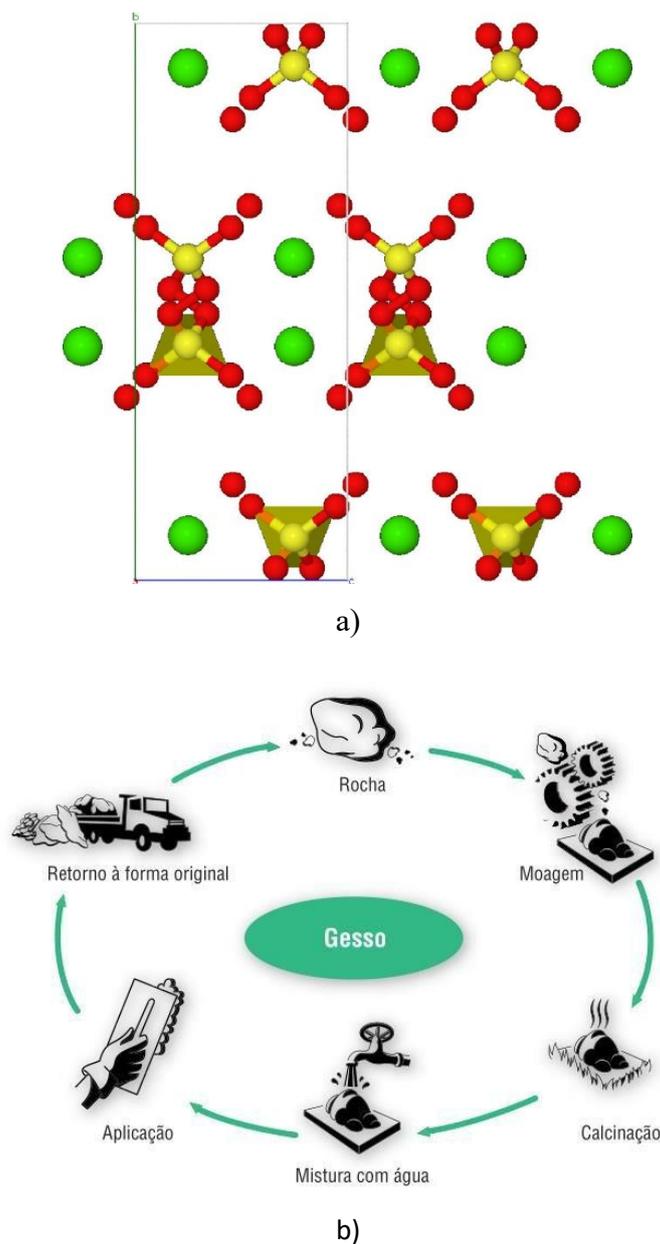


Figura 4. a) Estrutura cristalina do gesso di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); b) Ciclo produtivo do gesso, desde a extração da rocha até sua aplicação e possibilidade de reutilização.

Fontes: a) Dey, S. et al. (2016). b) Silva, A. et al. (2015).

O uso tradicional do gesso no cimento Portland está fortemente associado à sua função como regulador do tempo de pega. Essa adição controla a reação do aluminato tricálcico (C_3A), favorecendo a formação de etringita de forma controlada e prevenindo a pega instantânea, o que assegura adequada trabalhabilidade da pasta (Ponduru et al., 2025).

Estudos demonstram que a formação precoce de etringita aumenta a área superficial da pasta, contribuindo para perda de fluidez em sistemas com teor excessivo

de gesso (Yang et al., 2024). A faixa de 3% a 5% de adição de gesso ao clínquer continua sendo a mais recomendada para equilibrar a cinética de hidratação e minimizar riscos de fissuração precoce, conforme evidenciado por análises térmicas e reológicas atualizadas (Axthammer et al., 2024).

Nos últimos anos, a incorporação de resíduos de gesso como substituto parcial do cimento tem despertado interesse crescente na área de materiais cimentícios. Essa abordagem busca mitigar impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado do gesso e, ao mesmo tempo, reduzir o consumo de clínquer — cuja produção é intensiva em energia e responsável por altas emissões de CO₂ (Scrivener et al., 2018).

Pesquisas demonstram que pequenas substituições do cimento por gesso reciclado, quando devidamente controladas, não comprometem o desempenho mecânico dos compósitos. Em proporções adequadas, os resultados permanecem dentro dos limites normativos. No entanto, teores excessivos podem afetar negativamente a resistência à compressão e a durabilidade do material (Wu et al., 2024).

Além da substituição do cimento, o resíduo de gesso tem sido investigado como alternativa parcial à areia em argamassas e concretos. Essa substituição contribui para a preservação de recursos naturais e favorece o reaproveitamento de resíduos. Para que essa aplicação seja viável, é fundamental que o gesso reciclado passe por processamento adequado, livre de impurezas que interfiram na hidratação e na aderência da matriz.

Do ponto de vista técnico, a principal limitação ao uso do gesso reciclado está relacionada à sua solubilidade em ambientes úmidos. Essa característica favorece a formação de etringita tardia, reação que ocorre entre sulfatos disponíveis e aluminatos hidratados. Esse fenômeno, conhecido como expansão sulfática interna, pode gerar fissuras internas e comprometer a durabilidade da estrutura (Taylor, 1997; Mehta & Monteiro, 2014).

Sob a ótica ambiental, o reaproveitamento do gesso reciclado reduz a pressão sobre aterros, preserva jazidas de gipsita e contribui para a diminuição do consumo energético da indústria cimenteira. Do ponto de vista econômico, essa prática fortalece cadeias produtivas locais, especialmente em regiões com alta geração de resíduos oriundos da construção a seco (Santos et al., 2023).

Contudo, a implementação dessa solução em larga escala exige políticas públicas de incentivo, certificações de qualidade e a criação de uma cadeia estruturada de coleta, separação e beneficiamento.

Assim, a reutilização do gesso reciclado em compósitos cimentícios se apresenta como alternativa viável e alinhada à construção sustentável. Com o avanço de estudos sobre caracterização e formulação de misturas, é possível ampliar seu uso com segurança técnica e benefícios socioambientais relevantes.

2.4.2 Morfologia e Distribuição de Fases Hidratadas (C–S–H, Etringita) sob Ação do Gesso

A adição de gesso reciclado em compósitos cimentícios afeta diretamente os mecanismos de hidratação, especialmente no que se refere à formação do gel de silicato de cálcio hidratado (C–S–H) e da etringita. Segundo Ponduru et al. (2025), o aumento da concentração de íons sulfato, proveniente do gesso, intensifica a reação do aluminato tricálcico (C_3A), promovendo a rápida nucleação de etringita nas primeiras horas. Esses cristais, de morfologia acicular, se distribuem inicialmente nos poros capilares, reduzindo a porosidade interconectada e contribuindo para o ganho de resistência mecânica em idades precoces (Huang et al., 2025).

Contudo, teores elevados de gesso favorecem o crescimento descontrolado desses cristais, com aglomeração e distribuição irregular. Essa microestrutura heterogênea pode gerar tensões internas localizadas e favorecer a formação de microfissuras, prejudicando a durabilidade do material (Feng et al., 2024). Alterações observadas na estrutura do C–S–H, associadas à presença de núcleos nanocristalinos e à ação de aditivos dispersantes, indicam que o controle da dosagem de gesso é essencial para equilibrar a reatividade inicial e a estabilidade estrutural em longo prazo (Xia et al., 2025).

Paralelamente, o gel C–S–H experimenta modificações morfológicas em função dos sulfatos adicionais. Koçaba et al. (2012) relataram que a sobreabundância de SO_4^{2-} durante a hidratação estimula a deposição de camadas mais espessas de C–S–H, com menor grau de empacotamento iônico e arranjos lamelares menos organizados. Essa morfologia mais frouxa reduz a densidade local do gel e favorece a formação de zonas de transição interfacial (ITZs) menos coesas entre o cimento hidratado e os agregados de solo, criando pontos de fragilidade sob carregamento mecânico.

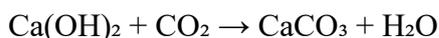
A distribuição espacial dessas fases também se encontra alterada. Em investigações por FIB–SEM, Wu et al. (2024) observaram que, em compósitos com 10 % de gesso, as fases de etringita aparecem de forma mais homogênea ao longo da matriz, contribuindo para uma coesão equilibrada. Já em 20–40 % de substituição, a etringita concentra-se preferencialmente em regiões de maior capilaridade, deixando outros pontos

da matriz dominados por C–S–H pobremente hidratado, o que acentua o contraste de rigidez e facilita a nucleação de trincas.

2.4.3 Alterações Microestruturais por Carbonatação e Ciclos de Umidade

Em compósitos cimentícios que incorporam gesso reciclado, os ciclos de molhagem e secagem podem induzir alterações microestruturais significativas. Durante a fase de molhagem, a água penetra nos poros capilares, promovendo a dissolução parcial de fases hidratadas como etringita e portlandita. Na subsequente fase de secagem, a evaporação da água resulta em tensões internas que podem causar microfissuras, especialmente ao longo das superfícies do gel de C–S–H. Esse processo de degradação microestrutural foi observado por Bui et al. (2022), que relataram a formação de microtrincas e perda de resistência mecânica em argamassas expostas a múltiplos ciclos de molhagem e secagem.

Além disso, a carbonatação acelerada, comum em ambientes com alta concentração de CO₂, pode intensificar essas alterações. O CO₂ reage com a portlandita e com o gel de C–S–H, formando calcita (CaCO₃) e sílica amorfa, conforme as reações:



A carbonatação é um dos principais mecanismos de degradação em materiais cimentícios, com impacto direto sobre a durabilidade e a integridade estrutural. Nesse processo, o dióxido de carbono (CO₂) reage com compostos hidratados do cimento, em especial o gel de silicato de cálcio hidratado (C–S–H), promovendo sua descalcificação. A liberação de íons cálcio favorece a formação de carbonato de cálcio (CaCO₃), predominantemente na forma de calcita. Estudos baseados em simulações moleculares indicam que o CO₂ interage com a superfície da matriz C–S–H, ampliando a conectividade dos poros e deslocando íons cálcio, o que compromete a estabilidade da fase (Sun et al., 2024).

Inicialmente, a precipitação de CaCO₃ atua como agente densificante, preenchendo poros capilares e microfissuras e reduzindo temporariamente a permeabilidade (Liu et al., 2024). Esse comportamento é semelhante ao observado em sistemas com precipitação biogênica de calcita, em que a formação controlada de carbonatos melhora a resistência e a durabilidade do compósito (Abu Tayyem et al., 2024). No entanto, à medida que a carbonatação progride, a contínua descalcificação do

C–S–H resulta no aumento da porosidade efetiva e na perda de coesão da matriz, comprometendo o desempenho estrutural em longo prazo.

Em compósitos cimentícios com adição de gesso reciclado, a alta concentração de íons sulfato pode desestabilizar o equilíbrio químico da matriz e favorecer reações deletérias, como a formação tardia de etringita (*Delayed Ettringite Formation* – DEF). Essa reação é particularmente crítica em regiões de descontinuidade microestrutural, como a interface pasta-agregado ou, no caso do solo-cimento, a interface solo-matriz. Estudos recentes mostram que a etringita formada em idades avançadas pode gerar tensões internas localizadas, levando à ocorrência de microexpansões e fissuração progressiva (Maalouf et al., 2024).

A acumulação de produtos expansivos compromete a durabilidade dos compósitos cimentícios, sobretudo quando submetidos a ciclos de variação de umidade e temperatura. Ensaaios com misturas à base de gesso-cimento indicam que, sem controle adequado, o crescimento excessivo de etringita pode levar à degradação precoce, especialmente sob regimes térmicos instáveis, como os encontrados em tecnologias emergentes, a exemplo da impressão 3D na construção civil (Shigapov et al., 2024).

Dessa forma, o reaproveitamento de gesso requer um controle rigoroso da formulação e do ambiente de exposição, a fim de evitar comprometimentos estruturais a médio e longo prazo. Esses mesmos cuidados tornam-se ainda mais relevantes quando se considera a incorporação do gesso reciclado em matrizes alternativas, como o solo-cimento, cujas características físico-químicas e microestruturais impõem desafios específicos à estabilidade do sistema.

2.5 GESSO RECICLADO EM SOLO-CIMENTO

A incorporação de gesso reciclado em sistemas de solo-cimento tem se mostrado uma estratégia viável tanto do ponto de vista ambiental quanto técnico, desde que acompanhada de controle rigoroso da formulação. Por ser rico em íons sulfato, o gesso pode participar ativamente das reações de hidratação e influenciar a microestrutura final do compósito. Sua presença altera a disponibilidade de espécies químicas no meio, podendo favorecer a formação de produtos cimentícios úteis à coesão do sistema, mas também reações deletérias se mal dosado. Essa dualidade de comportamento torna essencial a caracterização prévia dos materiais envolvidos e a compatibilidade entre os teores de sulfato e aluminato no ligante.

Estudos como o de Hasan et al. (2024) demonstraram que a adição de até 12% de cimento em solos gessosos elevou em 18,7% o ângulo de atrito interno, com ganhos substanciais na resistência ao cisalhamento. Em contrapartida, a aplicação de cal hidratada apresentou incrementos mais modestos, limitados a 6% mesmo em teores de 8%.

Esses dados reforçam que o cimento Portland interage de maneira mais eficaz com os componentes minerais e sulfatados do solo, formando ligações químicas mais estáveis e promovendo melhorias na resistência mecânica do material.

Do ponto de vista da estabilidade volumétrica, os ganhos também são relevantes. Segundo Humadi e Hasan (2024), a colapsibilidade de solos gessosos foi reduzida em até 92% com 12% de cimento, enquanto a cal hidratada atingiu 90%. Essa redução está associada à formação de fases hidratadas que preenchem poros, reduzem a reatividade à água e aumentam a coesão da matriz.

Tais resultados são particularmente significativos considerando que solos com alta concentração de sulfato, naturais ou artificialmente enriquecidos, apresentam comportamento altamente instável sob umidade.

No entanto, o excesso de sulfato no sistema pode favorecer a formação tardia de etringita (DEF), principalmente em interfaces heterogêneas como a zona de transição solo-matriz. Esse fenômeno foi identificado por Colorado et al. (2025), que observaram a geração de tensões internas localizadas e microexpansões em matrizes com alto teor de sulfatos reativos.

A distribuição irregular de cristais aciculares compromete a integridade da microestrutura, exigindo equilíbrio estequiométrico entre sulfato e aluminato, além de parâmetros de cura controlados.

Aspectos de durabilidade também foram discutidos por Kırgız et al. (2025), que demonstraram que a introdução de resíduos minerais finos, como lama de mármore, contribuiu para a redução da permeabilidade da matriz em até 60%. Esse comportamento está relacionado ao preenchimento de vazios e à densificação da rede porosa, o que reduz o transporte de umidade e prolonga a vida útil do compósito.

Embora o estudo não trate diretamente do gesso reciclado, os mecanismos observados são analogamente aplicáveis a adições sulfatadas finas, desde que utilizadas em dosagens compatíveis com a reatividade do sistema.

Evidências adicionais sobre o potencial técnico do gesso reciclado na estabilização de solos são fornecidas por Wang et al. (2025), que avaliaram uma mistura

sustentável composta inteiramente por resíduos industriais sólidos. A formulação, denominada GSCFC, incluía 16% de gesso de dessulfurização combinado com escória de alto-forno, escória de aço, cinza volante e escória de carbureto.

Os resultados indicaram um aumento de 50% na resistência à compressão após 15 ciclos de umedecimento e secagem, além de uma redução de 58,6% na expansão volumétrica. O CBR também foi elevado para 94,6%, superando os valores obtidos com cimento Portland. A análise mineralógica por refinamento de Rietveld revelou formações 2,63 vezes maiores de etringita e 2,51 vezes maiores de C-S-H, sugerindo que o gesso, quando equilibrado com outros subprodutos, contribui para melhorias significativas na resistência e durabilidade do compósito.

Essas evidências reforçam que o uso técnico do gesso reciclado, aliado a práticas de estabilização bem fundamentadas, pode representar uma alternativa eficaz e sustentável para obras geotécnicas, principalmente em contextos com alto potencial de reaproveitamento de resíduos da construção civil.

2.5.1 Aplicações do gesso reciclado em compósitos cimentícios e lacunas na literatura

O reaproveitamento de resíduos na construção civil tem se consolidado como uma estratégia técnica e ambientalmente vantajosa, especialmente frente aos desafios globais de sustentabilidade. Diversos estudos demonstram o potencial de resíduos sólidos, incluindo materiais à base de gesso, em aplicações como argamassas, concretos leves, geopolímeros e elementos urbanos reutilizáveis (Jaya et al., 2025; D'Angelo, 2025; Cárdenas Cleves et al., 2024).

No entanto, apesar do avanço nas aplicações convencionais, o uso do gesso proveniente da construção civil em sistemas de solo-cimento permanece subexplorado. As principais lacunas estão relacionadas à sua influência na estabilidade mecânica, durabilidade e nas reações expansivas associadas.

O panorama internacional reforça essa constatação. Grabiec e Głodkowska (2024) destacam que materiais sulfatados, como o gesso, têm sido utilizados em concretos especiais e argamassas técnicas, mas sua instabilidade química demanda soluções como a carbonatação artificial.

Toraigyr et al. (2024) analisam o alto índice de reutilização de gesso em países asiáticos desenvolvidos, contrastando com regiões em que faltam infraestrutura técnica e regulação adequada. Já Jaya et al. (2025) apontam a ausência de normas específicas e a

heterogeneidade dos resíduos como entraves à aplicação em escala industrial, indicando a necessidade de estudos técnico-científicos aprofundados.

No campo da estabilização de solos, pesquisas como as de Hasan et al. (2024) e Humadi e Hasan (2024) demonstram ganhos significativos na resistência ao cisalhamento e na redução da colapsibilidade ao se utilizar cimento e cal em solos gessosos. Contudo, essas investigações foram conduzidas com gesso natural ou industrial padronizado, não abordando o comportamento do resíduo reciclado oriundo da construção civil.

Colorado et al. (2025) alertam para o risco de formação tardia de etringita em sistemas com excesso de sulfato, o que pode causar tensões internas e microfissuração. Em contrapartida, Wang et al. (2025) mostraram que, quando equilibrado com outras adições, o gesso pode melhorar significativamente a resistência e a estabilidade volumétrica de solos de baixa plasticidade.

Outro ponto crítico é a escassez de estudos que aliem ensaios de durabilidade sob ciclos ambientais agressivos com caracterizações microestruturais aprofundadas. Técnicas como DRX, MEV e TG/DTG são essenciais para compreender a formação e estabilidade de fases como etringita ou C–S–H.

Embora os benefícios potenciais do gesso reaproveitado sejam reconhecidos, ainda falta um corpo robusto de pesquisas que tratem dessa aplicação com o nível de controle técnico exigido para uso geotécnico seguro.

Diante disso, o presente trabalho propõe suprir essa lacuna ao investigar o uso técnico do gesso reciclado pós-consumo como adição em compósitos de solo-cimento. A ênfase será dada à resistência mecânica, comportamento volumétrico e evolução microestrutural sob exposição cíclica à umidade.

A proposta busca contribuir para o avanço do conhecimento técnico-científico sobre a reutilização de resíduos gessosos em contextos de infraestrutura sustentável, oferecendo subsídios para práticas construtivas de baixo impacto ambiental.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Solo

O solo empregado corresponde a uma argila calcária representativa dos solos típicos do estado de Sergipe, frequentemente utilizados em construções tradicionais da região Nordeste do Brasil. A escolha do material considerou sua disponibilidade local e seu histórico de aplicação na fabricação de tijolos artesanais. O solo foi coletado junto a

uma cerâmica regional e armazenado em local seco, preservando suas propriedades naturais.

3.1.2 Cimento

O cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) utilizado é composto majoritariamente por clínquer e pequena proporção de calcário, sem adição de escórias ou materiais pozzolânicos. Esse tipo de cimento, conforme classificação da ABNT NBR 16697, apresenta elevada reatividade devido ao alto teor de silicato tricálcico (C_3S), favorecendo o rápido desenvolvimento de resistência mecânica, especialmente nos primeiros dias de cura.

3.1.3 Gesso Reciclado

O gesso reciclado foi obtido a partir de resíduos gerados por empresas de instalação de placas de gesso acartonado. Esse material, originalmente composto por sulfato de cálcio hemidratado ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$), passa a se converter em di-hidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) após o contato com água durante sua aplicação. Para ser incorporado às misturas de solo-cimento, o resíduo passou por um pré-processamento básico que incluiu triagem manual, secagem ao ar, trituração e peneiramento, a fim de garantir uma granulometria compatível com os demais materiais empregados.

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Caracterização dos Materiais de Partida

3.2.1.1 Solo

O solo coletado foi submetido a uma série de técnicas experimentais visando à avaliação de suas propriedades fundamentais para a aplicação em sistemas de solo-cimento.

A distribuição granulométrica foi determinada por peneiramento a seco, conforme os procedimentos da norma ASTM D6913/D6913M, permitindo a classificação textural do material. A massa específica real dos grãos foi obtida por picnometria com o uso de balança de precisão e frascos de vidro, conforme metodologia indicada pelo DNER-ME 093/94.

As propriedades de consistência e plasticidade foram investigadas por meio dos ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade, conforme estabelecido pela norma ASTM D4318, possibilitando a avaliação do comportamento do solo em condições úmidas e sua aptidão para estabilização.

A identificação das fases mineralógicas presentes foi realizada por difração de raios X, técnica que possibilita reconhecer os minerais cristalinos predominantes na amostra. Para isso, utilizou-se radiação $\text{CuK}\alpha$ em varredura contínua no intervalo de 2θ de 5° a 70° .

A composição química elementar do solo foi analisada por espectroscopia de fluorescência de raios X por dispersão de energia, permitindo a quantificação dos óxidos principais, tais como dióxido de silício, óxido de cálcio, óxido de alumínio, entre outros.

A morfologia superficial e a textura das partículas foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura, utilizando modo de elétrons secundários. Associado a essa técnica, empregou-se espectroscopia de energia dispersiva, que permitiu identificar, de forma qualitativa, os elementos presentes nas áreas analisadas.

Por fim, o comportamento térmico do solo foi estudado por meio de análise termogravimétrica (TGA) e sua derivada (DTG), fornecendo informações sobre perdas de massa relacionadas à evaporação de água livre, desidroxilação de argilominerais e decomposição de compostos carbonatados.

3.2.1.2 Cimento

O cimento utilizado foi do tipo CP V-ARI, caracterizado por apresentar alta resistência inicial e ser adequado para sistemas que demandam desempenho precoce. Sua caracterização seguiu os procedimentos adotados para materiais cimentícios, tanto físicos quanto químicos.

O tempo de início e fim de pega foi determinado por meio do ensaio de agulha de Vicat, conforme os critérios definidos na norma ASTM C191, permitindo avaliar a reatividade inicial do cimento com a água.

A massa específica real foi obtida por picnometria, de acordo com a norma ASTM C188, utilizando frascos volumétricos e balança analítica.

A área superficial específica foi determinada por meio do método de permeabilidade ao ar, conhecido como método de Blaine, conforme as orientações da norma NBR 16372, permitindo estimar a finura do cimento e, conseqüentemente, sua reatividade potencial.

A resistência mecânica foi avaliada por meio de ensaio de compressão em corpos de prova prismáticos de pasta de cimento, seguindo a norma ASTM C109/C109M, com idade de ruptura aos sete dias.

A identificação das fases cristalinas presentes no clínquer foi feita por difração de raios X, com foco na detecção das principais fases anidras, como alita (C_3S) e belita (C_2S), que são responsáveis pelas reações de hidratação e ganho de resistência.

A composição química do cimento foi analisada por espectroscopia de fluorescência de raios X, possibilitando a quantificação dos principais óxidos constituintes da matriz cimentícia, essenciais para compreender o desempenho do material em contato com adições minerais, como o gesso.

3.2.1.3 Gesso

O resíduo de gesso empregado neste estudo foi obtido a partir de resíduos sólidos gerados em obras de instalação de placas de gesso acartonado. Antes da caracterização, o material passou por pré-tratamento envolvendo secagem em estufa, trituração, moagem em moinho de bolas e peneiramento na peneira ABNT 75 μm para garantir homogeneidade granulométrica.

A composição mineralógica do gesso resíduo foi determinada por difração de raios X, com o objetivo de identificar a presença de hemidrato ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$), diidrato ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) e fases anidras ($CaSO_4$), componentes que afetam diretamente a reatividade e o comportamento do material em sistemas cimentícios.

A composição química foi obtida por meio de espectroscopia de fluorescência de raios X por dispersão de energia, assim como nos demais materiais, permitindo quantificar os teores de óxido de cálcio, óxido de enxofre, entre outros elementos relevantes.

O comportamento térmico do gesso foi estudado por análise termogravimétrica e sua derivada, possibilitando identificar os eventos de desidratação progressiva das fases hidratadas e a estabilidade térmica do material reciclado.

A área superficial específica foi determinada pelo método de Blaine, permitindo estimar sua finura e capacidade de reação na presença de água e cimento.

A massa específica real do gesso resíduo foi obtida por picnometria, utilizando métodos adaptados para materiais pulverulentos, o que auxiliou na correta dosagem e proporção do material nas misturas experimentais.

Por fim, a metodologia adotada é sintetizada no fluxograma apresentado na Figura 5, evidenciando a sequência lógica dos procedimentos desde a coleta dos materiais até a caracterização final dos compósitos.

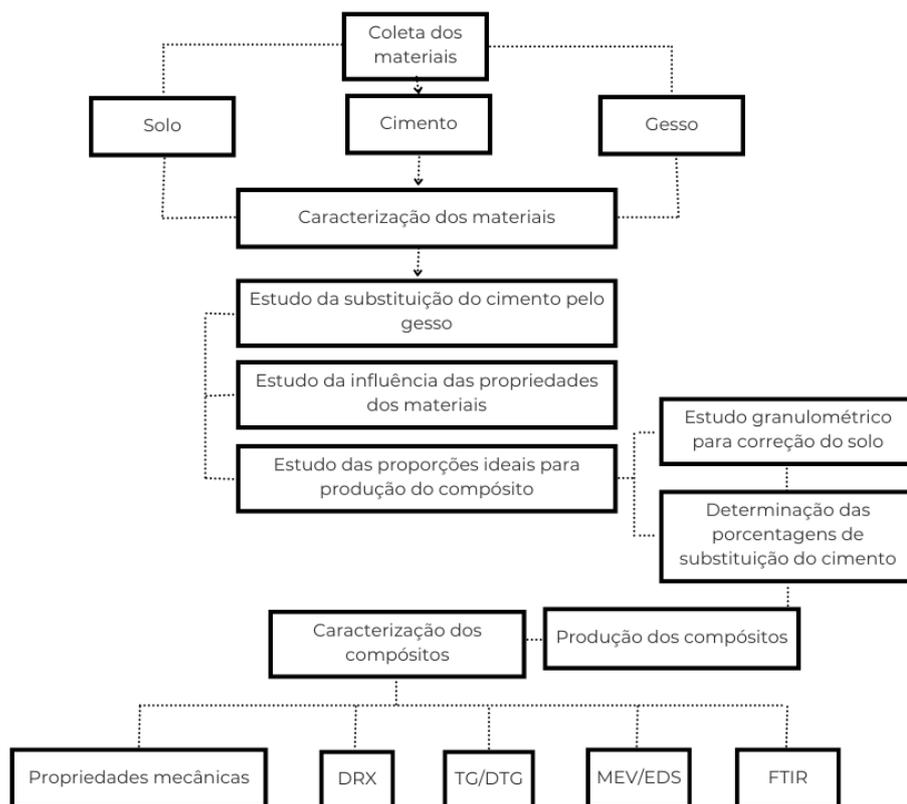


Figura 5. Fluxograma do delineamento experimental.

3.3 PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS

A produção das formulações de solo-cimento com incorporação de resíduo de gesso seguiu um protocolo sistematizado, desenvolvido com base em estudos prévios e normas técnicas. O objetivo foi garantir a homogeneidade das amostras, a reprodutibilidade dos ensaios e a simulação de condições reais de aplicação em canteiros de obras com práticas sustentáveis.

Com o objetivo de estabelecer uma formulação básica adequada para a incorporação do gesso resíduo, foram realizados ensaios preliminares para avaliar diferentes proporções entre solo, areia e cimento. Inicialmente, foi testada uma mistura com 90% de solo e 10% de cimento Portland do tipo CP V-ARI. No entanto, essa composição não atingiu a resistência mínima à compressão (2 MPa) exigida pela NBR 10834 (ABNT, 2022), o que indicou a necessidade de ajustes na granulometria da matriz.

Para contornar essa limitação, foi proposta a substituição parcial do solo por agregado miúdo (areia lavada), variando a proporção de areia entre 0% e 40% da massa total, mantendo constante o teor de cimento em 10%. As amostras foram moldadas com 200 g de massa total, prensadas em moldes cilíndricos com pressão uniaxial de 5 MPa, 10 MPa e 15 MPa, e submetidas ao ensaio de compressão após 7 dias de cura.

A Tabela 4 apresenta as proporções das formulações testadas e seus respectivos teores de areia, enquanto a Figura 6 ilustra os resultados obtidos para resistência à compressão em função da pressão de compactação e da fração de areia incorporada.

Tabela 4 - Composições das formulações preliminares de solo-cimento com variação no teor de areia (% em massa).

Formulação	Solo (%)	Areia (%)	Cimento (%)
F1	90	0	10
F2	80	10	10
F3	70	20	10
F4	50	40	10

Fonte: O Autor, 2025

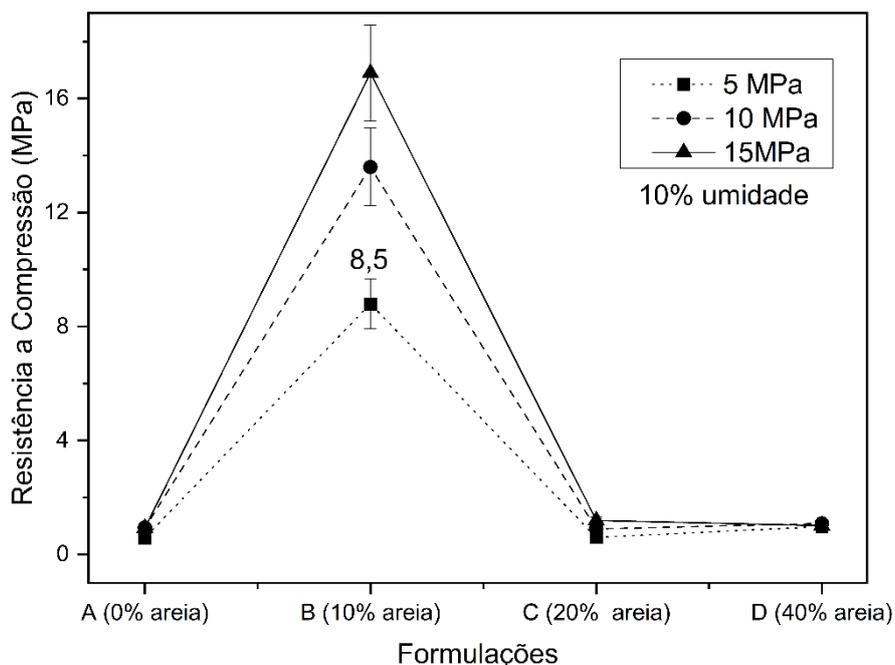


Figura 6. Resistência à compressão das formulações com diferentes teores de areia (0%, 10%, 20% e 40%) e sob três níveis de compactação (5 MPa, 10 MPa e 15 MPa), todos com 10% de umidade. Observa-se que a formulação com 10% de areia apresentou o melhor desempenho mecânico em todos os níveis de pressão aplicada.

Fonte: O Autor, 2025

Os resultados indicaram que a formulação composta por 80% de solo, 10% de areia e 10% de cimento, compactada sob pressão de 10 MPa, apresentou o melhor desempenho mecânico, conciliando resistência adequada, boa trabalhabilidade e densidade homogênea. Dessa forma, essa composição foi adotada como formulação base (SF) para os ensaios com adição do gesso resíduo.

3.3.1 Definição das Proporções e Formulações

A partir da formulação padrão estabelecida na etapa anterior, foram elaboradas cinco novas composições, incorporando o gesso resíduo como substituto parcial do cimento Portland. A substituição foi realizada em termos de massa, mantendo constantes as proporções de solo (80%) e areia (10%), e variando os teores de cimento e gesso conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Composições das formulações experimentais com substituição do cimento por gesso (% em massa).

Formulação	Solo (%)	Areia (%)	Cimento (%)	Gesso (%)
SF	80	10	10	0
G5	80	10	9.5	0.5
G10	80	10	9.0	1.0
G20	80	10	8.0	2.0
G40	80	10	6.0	4.0

Fonte: O Autor, 2025

A adoção dessas proporções teve como objetivo analisar o impacto da substituição progressiva do cimento pelo gesso nas propriedades mecânicas, de absorção, durabilidade e microestrutura dos compósitos.

3.3.2 Pesagem e Preparação dos Materiais

Os materiais em cada traço foram pesados utilizando balança de precisão, respeitando rigorosamente as proporções estabelecidas. O solo, previamente seco e peneirado, passando na peneira ABNT 600 µm foi utilizado em estado natural após caracterização. A areia foi empregada como agregado fino, com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade e a estrutura granular da mistura. O cimento e o gesso, também previamente caracterizados quanto à sua finura, densidade e composição mineralógica, foram utilizados em estado seco.

A homogeneização inicial foi realizada a seco, em bandejas metálicas, com movimentos circulares e alternados por aproximadamente 3 a 5 minutos, garantindo a distribuição uniforme dos componentes pulverulentos. Essa etapa é fundamental para promover uma mistura eficiente entre o solo, o cimento e o gesso, evitando a formação de aglomerados que possam comprometer a coesão e o desempenho do compósito.

3.3.3 Adição de Água e Homogeneização

Após a mistura seca, foi adicionada água potável à temperatura ambiente, em quantidade suficiente para atingir uma umidade próxima a 10% da massa total da mistura, valor comumente adotado em formulações de solo-cimento prensado (ABCP, 1986). A água foi adicionada aos poucos, enquanto a mistura era manualmente revolvida até atingir uma consistência plástica, homogênea e de boa trabalhabilidade. A mistura úmida foi então repousada por alguns minutos para garantir a hidratação inicial dos componentes cimentícios.

Essa etapa de amassamento e hidratação é crucial para o início das reações químicas de hidratação do cimento e interação com os minerais do solo, além de permitir melhor distribuição da água nos poros do sistema granular.

3.3.4 Moldagem dos Corpos de Prova

Com a mistura preparada, procedeu-se à moldagem dos corpos de prova. Os espécimes foram moldados em formato cilíndrico, com massa total de 200 g e dimensões aproximadas de 6,0 cm de diâmetro por 4,0 cm de altura (Figura 7). A compactação foi realizada por prensagem uniaxial a 10 MPa, utilizando uma prensa hidráulica manual (Figura 8). A aplicação dessa pressão garante boa densificação da matriz, reduz a porosidade inicial e favorece a formação de zonas de transição interfacial mais coesas.



Figura 7. Corpos de prova cilíndricos (6,0 × 4,0 cm) moldados com diferentes proporções de solo, cimento e gesso reciclado. As amostras foram identificadas e organizadas para cura natural antes da realização dos ensaios físico-mecânicos.

Fonte: O Autor, 2025



Figura 8. Prensa hidráulica manual utilizada na moldagem dos corpos de prova cilíndricos.

Fonte: O Autor, 2025

A escolha do formato e dimensões dos corpos de prova foi baseada na literatura e nas limitações do equipamento disponível, mantendo-se uma relação altura/diâmetro compatível com os requisitos dos ensaios mecânicos de compressão.

3.3.5 Processo de Cura

Após a moldagem, os corpos de prova foram cuidadosamente removidos dos moldes e armazenados em ambiente protegido, livre de radiação solar direta, ventos e variações bruscas de temperatura. A cura foi conduzida em condições naturais, representativas do clima da região de Sergipe, com temperaturas médias de aproximadamente 25 °C e umidade relativa do ar entre 70% e 82%. Esse método simula as condições práticas de exposição em campo, conforme recomendação da norma NBR 8492.

A cura foi realizada por dois períodos distintos: 7 e 28 dias. Esses intervalos foram selecionados com base nos critérios normativos e nos objetivos do estudo, permitindo a avaliação do desenvolvimento da resistência mecânica inicial e da resistência final estabilizada. Durante esse período, as amostras foram inspecionadas periodicamente para garantir que não apresentassem fissuras, exsudação ou outros sinais de deterioração prematura.

3.3.6 Número de Amostras e Repetibilidade

Para garantir a reprodutibilidade dos resultados e a validade estatística das análises, foram moldados múltiplos corpos de prova para cada formulação e cada ensaio. Especificamente, foram preparados cinco corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão e três corpos de prova para os ensaios de absorção de água, densidade aparente e durabilidade. Esses valores estão de acordo com os requisitos mínimos definidos pelas normas brasileiras aplicáveis, assegurando confiabilidade nos resultados obtidos.

3.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES

A caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa foi conduzida de forma abrangente, com o objetivo de compreender suas propriedades físico-químicas, mineralógicas, morfológicas e térmicas. As análises foram aplicadas aos três componentes principais: solo, cimento e gesso resíduo. A seguir, são descritas detalhadamente as técnicas e metodologias empregadas.

3.4.1 Difração de Raios X (DRX)

A análise mineralógica dos materiais foi realizada por difração de raios X (DRX), técnica utilizada para identificar qualitativamente e, em alguns casos, estimar quantitativamente as fases cristalinas presentes nas amostras. O equipamento utilizado foi um difratômetro Rigaku DMAX 100, operando com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), em regime de varredura contínua no intervalo de 2θ de 5° a 70° , com taxa de varredura de 1° por minuto.

As amostras foram previamente secas, pulverizadas em almofariz e acondicionadas em porta-amostras planos. A identificação das fases foi realizada por comparação com os padrões da base de dados ICSD (Inorganic Crystal Structure Database). Esta análise permitiu identificar os principais constituintes mineralógicos do solo (ex.: quartzo, calcita, illita), os compostos anidros do cimento (alite, belita) e as fases presentes no gesso (hemidrato, diidrato e anidrita).

3.4.2 Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia (EDXRF)

A composição química elementar dos materiais foi determinada por meio de espectroscopia de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF). As análises foram realizadas com espectrômetro Shimadzu EDX-7000, operando sob vácuo, com cápsulas de filme de Mylar e colimador de 10 mm. As tensões aplicadas foram de 50 kV (para elementos com número atômico elevado) e 15 kV (para elementos leves), com

tempo de aquisição de 100 segundos e controle de tempo morto de aproximadamente 30%.

Essa técnica possibilitou a identificação e quantificação, em percentual mássico, dos principais óxidos presentes, como SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 , K_2O , entre outros, fundamentais para interpretar a reatividade dos materiais e suas contribuições nas reações de hidratação e formação de fases cimentícias.

3.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

A morfologia e microestrutura das amostras foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando o equipamento JEOL JSM-6510LV, operando com tensão de aceleração de 15 kV, em modo de detecção de elétrons secundários (SEI), sob alto vácuo. As amostras foram secas, fraturadas manualmente para exposição da superfície interna, montadas em stubs metálicos com fita condutiva de carbono e recobertas com uma fina camada de ouro por meio de sputtering, a fim de garantir boa condutividade elétrica e qualidade de imagem.

A composição química pontual e a distribuição dos elementos nas superfícies analisadas foram determinadas por meio do sistema de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) acoplado ao MEV. Essa técnica permitiu identificar qualitativamente a presença de elementos como Ca, Si, Al, Fe, Mg, entre outros, reforçando os resultados obtidos por EDXRF e DRX, além de evidenciar a formação de fases como C-S-H, etringita e resíduos não reagidos.

3.4.4 Termogravimetria (TGA/DTG)

Para a análise do comportamento térmico dos materiais, especialmente do gesso e do solo, foi empregada a análise termogravimétrica (TGA) e sua derivada de perda de massa (DTG), utilizando um analisador TA Instruments SDT Q600. As amostras (aproximadamente 10 mg) foram submetidas a aquecimento em atmosfera de nitrogênio, em cadinhos de platina, com taxa de aquecimento de $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, até a temperatura final de $1000\text{ }^\circ\text{C}$.

Essa técnica permitiu identificar os eventos de desidratação das fases gipsíticas (transformação de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ para $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ e anidrita), bem como a liberação de água associada aos argilominerais e decomposição de carbonatos no solo. Foi particularmente importante para confirmar a presença de impurezas e avaliar a estabilidade térmica do gesso resíduo reciclado.

3.4.5 Determinação da Área Superficial Específica (Método de Blaine)

A área superficial específica dos materiais pulverulentos foi determinada por permeabilidade ao ar, utilizando o método de Blaine, conforme estabelecido pela NBR 16372 (ABNT, 2015). Essa propriedade influencia diretamente a velocidade de hidratação dos materiais cimentícios e o grau de reatividade das partículas finas.

As medições foram realizadas em câmara de permeabilidade calibrada, com amostras secas e compactadas em corpo de prova cilíndrico de altura e porosidade controladas. Os tempos de passagem do ar foram registrados e comparados a padrões de referência para obtenção da área específica (em cm^2/g). A técnica foi aplicada ao cimento, gesso e solo.

3.4.6 Determinação da Densidade Real e Densidade Aparente

A massa específica real dos grãos foi determinada conforme a metodologia descrita na norma ABNT NBR 7181 (2016), no caso do solo, e por meio de um método adaptado para materiais pulverulentos, como gesso e cimento, empregando-se picnômetro de vidro e balança de precisão. A densidade aparente, por sua vez, foi calculada com base na razão entre a massa seca e o volume ocupado pelo material solto, depositado em recipiente padronizado, sem compactação.

Esses parâmetros são fundamentais para o controle de dosagem nas misturas e para estimativas de empacotamento, porosidade e desempenho mecânico final.

3.4.7 Análise Granulométrica

A distribuição de tamanho de partículas foi avaliada por peneiramento a seco, conforme a norma ASTM D6913/D6913M. As amostras de solo, cimento e gesso foram secas, pesadas e submetidas a agitação mecânica em pilha de peneiras com aberturas padronizadas, incluindo a malha nº 200 (0,075 mm), cuja fração passante é crítica para a classificação como solo adequado ao solo-cimento.

A curva granulométrica foi traçada para cada material, permitindo avaliar o empacotamento, o índice de uniformidade e a adequação à produção de compósitos densos e de baixa absorção.

3.4.8 Ensaios de Plasticidade (Solo)

As propriedades de plasticidade do solo foram determinadas conforme a norma ASTM D4318, por meio dos ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP). A partir desses valores, foi calculado o índice de plasticidade (IP), que fornece

indicação sobre o comportamento do solo em presença de água, sua tendência à retração e à fissuração, e sua viabilidade para uso em estabilização com cimento.

Essas propriedades são cruciais para avaliar a trabalhabilidade, a estabilidade dimensional e o desempenho mecânico das misturas solo-cimento.

3.5 ENSAIOS MECÂNICOS, FÍSICOS E DE DURABILIDADE

Após os períodos de cura de 7 e 28 dias em ambiente protegido, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples, absorção de água e massa específica aparente, conforme os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 8492 (ABNT, 2012). Esses ensaios permitiram avaliar o desempenho físico-mecânico das formulações com diferentes teores de substituição de cimento por gesso resíduo, considerando tanto o estágio inicial quanto a maturidade do compósito.

Para avaliação da durabilidade, foi aplicado o método de ciclos de molhagem e secagem, de acordo com os critérios da NBR 13554 (ABNT, 1996). Esse ensaio visa simular a exposição a ambientes alternadamente úmidos e secos, característicos de muitas regiões brasileiras, permitindo verificar a resistência do material à degradação por fadiga hídrica. Os corpos de prova foram submetidos a sucessivos ciclos, com controle da integridade física e variações de massa entre as etapas, seguindo o protocolo normativo.

Os dados obtidos nesses ensaios forneceram subsídios para avaliar a viabilidade técnica do uso do gesso reciclado como adição mineral em compósitos de solo-cimento, considerando aspectos fundamentais para sua aplicação prática na construção civil.

3.6 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO TIJOLO DE SOLO-CIMENTO

Os ensaios de resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento foram realizados conforme as orientações da NBR 8492 (ABNT, 2012), que estabelece os procedimentos para análise dimensional, determinação da resistência à compressão e absorção de água desses elementos. Após o processo de prensagem, os tijolos passaram por um período de cura de 28 dias. Em seguida, foram submetidos ao preparo necessário para o ensaio.

Inicialmente, cada tijolo foi seccionado ao meio, em corte perpendicular ao seu comprimento, utilizando-se uma serra elétrica de bancada. As duas metades obtidas foram posicionadas com as faces cortadas voltadas uma para a outra e coladas com uma fina camada de pasta de cimento Portland, previamente maturada por cerca de 30 minutos, de

modo a garantir resistência compatível com a da matriz. A espessura da camada foi mantida entre 2 e 3 mm.

Antes do rompimento, verificou-se se as superfícies das metades estavam planas e paralelas, conforme exigido pela norma, assegurando o contato uniforme com os pratos da prensa. Ressalta-se que os furos centrais dos tijolos não foram preenchidos durante o capeamento. Após 12 horas de endurecimento da pasta, os prismas foram ensaiados mecanicamente.

A Figura 9 ilustra as principais etapas do preparo e do ensaio de compressão simples, conduzido com o auxílio de uma prensa hidráulica modelo Contenco HD-200T.





Figura 9. Etapas realizadas para ensaio de resistência à compressão. Corte dos tijolos ao meio; Capeamento das partes; Máquina utilizada para realizar o ensaio de resistência à compressão
Fonte: O Autor, 2025

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A fim de conferir robustez à interpretação dos resultados experimentais, os dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e absorção de água foram submetidos a tratamento estatístico. Primeiramente, avaliou-se a normalidade da distribuição dos dados, utilizando o critério de Shapiro-Wilk, a fim de validar a aplicação de testes paramétricos.

Em seguida, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) unidirecional para examinar a influência das diferentes proporções de substituição do cimento pelo gesso reciclado (0%, 5%, 10%, 20% e 40%) sobre as propriedades físico-mecânicas dos compósitos, analisadas em dois períodos distintos de cura. A hipótese nula (H_0) assumiu que não havia diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos grupos, enquanto a hipótese alternativa (H_1) indicava que pelo menos uma das médias se diferenciava significativamente.

A estatística F da ANOVA foi calculada por meio da seguinte equação:

$$F = \frac{QM_{entre}}{QM_{dentro}} = \frac{SQ_{entre} / gl_{entre}}{SQ_{dentro} / gl_{dentro}}$$

Onde:

- SQ_{entre} é a soma dos quadrados entre os grupos;
- SQ_{dentro} é a soma dos quadrados dentro dos grupos (resíduo);

- QM é o quadrado médio (SQ dividido pelos graus de liberdade);
- gl representa os graus de liberdade.

Nos casos em que a ANOVA indicou significância estatística ($p < 0,05$), foi aplicado o teste de comparações múltiplas de Tukey, que permite identificar quais pares de formulações apresentavam diferenças estatisticamente relevantes entre si. O valor crítico de Tukey (q) foi calculado com base na fórmula:

$$q = \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_j}{\sqrt{QM_{dentro}/n}}$$

Onde:

- $\bar{x}_i - \bar{x}_j$ são as médias das formulações comparadas;
- QM_{dentro} é o quadrado médio do erro (obtido na ANOVA);
- n é o número de observações por grupo.

Todas as análises estatísticas foram realizadas no software Microsoft Excel, utilizando um nível de significância de $\alpha = 0,05$. A adoção dessas ferramentas estatísticas garantiu a confiabilidade dos resultados e a consistência científica das interpretações apresentadas ao longo do trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROPRIEDADES DO SOLO

4.1.1 Físico-Geotécnicas

A Figura 10 apresenta a análise granulométrica, realizada por peneiramento a seco, indicou que o solo utilizado apresenta distribuição predominantemente arenosa, com presença significativa de partículas finas (inferiores a 0,075 mm). Solos com distribuição granulométrica bem equilibrada, com adequada proporção entre areia, silte e argila, tendem a melhorar as propriedades mecânicas dos tijolos de solo-cimento. Lopes et al. (2022), que observaram redução na absorção de água e incremento na resistência à compressão de blocos confeccionados com solos nessas condições.

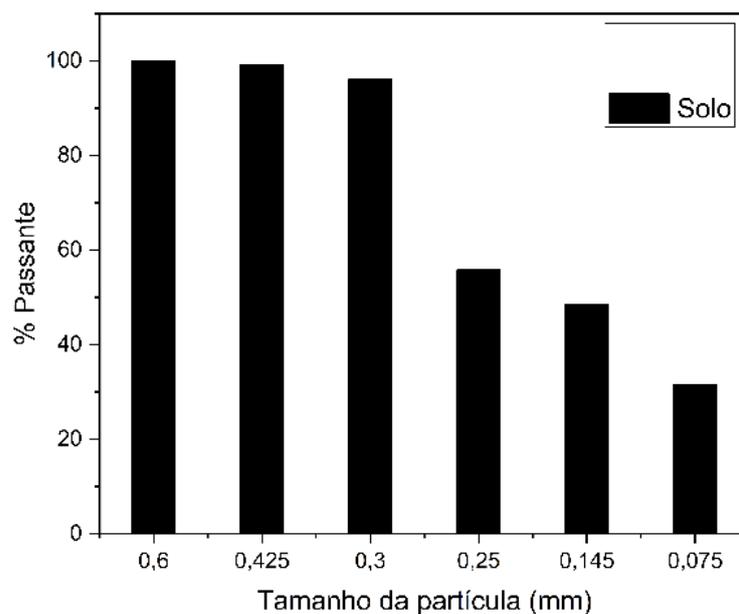


Figura 10. Distribuição granulométrica do solo obtida por peneiramento a seco, conforme ASTM D6913/D6913M. Observa-se predominância de frações arenosas e presença significativa de partículas finas.

Fonte: O Autor, 2025

A Tabela 6 apresenta os resultados das propriedades físicas do solo utilizado, constando a massa específica real, determinada por picnometria, apresentou valor típico de solos residuais calcários, refletindo a presença de minerais densos como a calcita. Por outro lado, os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP), determinados conforme a norma ASTM D4318, indicaram um índice de plasticidade (IP) de 8%, classificando o solo como de baixa plasticidade.

Tabela 6 – Propriedades físicas do solo utilizado

Propriedade	Valor Obtido	Unidade
Limite de Liquidez (LL)	29,84	%
Limite de Plasticidade (LP)	21,68	%
Índice de Plasticidade (IP = LL – LP)	8,16	—
Massa Específica Real (p _{real})	2,73	g/cm ³
Densidade Aparente	1,56	g/cm ³
Área Superficial Específica (Blaine)	4570	cm ² /g

Fonte: O Autor, 2025

4.1.2 Composição Química

A Tabela 7 apresenta a composição química do solo, realizada por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX), e reportada na forma de óxidos. O solo foi seco em estufa a 105 °C por 24 horas, moído em almofariz de porcelana até obtenção de pó fino e peneirado em malha ABNT 200 (75 µm), assegurando granulometria uniforme para análise elementar. Observam-se teores significativos de dióxido de silício (SiO₂ – 34,58%), óxido de cálcio (CaO – 20,18%) e óxido de ferro (Fe₂O₃ – 16,20%), além de menores proporções de Al₂O₃, MgO e K₂O. A predominância de SiO₂ é típica de solos com alta fração de quartzo, o que contribui para a estabilidade granulométrica e reduz a plasticidade dos compósitos. O alto teor de CaO indica a presença de minerais carbonáticos, como a calcita, cuja interação com o cimento pode favorecer a formação de produtos de hidratação e melhorar o desempenho mecânico dos materiais. Esses resultados são coerentes com os dados reportados por Gonçalves et al. (2023), que identificaram relações positivas entre a presença de óxidos silicatados e a eficiência de estabilização em solos argilosos tratados com ligantes hidráulicos. Além disso, a análise de Ishikawa e Fujii (2007) enfatiza a relevância da composição mineralógica na formação de estruturas cimentícias secundárias, o que reforça o papel das fases minerais presentes no solo estudado sobre o desempenho final do material estabilizado.

Tabela 7 – Composição química do solo que foi seco em estufa a 105 °C por 24 horas, moído em almofariz de porcelana até obtenção de pó fino e peneirado em malha ABNT 200 (75 µm), assegurando granulometria uniforme para análise elementar, reportada na forma de óxidos (% em massa), em consonância com as normas técnicas utilizadas para esse tipo de análise.

Símbolo	Teor (%)
SiO ₂	34,58
CaO	20,18
Fe ₂ O ₃	16,20
Al ₂ O ₃	8,35
MgO	3,98
K ₂ O	1,80
SO ₃	0,91
Perda ao Fogo (LOI)	14,00

Fonte: Dados experimentais obtidos por EDXRF. Valores arredondados para duas casas decimais.

4.1.3 Mineralogia

A análise por difração de raios X (DRX) (apresentada na Figura 11) confirmou a presença de quartzo (SiO_2) (ICSD 89280) como fase cristalina dominante, seguida por calcita (CaCO_3) (ICSD 166966) e argilominerais como illita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) (ICSD 169911). O quartzo, por ser um mineral quimicamente inerte, contribui para a estabilidade dimensional e resistência ao desgaste dos materiais. A calcita participa de reações secundárias, como a carbonatação da portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), promovendo o selamento de poros e aumentando a durabilidade do material. Os argilominerais, por sua vez, influenciam na retenção de água e na reatividade superficial, especialmente nas fases iniciais da cura. A caracterização mineralógica do solo é relevante não apenas para a compreensão do comportamento físico-químico dos solos estabilizados, mas também para a previsão de possíveis interações com contaminantes ou aditivos durante o processo de cura (Vipulanandan e Mohammed , 2016).

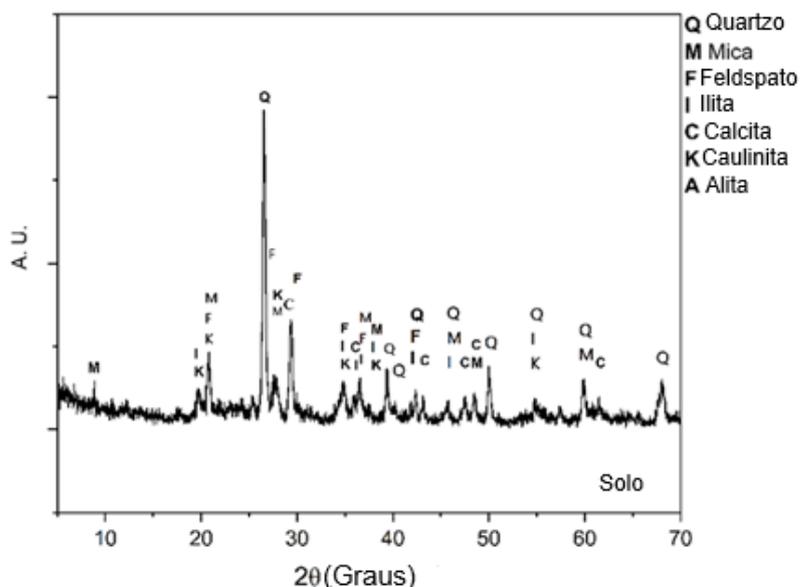


Figura 11. Difratograma de raios X do solo analisado, indicando as principais fases cristalinas identificadas: quartzo (Q), mica (M), feldspato (F), illita (I), calcita (C), caulinita (K) e alita (A). A análise foi realizada com radiação $\text{CuK}\alpha$ no intervalo de 2θ de 5° a 70° .

Fonte: O Autor, 2025

4.1.4 Comportamento Térmico

A aplicação da análise termogravimétrica (TG) neste estudo justifica-se pela necessidade de compreender o comportamento térmico dos materiais constituintes dos compósitos, especialmente o solo e o resíduo de gesso incorporado. Como o gesso

reciclado apresenta fases hidratadas e sulfatadas com diferentes estabilidades térmicas, a TG permite identificar com precisão as faixas de temperatura associadas à perda de água adsorvida, desidroxilação de argilominerais e decomposição de carbonatos, fornecendo informações relevantes sobre a composição mineralógica e o grau de hidratação das amostras.

Além disso, essa técnica é fundamental para verificar a presença e estabilidade de fases como a calcita (CaCO_3), a portlandita (Ca(OH)_2) e possíveis produtos de reação entre o cimento e o gesso, como a etringita. A identificação das temperaturas características de decomposição dessas fases auxilia na interpretação da durabilidade térmica dos compósitos, bem como no controle da reatividade dos resíduos empregados. A TG, portanto, contribui diretamente para a avaliação da viabilidade técnica do uso do gesso reciclado como substituição parcial do cimento, fornecendo subsídios para otimizar a formulação e garantir estabilidade do material em longo prazo.

A figura 12 apresenta a análise termogravimétrica (TGA/DTG) que evidenciou perdas de massa distribuídas em diferentes faixas de temperatura. A análise termogravimétrica (TG) aplicada a compósitos cimentícios e solos calcários permite identificar diferentes faixas de perda de massa, associadas a transformações físico-químicas específicas. Entre $50\text{ }^\circ\text{C}$ e $150\text{ }^\circ\text{C}$, ocorre a liberação da água livre e adsorvida, característica de materiais porosos (Zhuang et al., 2025). Já na faixa de $400\text{ }^\circ\text{C}$ a $600\text{ }^\circ\text{C}$, observa-se a desidroxilação dos argilominerais, como caulinita e illita, com liberação das hidroxilas estruturais, marcando a decomposição térmica de fases hidratadas presentes na matriz cimentícia.

Entre $700\text{ }^\circ\text{C}$ e $850\text{ }^\circ\text{C}$, identifica-se a decomposição da calcita (CaCO_3), que gera óxido de cálcio (CaO) e libera dióxido de carbono (CO_2), fenômeno típico de sistemas com alto teor de carbonatos. Essa etapa é particularmente importante para materiais com presença de solo calcário ou cimento Portland. Estudos indicam que essa reação exige energia de ativação da ordem de $232\text{--}234\text{ kJ/mol}$, sendo influenciada pela atmosfera reacional e pela taxa de aquecimento aplicada durante a análise (Mianowski & Bigda, 2025).

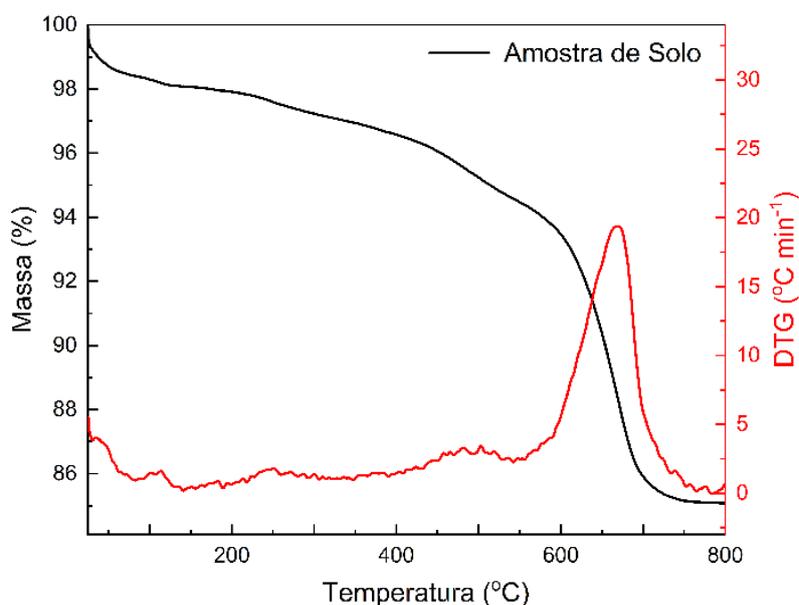


Figura 12. Curvas termogravimétrica (TG) e derivada (DTG) do solo analisado. Observa-se a perda de massa associada à liberação de água adsorvida (50–150 °C), desidroxilação de argilominerais (400–600 °C) e decomposição térmica da calcita (700–850 °C).

Fonte: O Autor, 2025

4.2 PROPRIEDADES DO CIMENTO

4.2.1 Físicas

A Tabela 8 resume as propriedades físicas e mecânicas do cimento CP V-ARI. A massa específica real do cimento, de $3,10 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, está dentro da faixa típica de cimentos Portland ($3,10\text{--}3,15 \text{ g/cm}^3$), o que indica uma composição mineralógica adequada, dominada por silicatos e aluminatos de cálcio (Neville, 2012). Essa propriedade é fundamental para o cálculo do traço da mistura e afeta diretamente a densidade da matriz endurecida. Já a massa específica aparente, de $1,40 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, está relacionada ao empacotamento das partículas em estado seco e influencia o transporte, armazenamento e dosagem volumétrica dos materiais.

A área superficial específica é um parâmetro determinante na avaliação da reatividade do cimento Portland, sendo geralmente medida pelo método de Blaine. Valores elevados, como os registrados por Huang et al. (2025), em torno de $4400 \pm 120 \text{ cm}^2/\text{g}$, indicam partículas mais finas, com maior superfície de contato disponível para reação. Essa característica favorece o início da hidratação, intensificando

a formação do gel de silicato de cálcio hidratado (C–S–H), essencial para o desenvolvimento da resistência mecânica nos primeiros dias.

Estudos recentes mostraram que a incorporação de partículas sintéticas ultrafinas de C–S–H, com diâmetro médio inferior a 25 nm, pode acelerar a taxa de hidratação nas primeiras 24 horas, funcionando como núcleos ativos para crescimento das fases hidratadas (Huang et al., 2025). Nesse contexto, o uso de sistemas híbridos contendo C–S–H e superplastificante à base de policarboxilato (PCE) tem demonstrado potencial para melhorar o desempenho inicial de cimentos de baixo carbono, com ganhos em eficiência mecânica e sustentabilidade (Wang & Plank, 2024).

Essa característica é reforçada pela caracterização por peneiramento, com 0,07% de retenção na peneira 75 μm , o que demonstra uma moagem eficiente e homogênea, contribuindo para uma matriz cimentícia mais densa e reativa. Esses parâmetros indicam uma matriz cimentícia potencialmente mais densa, contínua e reativa, com impacto positivo sobre o desempenho estrutural do material.

A consistência normal, determinada em 36%, fornece a relação água/cimento necessária para produzir uma pasta com plasticidade adequada para ensaios e aplicação prática. Uma consistência adequada favorece a trabalhabilidade da mistura solo-cimento, otimizando o adensamento e a compactação durante a moldagem dos corpos de prova. O valor observado está em conformidade com cimentos de alta finura, que demandam maior teor de água para atingir a consistência padrão (Neville, 2012).

O tempo de início de pega, registrado em 129 minutos, encontra-se dentro dos limites estabelecidos pelas normas técnicas para cimentos de alta resistência inicial (ASTM C191). Esse intervalo é crucial para garantir tempo hábil de manuseio e aplicação antes do início do enrijecimento da pasta. Um tempo de pega adequadamente dimensionado evita falhas na moldagem e assegura uniformidade na produção de tijolos, principalmente em sistemas de produção manual ou semiautomática.

Por fim, a resistência à compressão aos 7 dias, de 35,2 MPa, comprova o alto desempenho mecânico do CP V-ARI. Este valor está acima do mínimo exigido para cimentos dessa classe (≥ 26 MPa aos 7 dias, conforme a NBR 16697:2018), o que demonstra sua elevada reatividade. Em produtos como tijolos de solo-cimento, essa propriedade é determinante para assegurar a integridade estrutural da peça em fases iniciais de uso e durante o manuseio e transporte.

Portanto, os resultados obtidos mostram que o CP V-ARI utilizado nesta pesquisa apresenta propriedades físicas e mecânicas ideais para formulações de solo-cimento,

promovendo hidratação eficiente, boa trabalhabilidade e elevada resistência precoce, essenciais para garantir qualidade, desempenho e durabilidade das peças produzidas.

Tabela 8 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP V-ARI utilizadas nas formulações de solo-cimento. Os ensaios seguiram as normas técnicas aplicáveis para caracterização de materiais cimentícios.

Características	Valor	Unidade
Massa específica real	3,10 ± 0,02	g/cm ³
Massa específica aparente	1,40 ± 0,02	g/cm ³
Área superficial específica (Blaine)	4400 ± 120	cm ² /g
Índice de finura	0,07	% retido na peneira
Consistência normal	36	%
Tempo de início de pega	129	minutos
Resistência à compressão (7 dias)	35,2	MPa

Fonte: O Autor, 2025.

4.2.2 Composição química – FRX

A composição elementar do cimento foi determinada por fluorescência de raios X com dispersão de energia (FRX). A Tabela 9 apresenta os teores dos principais óxidos constituintes. O óxido de cálcio (CaO), presente em elevado teor (80,95%), é o principal constituinte dos silicatos tricálcicos (C₃S) e dicálcicos (C₂S), responsáveis pela resistência mecânica do cimento. Durante a hidratação, esses compostos reagem com a água para formar o gel de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e portlandita (Ca(OH)₂). O C-S-H, por sua vez, constitui a principal fase responsável pela coesão da matriz e pelo ganho de resistência mecânica. A literatura aponta que altos teores de CaO favorecem a nucleação e o crescimento dessa fase, sobretudo quando associados a partículas finas ou aditivos nucleantes, acelerando o desenvolvimento da resistência nas primeiras idades (Huang et al., 2025; Xia et al., 2025).

A abundância de CaO indica alto potencial de reatividade e desenvolvimento de resistência precoce, típico do cimento CP V-ARI.

O dióxido de silício (SiO₂), com teor de 8,46%, participa da formação dos aluminossilicatos hidratados e do próprio C-S-H. Além disso, o SiO₂ pode reagir com a portlandita em reações pozolânicas secundárias, especialmente em matrizes contendo adições minerais ou resíduos com caráter pozolânico, como solos argilosos ricos em alumínio e sílica amorfa (Mindess et al., 2003).

O óxido de ferro (Fe₂O₃), com 5,95%, contribui para a formação de ferritas cálcicas, como o C₄AF (aluminoferrita tetracálcica), que influenciam a coloração do cimento e reagem com o gesso para formar etringita em estágios iniciais da hidratação.

Embora sua contribuição para a resistência seja secundária, sua presença afeta a evolução térmica e a velocidade das reações (Scrivener et al., 2018).

A presença de trióxido de enxofre (SO_3), identificado em concentração de 2,06% na composição do cimento analisado, está relacionada à adição deliberada de gesso durante a moagem do clínquer. Essa prática visa controlar o tempo de pega, retardando a reação imediata do aluminato tricálcico (C_3A) com a água e promovendo a formação gradual de etringita durante as primeiras etapas da hidratação.

Segundo Ponduru et al. (2025), a adição de gesso em teores de até 12% favorece a nucleação da etringita sem comprometer a resistência mecânica inicial, mesmo em formulações com substituição parcial por calcário. Além disso, Yang et al. (2024) destacam que a interação entre gesso e C_3A afeta significativamente a trabalhabilidade do sistema cimentício, uma vez que a precipitação de etringita em morfologia acicular eleva a área superficial e acelera a perda de fluidez. Dessa forma, o controle rigoroso do teor de SO_3 é essencial para garantir equilíbrio entre o desempenho mecânico e reológico do compósito.

O óxido de potássio (K_2O), presente em 1,60%, é classificado como um óxido alcalino. Em conjunto com o Na_2O , influencia a alcalinidade da solução intersticial e pode reagir com sílicas reativas em agregados, promovendo reações deletérias (REA – Reação Álcali-Sílica). No entanto, em misturas solo-cimento com baixo teor de cimento e agregados predominantemente inertes, esse risco é minimizado (Neville, 2012).

A análise química revelou a presença de dióxido de titânio (TiO_2) em uma concentração de 0,37%, possivelmente associado a minerais como rutilo ou anatásio presentes nas matérias-primas utilizadas na produção do clínquer. Embora presente em quantidades acessórias, o TiO_2 pode atuar como agente nucleante, promovendo o refinamento da microestrutura do cimento. O estudo de Diamantopoulos et al. (2020) demonstrou que a adição de TiO_2 acelera a formação do gel de hidratação nas fases iniciais, reduzindo a porosidade capilar e melhorando as propriedades mecânicas do cimento. No entanto, em estágios posteriores, o TiO_2 pode dificultar a continuidade da hidratação ao restringir o acesso da água a grãos de cimento não hidratados, indicando que seus efeitos são mais pronunciados durante as primeiras fases de cura.

A perda ao fogo (LOI), de 0,61%, representa a quantidade de compostos voláteis ou material orgânico residual que se decompõem durante o aquecimento. Valores baixos, como o observado, indicam boa estabilidade térmica e baixo teor de impurezas, o que é

desejável para garantir a previsibilidade das reações de hidratação e a durabilidade do material (Taylor, 1997).

Em conjunto, a composição química observada confirma que o cimento CP V-ARI apresenta um perfil adequado para aplicações em compósitos solo-cimento. Seu elevado teor de CaO e a presença equilibrada de SiO₂ e SO₃ favorecem reações de hidratação rápidas, elevada resistência inicial e controle adequado da pega, aspectos fundamentais para garantir o desempenho técnico dos blocos produzidos neste estudo.

Tabela 9 - Composição química do cimento CP V-ARI utilizado nas formulações de solo-cimento.

Óxido	Teor (% m/m)
CaO	80,95
SiO ₂	8,46
Fe ₂ O ₃	5,95
SO ₃	2,06
K ₂ O	1,60
TiO ₂	0,37
Perda ao fogo	0,61

Fonte: O Autor, 2025.

4.2.3 Análise mineralógica – DRX

A Figura 13 apresenta o difratograma de raios X do cimento CP V-ARI, analisado na faixa de 2θ entre 5° e 70°, que evidencia a presença das principais fases cristalinas do clínquer Portland. Foram identificadas as fases alita (C₃S) (ICSD 162744), larnita (C₂S) (ICSD 39006) e calcita (CaCO₃), com destaque para a predominância de picos característicos dessas fases entre $2\theta \approx 29^\circ$ e 60° .

Os picos mais intensos foram associados à alita (C₃S), com reflexões típicas nos ângulos $2\theta \approx 32.1^\circ$ e 34.3° , confirmando a elevada proporção dessa fase no cimento analisado. A alita é responsável pelo desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, sendo a principal fase reativa em cimentos do tipo ARI (Alta Resistência Inicial). Estudos como os de Bullard et al. (2011) e Cuesta et al. (2018) destacam que a alita (C₃S), ao reagir com água, origina o gel de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e portlandita (Ca(OH)₂), sendo o C-S-H o principal responsável pela resistência mecânica do cimento. Essa reação ocorre de forma relativamente rápida, especialmente nas primeiras idades, o que explica o desenvolvimento inicial da resistência observado neste estudo.

A presença de larnita (C_2S) é confirmada por picos secundários em $2\theta \approx 33.5^\circ$, 47.3° , 51.8° e 59.6° . Essa fase contribui para o aumento da resistência a médio e longo prazo. Em sistemas com cura estendida, sua hidratação contínua melhora a compactação e a durabilidade da matriz cimentícia (Taylor-Lange et al., 2012).

A identificação de calcita ($CaCO_3$), com picos característicos em $2\theta \approx 29.4^\circ$, 36° , 48° e 57° , sugere um processo parcial de carbonatação, provavelmente devido à exposição do cimento ao ar durante o armazenamento. A carbonatação da portlandita ($Ca(OH)_2$) é um fenômeno comum em materiais cimentícios expostos ao CO_2 atmosférico. Em níveis moderados, esse processo pode contribuir positivamente para a densificação da matriz por meio da formação de calcita ($CaCO_3$), que atua como um preenchimento fino (filler), reduzindo a porosidade e promovendo a compactação da microestrutura. De acordo com Von Greve-Dierfeld et al. (2020), a precipitação de carbonatos pode melhorar a durabilidade e a resistência do concreto, principalmente nas fases iniciais da exposição à carbonatação. Resultados semelhantes foram obtidos por Filomeno et al. (2023), os quais demonstraram que a carbonatação acelerada pode melhorar propriedades físicas e mecânicas de materiais cimentícios, graças à formação de produtos de carbonatação como a calcita, que se alojam nos poros da matriz e reduzem sua conectividade. Contudo, sua presença excessiva pode reduzir a alcalinidade do sistema, afetando a durabilidade em longo prazo.

A ausência de fases como C_3A (aluminato tricálcico) e C_4AF (ferrita aluminoferrita tetracálcica) pode estar associada à sua baixa concentração, sobreposição de picos ou à natureza amorfa/finamente distribuída dessas fases. Isso é comum em cimentos ricos em C_3S e com teores reduzidos de aluminatos, como os do tipo CP V-ARI (Matschei et al., 2007).

A composição cristalográfica observada é coerente com o desempenho mecânico registrado, especialmente com a resistência à compressão de 35,2 MPa aos 7 dias, o que reforça o papel dominante da alita e a eficiência do processo de hidratação inicial.

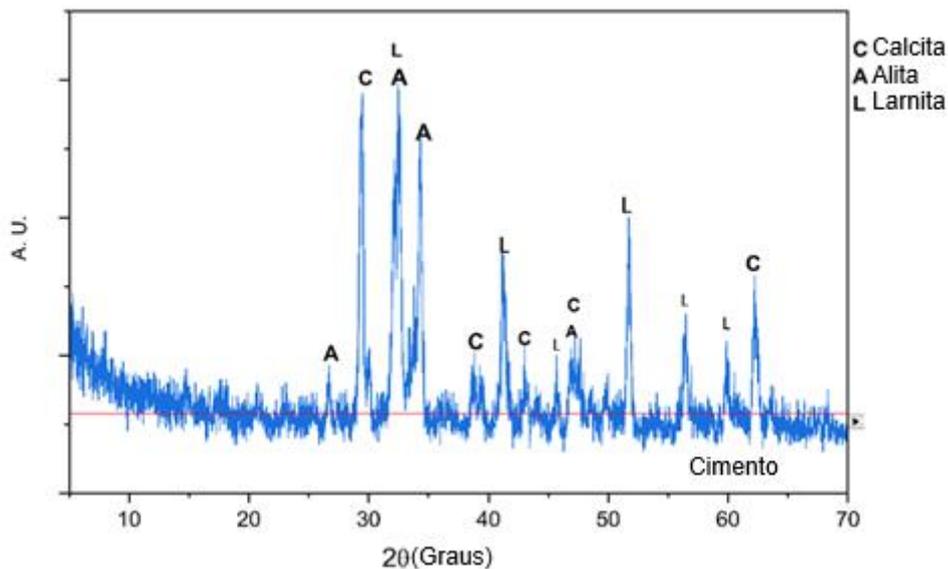


Figura 13. Difratograma de raios X do cimento CP V-ARI. Identificam-se como principais fases cristalinas a alita (A – Ca_3SiO_5), responsável pelo rápido ganho de resistência; a larnita (L – Ca_2SiO_4), associada à hidratação a longo prazo; e a calcita (C – CaCO_3), proveniente de carbonatação superficial. A análise confirma a composição mineral típica de cimentos de alta resistência inicial.

Fonte: O Autor, 2025

4.3 PROPRIEDADES DO GESSO

4.3.1 Físicas

A Tabela 10 apresenta as propriedades físicas do gesso reciclado, elas influenciam diretamente sua reatividade, dispersão na matriz cimentícia, e seu papel na hidratação e no desempenho mecânico dos compósitos. No presente estudo, o gesso foi submetido a secagem, moagem e peneiramento, obtendo-se um material com granulometria inferior a $150\ \mu\text{m}$ e características físicas compatíveis com sua aplicação como substituinte parcial do cimento.

A massa específica real do gesso reciclado foi determinada em $2,25 \pm 0,02\ \text{g/cm}^3$, valor consideravelmente inferior à observada para o cimento Portland ($3,10 \pm 0,02\ \text{g/cm}^3$). Essa diferença está de acordo com a literatura, uma vez que o sulfato de cálcio hemidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), principal componente do gesso, apresenta densidade cristalina mais baixa, variando entre 2,3 e 2,6 g/cm^3 a depender de sua fase (α ou β). Segundo Tran et al. (2023), a fase α -hemidratada, produzida por rotas químicas controladas, possui estrutura mais compacta, porém ainda menos densa que o clínquer Portland.

Essa característica física do gesso reciclado tem implicações diretas na formulação e no desempenho dos compósitos. A menor densidade pode resultar em maior volume ocupado por unidade de massa, impactando negativamente a empacotabilidade e aumentando o teor de vazios da matriz endurecida, caso não haja ajuste adequado na proporção volumétrica da mistura. Além disso, a densidade do material influencia na trabalhabilidade e no desempenho mecânico do sistema, sendo um parâmetro relevante para a otimização tecnológica de materiais cimentícios com adições minerais.

A massa específica aparente, de $1,10 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, indica que o material apresenta alto grau de porosidade entre partículas e baixa compactação no estado seco, características comuns a resíduos reciclados moídos finamente (Jiménez-Rivero & García-Navarro, 2017). Esse valor impacta o transporte, o armazenamento e a dosagem do gesso em sistemas cimentícios.

A área superficial específica, medida pelo método de Blaine, foi de $5500 \pm 150 \text{ cm}^2/\text{g}$, valor significativamente superior ao do cimento CP V-ARI ($4400 \pm 120 \text{ cm}^2/\text{g}$). Essa alta finura pode ser atribuída ao processo de moagem aplicado e à fragilidade da estrutura do gesso, que se pulveriza mais facilmente que o clínquer. Segundo Chernyshova et al. (2020), a alta área superficial de adições minerais finas promove maior nucleação heterogênea durante a hidratação, favorecendo a formação precoce de produtos como etringita e C-S-H, o que pode melhorar a compactação da matriz até certo limite de adição.

Por outro lado, a alta finura pode elevar a demanda de água e a superfície específica efetiva, aumentando a viscosidade da mistura e a porosidade final caso a dispersão não seja homogênea. Portanto, o uso de gesso reciclado exige ajuste fino na dosagem e controle rigoroso da distribuição de partículas na mistura solo-cimento.

Tabela 10 - Propriedades físicas do gesso reciclado utilizado nas formulações solo-cimento.

Propriedade	Valor	Unidade
Massa específica real	$2,25 \pm 0,02$	g/cm^3
Massa específica aparente	$1,10 \pm 0,02$	g/cm^3
Área superficial específica	5500 ± 150	cm^2/g
Tamanho máximo de partícula	< 150	μm

Fonte: o Autor, 2025

4.3.2 Composição química

A composição química do gesso reciclado influencia diretamente sua capacidade de interagir com o cimento Portland em compósitos solo-cimento. Os óxidos presentes determinam aspectos como disponibilidade de cálcio e enxofre, reatividade com aluminatos do cimento, formação de fases secundárias como etringita e a influência potencial sobre o tempo de pega e a durabilidade da matriz endurecida.

O gesso utilizado neste estudo foi caracterizado por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX), a Tabela 11 apresenta os valores obtidos, sendo os resultados expressos em percentual de óxidos por massa (% m/m).

Tabela 11 - Composição química do gesso reciclado utilizado como substituinte parcial do cimento nas formulações solo-cimento.

Óxido	Teor (% m/m)
CaO	54,98
SO ₃	24,24
K ₂ O	0,78
Perda ao fogo (LOI)	20,00

Fonte: O Autor, 2025

A elevada presença de óxido de cálcio (CaO) e trióxido de enxofre (SO₃) confirma a predominância da fase sulfato de cálcio hemidratado (CaSO₄·0,5H₂O), conhecida como bassanita, típica de resíduos de gesso que sofreram secagem térmica. Essa composição é compatível com a literatura, que identifica a faixa de 60%–70% de CaO e 25%–35% de SO₃ como indicativa de materiais reciclados com alto grau de pureza (Cipriano et al. 2021; Chernyshova et al., 2020).

O CaO presente no sistema contribui como fonte secundária de cálcio para a formação de produtos de hidratação como C-S-H (calcium silicate hydrate) e portlandita (Ca(OH)₂), ainda que de forma mais limitada em comparação com o cimento Portland. Já o SO₃ exerce papel essencial na regulação do tempo de pega e na formação de etringita (Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂·26H₂O), sobretudo nas primeiras idades, ao reagir com os aluminatos do cimento (Scrivener et al., 2018).

A formação de etringita é desejável em quantidades controladas, pois contribui para a estruturação da matriz e melhora a resistência inicial. Entretanto, em teores excessivos, o SO₃ pode causar expansão indesejada, microfissuras ou redução da durabilidade, especialmente se houver formação de etringita tardia (Taylor-Lange et al.,

2012). Dessa forma, o limite de substituição de cimento por gesso precisa ser tecnicamente fundamentado para evitar patologias.

A presença de óxido de potássio (K_2O) em baixos teores (0,30%) pode ser atribuída a contaminantes ou impurezas naturais do resíduo. Álcalis como o K_2O , mesmo em pequenas quantidades, podem influenciar o pH da solução intersticial e participar de reações secundárias com sílicas amorfas presentes no solo. Contudo, em sistemas com predomínio de agregados inertes e em proporções reduzidas, esses efeitos tendem a ser negligenciáveis (Neville, 2012).

A perda ao fogo (LOI) de 20% indica baixa presença de matéria orgânica residual e boa estabilidade térmica do material. Em gessos reciclados, LOI elevado pode sinalizar contaminação por papel, aditivos ou materiais orgânicos indesejáveis. (Puerto, 2024)

Portanto, a composição química do gesso reciclado avaliado neste trabalho demonstra seu potencial como substituinte parcial do cimento, atuando como fonte de sulfato para o controle do tempo de pega e promoção da formação inicial de fases hidratadas em misturas solo-cimento.

4.3.3 Análise mineralógica (DRX)

A figura 14 apresenta a análise mineralógica do gesso reciclado, a mesma foi realizada por difração de raios X (DRX), com o objetivo de identificar as fases cristalinas presentes no material após o processamento mecânico e térmico. Essa técnica é essencial para compreender o comportamento reativo do resíduo quando incorporado como substituinte do cimento em compósitos solo-cimento.

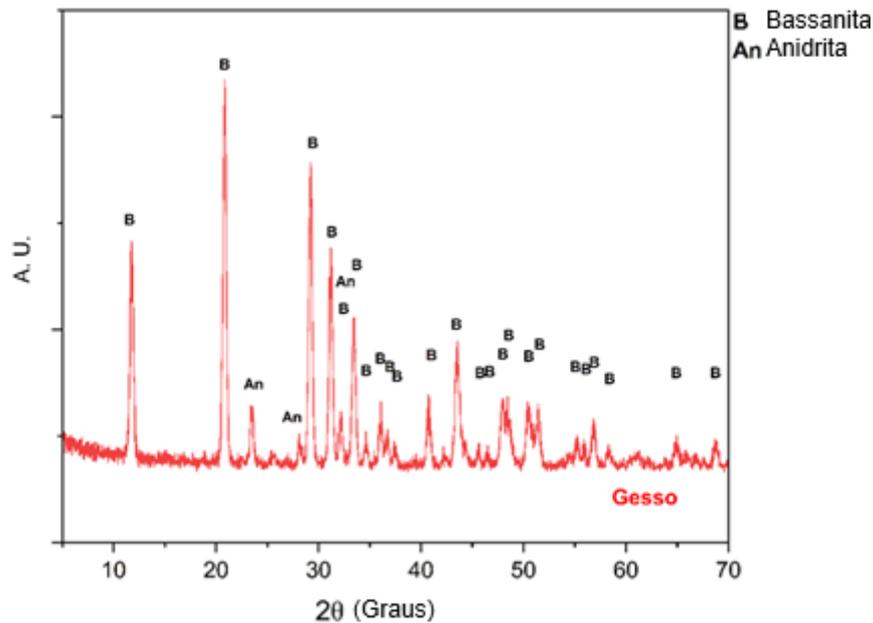


Figura 14. Difratoograma de raios X do gesso reciclado. Observa-se predominância da fase hemidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), identificada como bassanita (B), além da presença de anidrita (An – CaSO_4) em menor proporção. Essas fases influenciam diretamente a reatividade e o comportamento do gesso em sistemas cimentícios.

Fonte: O Autor, 2025

O difratograma obtido revelou que o gesso reciclado apresenta predominância da fase sulfato de cálcio hemidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), conhecida como bassanita (ICSD 79529), correspondendo a aproximadamente 80,8% da composição mineral identificada. Também foram detectadas proporções de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) em cerca de 19,2%, além de traços de anidrita (CaSO_4) (ICSD 79527).

A predominância da bassanita indica que o material passou por desidratação térmica parcial, o que é consistente com os processos de secagem a $60 \pm 5^\circ\text{C}$ adotados antes da moagem, conforme descrito na metodologia. A bassanita possui maior solubilidade em comparação à gipsita e à anidrita, o que a torna mais reativa em sistemas cimentícios, especialmente em presença de aluminatos de cálcio (C_3A), favorecendo a formação rápida de etringita nas idades iniciais (Mota et al., 2017).

A presença de gipsita residual pode ser atribuída à reidratação parcial do material durante o manuseio ou ao fato de que parte do resíduo não foi completamente desidratado no processo térmico. Já a anidrita, geralmente formada em temperaturas superiores a

180 °C, foi detectada em traços, indicando que sua formação não foi predominante nas condições de processamento adotadas.

A identificação das fases cristalinas por DRX permite prever o comportamento do gesso reciclado nas formulações solo-cimento. A bassanita atua como fonte de SO_3 prontamente disponível, reagindo rapidamente com os aluminatos do cimento para formar etringita nos primeiros dias de cura. Essa reação contribui para o ganho de resistência inicial e para a compactação da matriz. No entanto, é necessário cautela quanto à dosagem, visto que o excesso de sulfato pode levar à formação de etringita tardia, promovendo expansões deletérias e comprometendo a durabilidade da estrutura (Taylor, 1997; Taylor-Lange et al., 2012).

O perfil mineralógico do gesso reciclado estudado é semelhante ao observado por Cipriano et al. (2021) e Jiménez-Rivero & García-Navarro (2017), que também relataram a predominância da fase hemidratada em resíduos oriundos da indústria de gesso acartonado. Esse tipo de resíduo, quando bem processado e caracterizado, pode ser reutilizado tecnicamente em materiais cimentícios com resultados satisfatórios de desempenho físico e mecânico.

4.3.4 Comportamento térmico (TGA/DTG)

A Figura 15 apresenta a análise termogravimétrica (TGA) e a derivada da termogravimetria (DTG), essas caracterizações foram empregadas para investigar o comportamento térmico do gesso reciclado, permitindo a identificação das etapas de perda de massa associadas à desidratação das fases hidratadas e à presença de possíveis impurezas. Essa técnica é fundamental para caracterizar a estabilidade térmica do material e avaliar o grau de hidratação do sulfato de cálcio, o que influencia diretamente sua reatividade em compósitos cimentícios.

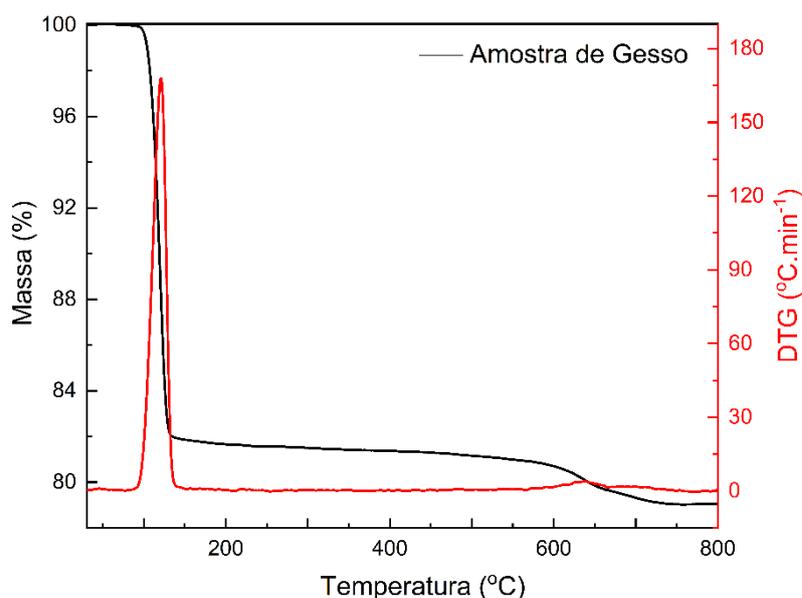


Figura 15. Curvas termogravimétrica (TG) e derivada (DTG) do gesso reciclado. Observa-se uma perda de massa acentuada entre 100 °C e 200 °C, correspondente à desidratação da bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), e uma segunda faixa mais suave entre 600 °C e 750 °C, associada à decomposição da anidrita (CaSO_4).

Fonte: O Autor, 2025

A curva de TGA/DTG obtida para o gesso reciclado revelou duas regiões principais de perda de massa. A primeira, com pico máximo de decomposição próximo a 139 °C, é atribuída à desidratação da gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) para bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). Essa etapa corresponde à liberação de 1,5 mol de água estrutural por mol de gipsita e é amplamente descrita na literatura como a principal transformação térmica do gesso em sistemas de baixa temperatura (Engbrecht & Hirschfeld, 2016).

A segunda região, observada entre 170 °C e 210 °C, está associada à transição da bassanita para anidrita (CaSO_4), com perda residual de água de cristalização. Essa etapa é indicativa da presença predominante de sulfato de cálcio parcialmente hidratado (hemidratado), o que é coerente com os dados obtidos por DRX que identificaram cerca de 80,8% de bassanita e 19,2% de gipsita no material. Conforme apontado por Chernyshova et al. (2020), a presença de bassanita é desejável em aplicações cimentícias devido à sua maior solubilidade e reatividade frente aos aluminatos de cálcio, promovendo a formação rápida de etringita nas idades iniciais.

Além dessas transformações principais, a curva também indicou uma pequena perda de massa na faixa de 500–600 °C, a qual pode estar relacionada à presença de traços

de matéria orgânica residual ou à decomposição de impurezas carbonáceas, como observado em outros estudos com gesso reciclado (Mota et al., 2017; Cipriano et al. 2021). Contudo, essa perda foi inferior a 1%, e a perda total ao fogo (LOI) foi de 1,09%, valor considerado baixo e compatível com materiais reciclados bem processados e com baixa contaminação.

O comportamento térmico identificado confirma que o gesso reciclado possui boa estabilidade, predominância de fases parcialmente hidratadas (reativas) e baixo teor de impurezas. Essas características favorecem sua aplicação como adição ao cimento Portland em compósitos solo-cimento, desde que em proporções controladas, evitando a formação excessiva de etringita e possíveis expansões tardias.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO SOLO-CIMENTO COM ADIÇÃO DE GESSO RECICLADO

A caracterização mineralógica das formulações de solo-cimento com diferentes teores de gesso reciclado foi realizada por difração de raios X (DRX), com o objetivo de identificar as fases cristalinas presentes após sete dias de cura e compreender a influência da adição de sulfato de cálcio na evolução microestrutural dos compósitos. A Figura 16 apresenta os difratogramas das formulações SF (sem gesso), G5, G10, G20 e G40, os quais evidenciam alterações significativas na composição mineralógica em função do teor de gesso incorporado.

As principais fases identificadas foram quartzo (Q), ilita (I), paragonita (P), inesita (In), calcita (C), gipsita (G) e etringita (E). A presença de quartzo, ilita e paragonita está relacionada à fração mineral do solo natural utilizado, cuja composição é rica em minerais silicatados e filossilicatos. A calcita, por sua vez, é atribuída à carbonatação da portlandita liberada durante a hidratação do cimento, sendo uma fase comumente observada em compósitos à base de cimento Portland submetidos a cura em condições ambientais (Matschei et al., 2007).

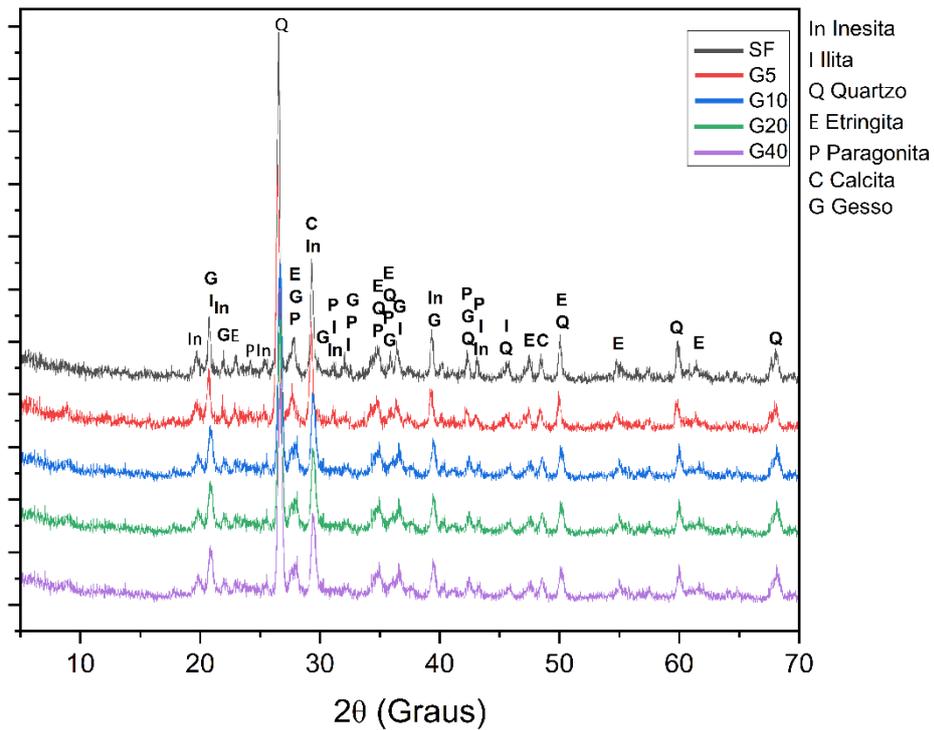


Figura 16. Difractogramas de raios X das formulações SF, G5, G10, G20 e G40. As análises revelam a presença de quartzo (Q) como fase majoritária, seguida por calcita (C), illita (I) e gesso residual (G). A formação de etringita (E) foi identificada nas formulações com maiores teores de gesso, enquanto fases secundárias como paragonita (P) e inesita (In) indicam reações com os aluminatos e a liberação de íons sulfato.

Fonte: O Autor, 2025

A gipsita identificada nas formulações com adição de gesso reciclado confirma a presença de sulfato de cálcio não completamente consumido nas reações de hidratação. Isso pode indicar que, especialmente nas formulações com maiores teores de substituição (G20 e G40), houve excedente de sulfato livre na matriz, não sendo totalmente incorporado às fases hidratadas. Segundo estudo de Melo et al. (2023), o excesso de gesso pode levar à segregação de sulfatos e à formação de produtos não desejáveis, comprometendo a integridade do compósito.

A intensificação dos picos relacionados à etringita nas formulações com gesso (especialmente G10 a G40) evidencia a reatividade do sulfato de cálcio frente aos aluminatos do cimento. A formação de etringita é uma reação típica em sistemas cimentícios contendo gesso e aluminato tricálcico (C_3A), sendo responsável por modificações estruturais relevantes, como o preenchimento de poros e a contribuição para

o ganho de resistência nas idades iniciais (Quennoz e Scrivener 2012). Contudo, o controle da sua quantidade é essencial, pois o excesso de etringita, especialmente quando formado tardiamente, pode causar expansão volumétrica, microfissuração e perda de desempenho mecânico (Wang et al., 2025).

A Tabela 12 apresenta a análise mineralógica semiquantitativa realizada por meio do software Match! aplicado às formulações G10 e G40. Observa-se que, com o aumento do teor de gesso, há uma tendência de redução relativa das fases silicatadas, como o quartzo, e um leve aumento nas fases sulfatadas, como gipsita e etringita. Esse comportamento é semelhante ao descrito por Colman et al. (2020), que observaram limitação na conversão total de sulfato em sistemas com elevada adição de gesso reciclado.

A presença de calcita em todas as formulações reforça a ocorrência de reações de carbonatação, mesmo em idades precoces. Essa fase pode atuar de forma benéfica ao preencher vazios e densificar a microestrutura, mas também pode reduzir o pH local, afetando a estabilidade das fases hidratadas e acelerando processos de degradação em longo prazo (Xian et al., 2022).

Portanto, os resultados obtidos indicam que a incorporação de gesso reciclado promove alterações relevantes na mineralogia dos compósitos solo-cimento, sendo a formação de etringita um indicativo da reatividade dos sulfatos. No entanto, a presença de gipsita residual e o aumento das fases secundárias em teores elevados alertam para a necessidade de controle na dosagem do resíduo. Esses aspectos mineralógicos serão correlacionados, nas próximas seções, com as propriedades térmicas, microestruturais e mecânicas dos compósitos avaliados.

Tabela 12 - Proporção estimada das fases cristalinas nas formulações com gesso reciclado (obtidas por DRX e análise via Match!).

Fase Mineralógica	Símbolo	Faixa de Concentração (%) – G10	Faixa de Concentração (%) – G40
Quartzo	Q	35,0 – 38,0	24,7 – 28,5
Paragonita	P	20,0 – 22,8	18,4 – 20,0
Inesita	In	12,0 – 15,8	10,1 – 12,0
Etringita	E	8,0 – 9,0	9,0 – 10,0
Calcita	C	13,0 – 15,0	15,0 – 16,2
Gipsita	G	1,0 – 1,5	2,0 – 2,5

Ilita	I	18,0 – 20,1	16,9 – 18,0
-------	---	-------------	-------------

Fonte: O Autor, 2025.

4.5 DESEMPENHOS MECÂNICOS

4.5.1 Resistência a Compressão

A resistência à compressão é um parâmetro essencial para avaliar o desempenho de compósitos cimentícios, pois reflete a eficácia das reações de hidratação, a compactação da matriz e a formação de produtos como o gel de C–S–H e a etringita. Neste estudo, foram analisadas cinco formulações de solo-cimento com teores crescentes de substituição de cimento por gesso reciclado (0%, 5%, 10%, 20% e 40%), com ensaios realizados aos 7 e 28 dias de cura, conforme a ABNT NBR 8492 (ABNT, 2012).

Conforme mostra a Figura 17, aos 7 dias de cura, a formulação controle (SF) apresentou resistência de 16,36 MPa, enquanto as formulações G5 e G10 alcançaram 16,35 MPa e 15,64 MPa, respectivamente. O incremento inicial é coerente com estudos como o de Melo et al. (2023), que atribuíram ganhos iniciais de resistência à ação do gesso como catalisador na formação de etringita primária, favorecendo o preenchimento de poros e a compactação interna.

A elevada área superficial do gesso reciclado pode atuar como sítio de nucleação heterogênea, favorecendo a aceleração da hidratação do cimento. Essa característica está associada à maior disponibilidade de superfícies ativas, capazes de promover a formação inicial de produtos hidratados. Shao et al. (2024) observaram que resíduos de gesso, como o fosfogesso e o gesso industrial, elevam a taxa de hidratação em função dessa propriedade, facilitando a precipitação de fases como o gel de silicato de cálcio hidratado (C–S–H) e aluminatos hidratados.

Esse comportamento é comparável ao uso de sementes de C–S–H em escala nanométrica, que reduzem a energia de ativação necessária para nucleação e induzem o desenvolvimento de uma matriz mais densa, com melhor desempenho mecânico nas idades iniciais (Huang et al., 2025).

No entanto, nas formulações com 20% e 40% de gesso (G20 e G40), as resistências aos 7 dias caíram para 14,58 MPa e 13,74 MPa, respectivamente. Essa tendência reflete o efeito de diluição do clínquer, que reduz a disponibilidade de compostos ativos para hidratação, como observado por Jelenić et al. (1977). Além disso, o acúmulo de sulfatos não reagidos pode promover a precipitação localizada de etringita,

gerando tensões internas e microfissuração incipiente, conforme apontado por Kang et al. (2015).

Aos 28 dias, todas as formulações apresentaram ganho de resistência, indicando a continuidade do processo de hidratação e possível formação secundária de C–S–H e monossulfato. As formulações SF, G5 e G10 atingiram 25,45 MPa, 25,81 MPa e 26,67 MPa, respectivamente. Esse resultado indica uma sinergia ideal entre os sulfatos adicionados e os aluminatos do cimento, que, em proporções moderadas, promovem maior refinamento poroso e coesão da matriz.

Em contrapartida, G20 e G40 mantiveram resistências inferiores (22,60 MPa e 20,00 MPa, respectivamente), mesmo após cura prolongada. Esse comportamento é compatível com a hipótese de formação excessiva de etringita e baixa taxa de consumo do gesso residual, o que pode gerar heterogeneidade microestrutural e aumento da porosidade conectada (Han et. al. 2021).

Do ponto de vista normativo, todas as formulações superaram, com larga margem, o mínimo exigido pela NBR 8491 (≥ 2 MPa aos 7 dias), demonstrando a viabilidade técnica do uso de gesso reciclado. No entanto, para aplicações que exigem desempenho superior e durabilidade prolongada, recomenda-se restringir a substituição do cimento a valores de até 10%. Acima desse limite, o aumento da porosidade, a possível formação de microfissuras e a segregação de fases cimentícias tornam necessária a introdução de aditivos compensadores ou a otimização da relação água/aglomerante.

Dessa forma, a formulação com 10% de gesso reciclado se destaca como a mais eficiente, apresentando equilíbrio entre desempenho mecânico e sustentabilidade. O resultado reforça a tese de que o gesso reciclado, quando adequadamente dosado, pode atuar não apenas como substituto, mas como otimizador do processo de hidratação, em compósitos de solo-cimento.

A significância das variações na resistência à compressão entre as diferentes formulações foi avaliada por meio de análise de variância (ANOVA), com nível de significância de 5%. Os resultados revelaram uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos ($F = 199,02$; $F_{crit} = 5,32$; $p < 0,001$), indicando que o teor de gesso reciclado afeta substancialmente o desempenho mecânico do compósito. Essa constatação reforça a interpretação de que teores moderados, como 10%, favorecem a resistência por mecanismos de refinamento poroso e sinergia na formação de fases hidratadas, enquanto teores mais elevados comprometem a integridade da matriz.

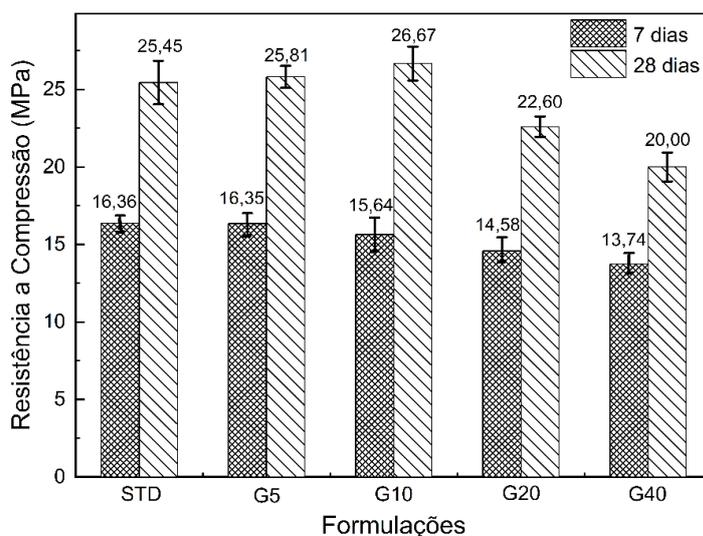


Figura 17. Resistência à compressão simples das formulações de solo-cimento com diferentes teores de gesso reciclado (G5, G10, G20 e G40) comparadas à referência (STD), após 7 e 28 dias de cura. Observa-se que a formulação G10 apresentou o melhor desempenho mecânico aos 28 dias (26,67 MPa), enquanto G20 e G40 apresentaram reduções associadas ao excesso de sulfato no sistema.

Fonte: O Autor, 2025

4.5.2 Avaliação Mecânica de Tijolos Solo-Cimento em Escala Real

Com o objetivo de validar a aplicabilidade prática do compósito solo-cimento desenvolvido, foram moldados tijolos em escala real, com dimensões de 24,6 cm de comprimento, 6,1 cm de altura, 12,1 cm de largura e abertura do furo de 5,8 cm, utilizando a formulação padrão (SF), sem adição de gesso, conforme as dimensões e especificações exigidas pela NBR 10834 (ABNT, 2012). O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado aos 28 dias de idade, segundo as diretrizes da NBR 10836 (ABNT, 2013), com o intuito de verificar o atendimento à resistência mínima exigida para utilização como componente de alvenaria.

Os resultados obtidos demonstraram valores médios de resistência à compressão superiores a 3,3 MPa, valor mínimo requerido pela NBR 10834 para tijolos de solo-cimento destinados a alvenaria de vedação. A figura 18 demonstra a curva de tendência obtida, pontuando uma relação positiva entre a resistência dos tijolos e a resistência dos corpos de prova cilíndricos, indicando coerência entre os ensaios em escala reduzida e os elementos moldados em escala real, ou seja, a resistência dos corpos de prova é cerca de 8 vezes maior do que o tijolo produzido na escala industrial.

O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,7777$) sugere uma correlação significativa entre os dois métodos, ainda que se reconheçam variações decorrentes do formato dos elementos, das condições de compactação e da área de ruptura envolvida.

Diversos estudos apontam que os resultados obtidos em corpos de prova laboratoriais padronizados podem não refletir com precisão o desempenho real de elementos estruturais em escala prática. Essa divergência decorre de fatores como o grau de homogeneidade da compactação, o método de moldagem e a geometria do elemento testado. Por exemplo, corpos de prova cúbicos frequentemente apresentam valores superiores de resistência à compressão em comparação com corpos cilíndricos, especialmente em concretos convencionais, embora essa diferença tenda a se reduzir em concretos de alta resistência (Sharma et al., 2024).

Além disso, pesquisas que comparam elementos moldados por métodos tradicionais e por manufatura aditiva indicam que falhas podem surgir em regiões interlaminares, reduzindo o desempenho estrutural em condições reais (Wagner et al., 2024). Esses resultados reforçam a importância de considerar aspectos como escala, formato e técnica de produção na análise e interpretação dos ensaios de laboratório, sobretudo em estudos voltados para a aplicação prática de compósitos cimentícios.

Esses achados reforçam a importância da realização de ensaios complementares em escala real como etapa essencial para validação prática do desempenho dos compósitos em aplicações estruturais.

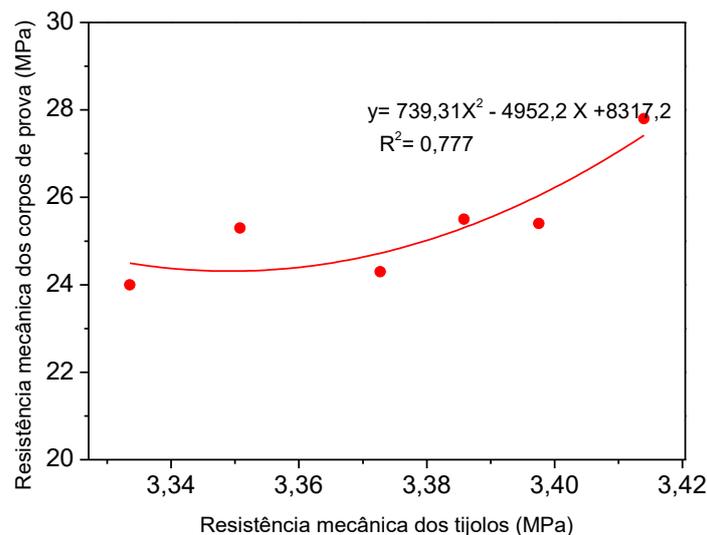


Figura 18. Relação entre a resistência à compressão dos tijolos moldados com a formulação padrão (SF) e os respectivos corpos de prova cilíndricos aos 28 dias. Ensaio realizado conforme a NBR 10836 (ABNT, 2013).

Fonte: O Autor, 2025

4.5.3 Absorção de água

A absorção de água é uma propriedade fundamental para a avaliação da porosidade acessível dos compósitos cimentícios, sendo diretamente associada à durabilidade, à permeabilidade e à resistência frente a ciclos de umedecimento e secagem. Em sistemas à base de solo-cimento, a absorção também reflete o grau de compactação da matriz e a eficiência das reações de hidratação, sendo influenciada pelas características granulométricas dos constituintes, pela distribuição dos poros e pelo volume de fase ligada.

Neste estudo, a absorção de água foi determinada aos 7 dias de cura conforme a ABNT NBR 8492 (ABNT, 2012). Os resultados obtidos, apresentados na Figura 19, demonstram uma variação sutil, porém significativa, entre as diferentes formulações. A formulação de referência (SF), sem adição de gesso, apresentou absorção média de 15,72%. Com a introdução de 5% e 10% de gesso reciclado (G5 e G10), os valores aumentaram ligeiramente para 15,99% e 16,32%, respectivamente. Apesar da elevação marginal, tais teores mantiveram o compósito dentro de faixas aceitáveis de porosidade, o que pode ser atribuído à reorganização inicial da matriz por formação de produtos hidratados, como a etringita primária, que tende a preencher parcialmente os capilares na fase inicial de cura (Thiebaut et al., 2018).

Por outro lado, nas formulações com maiores teores de gesso (G20 e G40), observou-se um aumento mais expressivo na absorção de água, com valores de 16,46% e 16,54%, respectivamente. Esse comportamento pode estar associado à saturação da capacidade de reação do sistema ligante, resultando na permanência de gesso não reagido. De acordo com Huang et al. (2021), a formação excessiva e desorganizada de cristais de etringita, especialmente em ambientes com sulfato residual, pode comprometer a densificação da matriz e favorecer o desenvolvimento de poros interconectados. Esse fenômeno também foi relatado por Thiebaut et al. (2018), que identificaram a expansão e a fissuração induzidas por etringita retardada como fatores que contribuem para o aumento da porosidade e perda de desempenho.

Outro aspecto relevante é a diferença entre as massas específicas dos aglomerantes: o gesso reciclado utilizado apresentou massa específica real inferior à do cimento Portland (2,25 g/cm³ contra 3,10 g/cm³). Esse desbalanceamento volumétrico implica em maior volume sólido para uma mesma massa total, resultando em um empacotamento menos eficiente e possível formação de vazios residuais.

A análise estatística por ANOVA reforça a significância dessas variações, demonstrando que as diferenças de absorção entre as formulações não são aleatórias ($F = 332,80$; $F_{crit} = 5,32$; $p < 0,001$). Esse resultado confirma que o teor de substituição do cimento por gesso reciclado exerce influência estatisticamente relevante na absorção de água, sendo necessário limitar esse teor para manter a durabilidade dos compósitos em níveis aceitáveis.

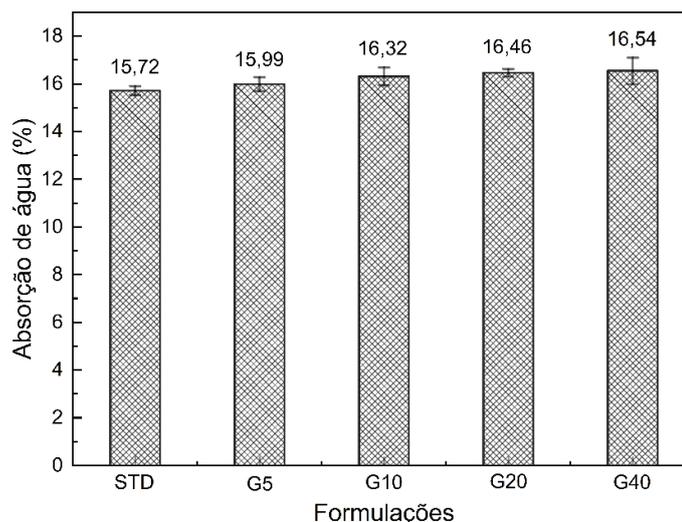


Figura 19. Absorção de água das formulações de solo-cimento com diferentes teores de gesso reciclado após 7 dias de cura. Verifica-se que o aumento do teor de gesso resultou em elevação gradual na absorção, indicando maior porosidade nas formulações G20 e G40. Esse comportamento pode comprometer a durabilidade dos compósitos, especialmente em ambientes úmidos.

Fonte: O Autor, 202

4.5.4 Durabilidade

A durabilidade de compósitos cimentícios está relacionada à sua capacidade de conservar propriedades mecânicas e físico-químicas ao longo do tempo, mesmo sob ação de agentes agressivos. Entre os principais mecanismos que comprometem a durabilidade de compósitos cimentícios destacam-se os ciclos de molhagem e secagem, a penetração de íons agressivos, as variações térmicas e as reações expansivas internas, como a formação tardia de etringita (DEF).

A literatura aponta que a exposição cíclica a soluções sulfatadas, associada à alternância de umidade, agrava o ataque físico-químico, elevando a porosidade e favorecendo a ocorrência de microfissuras (Gao et al., 2025). Em concretos modificados com metacaulim, por exemplo, a formação contínua de etringita e gipsita foi relacionada

à perda progressiva de desempenho mecânico após 60 ciclos de umedecimento e secagem (Bai et al., 2024).

Além disso, variações nas taxas de evaporação influenciam o tipo de ataque dominante por sulfato, com destaque para as zonas parcialmente imersas. Nesses casos, a cristalização de sais nos poros tende a provocar tensões internas e delaminações superficiais, configurando um processo predominantemente físico (Omrani et al., 2024). Tais evidências reforçam a complexidade dos fenômenos envolvidos e a necessidade de abordagens multiescalares no desenvolvimento de compósitos duráveis para exposição em ambientes agressivos.

No caso do solo-cimento, tais mecanismos são especialmente críticos devido à natureza porosa da matriz, que favorece o transporte de umidade e a penetração de agentes deteriorantes.

Neste estudo, a durabilidade foi avaliada por meio do ensaio de perda de massa após ciclos alternados de molhagem e secagem, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 13558 (ABNT, 2017). Os resultados estão apresentados na Figura 20 e mostram a perda de massa percentual nas cinco formulações avaliadas. As formulações SF (sem gesso), G5, G10 e G20 apresentaram perdas de 6,38%, 5,91%, 6,97% e 8,20%, respectivamente, todas abaixo do limite de 10% estipulado pela norma, indicando desempenho satisfatório sob ação cíclica.

A incorporação de até 20% de gesso reciclado, portanto, não comprometeu a estabilidade física dos compósitos frente às variações de umidade. Esse comportamento é coerente com os estudos de Agrela et al. (2013), que demonstraram que adições moderadas de sulfato de cálcio podem contribuir para a formação de fases hidratadas secundárias com função de preenchimento, reduzindo a conectividade da porosidade capilar.

A formulação G40 apresentou perda de massa de 23,86%, valor que excede os limites aceitáveis estabelecidos por normas técnicas, evidenciando elevado grau de degradação. Tal comportamento pode ser associado à instabilidade microestrutural resultante do excesso de sulfato, que favorece a precipitação desordenada de produtos expansivos, como etringita e gipsita. Esse acúmulo em regiões porosas leva ao aumento da porosidade efetiva e à perda de coesão na matriz, comprometendo a integridade do compósito (Lu et al., 2025).

Adicionalmente, o desequilíbrio iônico provocado pela elevada concentração de SO_4^{2-} pode intensificar processos de lixiviação de íons cálcio, como apontado por Jiang

et al. (2025), que observaram perdas de resistência superiores a 25% em compósitos ricos em C_3S após exposição prolongada a ambientes agressivos. Esses resultados reforçam os fundamentos estabelecidos por Taylor (1997), ao destacar que o controle adequado do teor de gesso é fundamental para mitigar reações deletérias e preservar a durabilidade dos materiais cimentícios.

No entanto, do ponto de vista estatístico, a análise de variância (ANOVA) revelou que as diferenças entre as médias das perdas de massa não foram significativas ao nível de 5% ($F = 4,32$; $F_{crit} = 5,32$; $p = 0,0712$). Embora haja uma clara tendência de piora na formulação G40, esse resultado sugere que, estatisticamente, não se pode afirmar com 95% de confiança que a variação no teor de gesso tenha causado diferença significativa entre todos os grupos analisados. Isso pode estar relacionado à elevada variabilidade intragrupo da formulação G40 ou à necessidade de aumentar o número de réplicas para fortalecer a análise.

Apesar disso, sob a ótica prática e normativa, os resultados evidenciam que formulações com até 20% de gesso reciclado mantêm integridade física adequada frente aos ciclos hidrotérmicos, enquanto a formulação com 40% mostrou desempenho inaceitável e não é recomendada para aplicações em ambientes sujeitos à umidade cíclica ou agressividade ambiental.

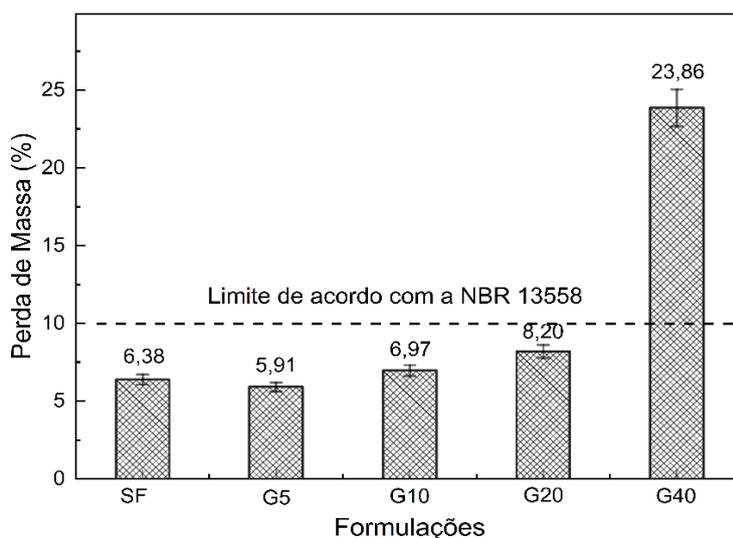


Figura 20. Perda de massa (%) dos compósitos solo-cimento após ciclos de molhagem e secagem, conforme a NBR 13558 (ABNT, 2017).

Fonte: O Autor, 2025

4.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A Figura 21 apresenta a análise microestrutural obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), que permitiu investigar os efeitos da substituição parcial do cimento por gesso reciclado na morfologia e distribuição das fases hidratadas nos compósitos de solo-cimento. As imagens revelam diferenças expressivas entre as formulações SF (Figura 21a), G10 (Figura 21b) e G40 (Figura 21c), permitindo uma correlação direta entre a microestrutura observada e os resultados mecânicos e físicos obtidos.

Na formulação de referência (SF), que não recebeu adição de gesso, a matriz cimentícia apresentou morfologia densa e relativamente homogênea, evidenciando boa compactação das partículas. Observou-se predominância de regiões amorfas associadas ao gel de silicato de cálcio hidratado (C–S–H), com reduzida ocorrência de cristais aciculares.

Essa baixa incidência de estruturas alongadas sugere formação limitada de etringita, o que pode ser atribuído à baixa concentração de íons sulfato no sistema. Segundo Deng et al. (2024), sistemas com teores reduzidos de SO_4^{2-} tendem a favorecer a formação de fases hidratadas mais estáveis e compactas. Complementarmente, Pouya et al. (2024) destacam que essa condição reduz os riscos de expansão interna e contribui para maior estabilidade dimensional dos compósitos ao longo do tempo.

A formulação G10 apresentou uma microestrutura mais refinada, com distribuição uniforme de cristais aciculares de etringita ao longo dos capilares e interstícios da matriz. Esses cristais contribuíram para o preenchimento de vazios, resultando em menor porosidade interconectada e em uma estrutura interna mais coesa.

A presença equilibrada de etringita e gel de silicato de cálcio hidratado (C–S–H) indica uma interação sinérgica entre a hidratação dos compostos do clínquer e os íons sulfato provenientes do gesso reciclado. Esse comportamento é compatível com os achados de Ponduru et al. (2025), que relataram melhorias significativas na resistência mecânica e densificação da matriz em formulações com adições otimizadas de gesso e calcário.

A estrutura compacta observada em G10 está alinhada com os bons resultados obtidos nos ensaios físicos, reforçando o papel positivo do gesso reciclado quando utilizado em proporções tecnicamente adequadas.

Na formulação G40, foram observadas evidências marcantes de degradação microestrutural, como poros interconectados em maior proporção, microtrincas e aglomerados de gesso não reagido com morfologia irregular e elevada refletância, característicos de regiões com baixa reatividade. Esses aspectos indicam perda de integridade estrutural da matriz.

A presença de cristais de etringita alongados e distribuídos de forma desordenada sugere a ocorrência de reações expansivas associadas à formação tardia de etringita (DEF). Esse processo é conhecido por gerar tensões internas localizadas, favorecendo desagregações pontuais. Lubej (2012) já havia relatado a influência da DEF na fragilização de concretos com menor densidade.

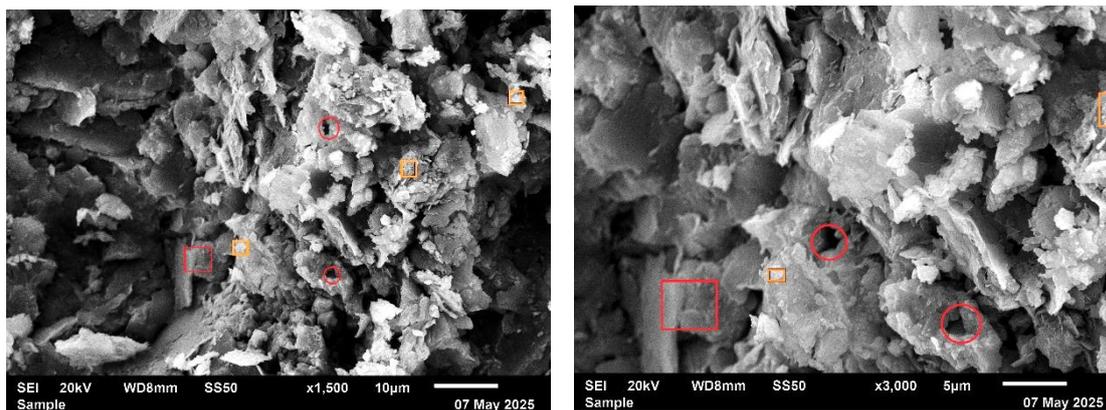
De forma semelhante, Colak (2002) demonstrou que teores excessivos de gesso em ligantes compostos podem induzir a formação descontrolada de produtos expansivos, elevando a porosidade conectada. Mais recentemente, Schovanz et al. (2022) confirmaram que a formação tardia de etringita compromete o desempenho físico-mecânico de concretos com alto teor de sulfato residual.

Esses achados corroboram os resultados obtidos para G40, que apresentou maior perda de massa, maior absorção de água e redução significativa da resistência à compressão.

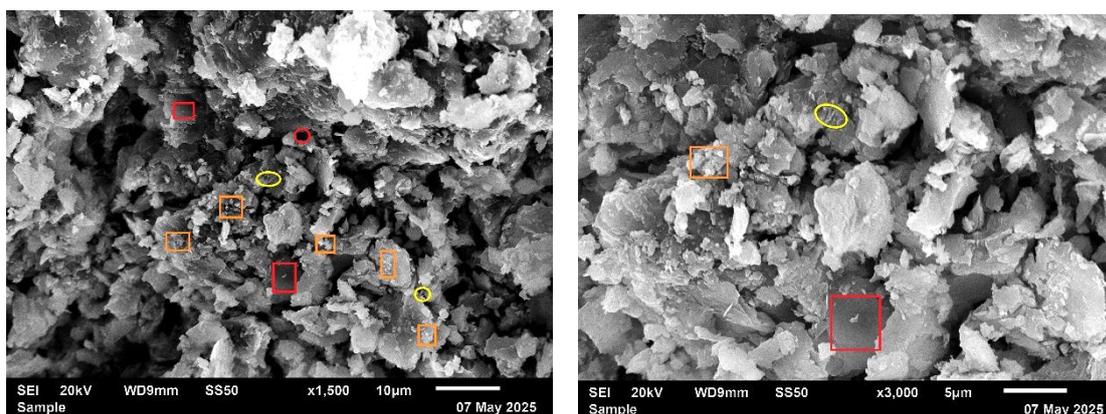
Com o objetivo de facilitar a interpretação das micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Figura 21), foram incluídas anotações que identificam as principais fases e defeitos estruturais. As regiões com morfologia densa e compacta, típicas do gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), foram destacadas por retângulos laranja. Por sua vez, os poros visíveis, distribuídos ao longo da matriz, foram indicados por círculos vermelhos.

Cristais aciculares de etringita incorporados à fase cimentícia aparecem marcados com círculos amarelos, enquanto, na formulação com 40% de gesso, um retângulo bordô assinala grandes aglomerados de gesso não reagido. Esses aglomerados apresentam morfologia irregular e elevada refletância, distinguindo-se da matriz envolvente. Além disso, retângulos amarelos adicionais indicam cristais de etringita com alongamento excessivo, sugerindo regiões com potencial para geração de tensões expansivas.

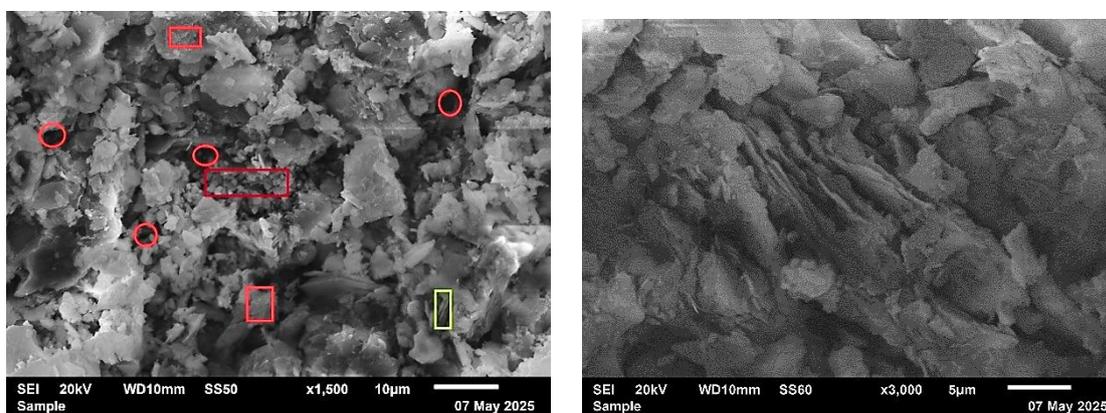
Essas marcações visuais complementam as análises microestruturais apresentadas anteriormente, reforçando a correlação entre o teor de gesso, a evolução das fases hidratadas e o desempenho mecânico final dos compósitos.



a)



b)



c)

Figura 21. Imagens de MEV das formulações solo-cimento com 0% (a), 10% (b) e 40% (c) de gesso reciclado após 28 dias de cura. A amostra SF apresenta matriz compacta com porosidade moderada e presença de C-S-H. A formulação G10 exibe microestrutura densa, com cristais aciculares de etringita preenchendo vazios e promovendo maior coesão. Em contraste, a G40 revela porosidade elevada, aglomerados de gesso não reagido e microtrincas associadas à formação excessiva de etringita, indicando degradação estrutural.

Fonte: O Autor, 2025

4.6.1 Espectroscopia de energia dispersiva (EDS)

A espectroscopia de energia dispersiva (EDS) (Figura 22), utilizada em conjunto com as imagens de MEV, foi essencial para identificar os principais elementos presentes nas formulações solo-cimento, bem como inferir a presença e distribuição dos produtos de hidratação e resíduos não reagidos.

Nas formulações SF (Figura 19a) e G10 (Figura 19b), os espectros revelaram concentrações relevantes de cálcio (Ca), silício (Si) e alumínio (Al), sugerindo a formação de fases cimentícias como C-S-H (silicato de cálcio hidratado), C-A-S-H (silicato de cálcio e alumínio hidratado) e, possivelmente, etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$) nas regiões com maior presença de enxofre (S) e alumínio. Esses produtos de hidratação são fundamentais para o desenvolvimento da resistência e coesão da matriz, e sua presença é indicativa de um processo de hidratação eficaz, especialmente na amostra G10, que apresentou o melhor desempenho mecânico e de durabilidade.

Estudos como o de Wang et al. (2025) apontam que a combinação de íons sulfato e alumínio em sistemas com cimento Portland favorece a formação inicial de etringita, desde que haja disponibilidade suficiente de Ca^{2+} e pH elevado. A formação equilibrada dessa fase pode preencher poros e reforçar a matriz, mas em excesso pode levar à expansão interna, como observado na amostra G40.

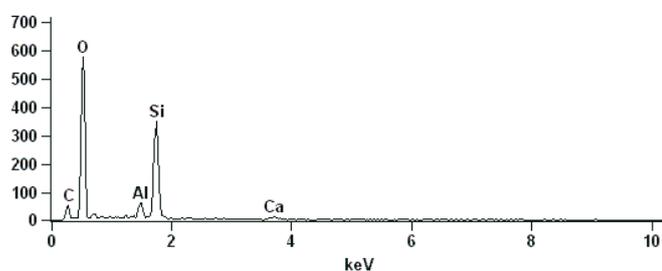
Na formulação G40 (Figura 19c), os espectros de EDS revelaram uma distribuição elementar heterogênea, com intensificação dos sinais de enxofre (S) e redução dos picos de silício (Si) e alumínio (Al), indicando menor grau de hidratação e possível acúmulo de gesso não reagido. A diminuição nos teores de Si e Al pode estar relacionada à limitada formação de C-S-H e C-A-S-H, uma vez que o excesso de gesso tende a consumir rapidamente os íons Ca^{2+} disponíveis, priorizando a formação de etringita nas etapas iniciais da hidratação (Tian & Cohen, 2000).

Essa condição favorece a precipitação de produtos expansivos em poros capilares e zonas de transição, como etringita e gipsita, o que compromete a integridade estrutural do compósito (Neville, 2004). Estudos recentes também demonstram que o aumento da concentração de sulfato acarreta maior conectividade de poros e eleva o risco de microfissuração e perda de desempenho físico e mecânico (Wang et al., 2024; Lv et al., 2020). Os resultados obtidos na formulação G40, como a elevada perda de massa, maior absorção de água e redução significativa da resistência à compressão, corroboram esses achados.

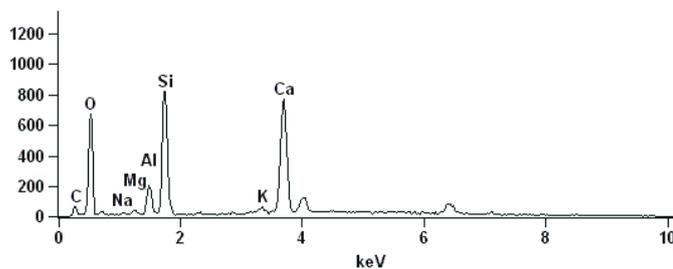
A heterogeneidade química observada por EDS em G40 pode ainda estar associada à formação de microambientes com diferentes taxas de hidratação, como reportado por Chernyshova et al. (2020). Nesses casos, o acúmulo de sulfatos em regiões locais, sem suficiente disponibilidade de aluminato reativo, pode resultar em gesso residual e precipitação incompleta de produtos hidratados.

Além disso, a presença de elementos como ferro (Fe), magnésio (Mg) e sódio (Na), embora minoritária, sugere a influência de minerais residuais do solo, como argilominerais (ex. illita e paragonita) e óxidos de ferro. Estes elementos também podem interferir nas reações de hidratação secundárias, especialmente em ambientes com baixa alcalinidade, limitando a estabilidade e a reatividade das fases formadas (Lv et al., 2020; Mitchell & Soga, 2005).

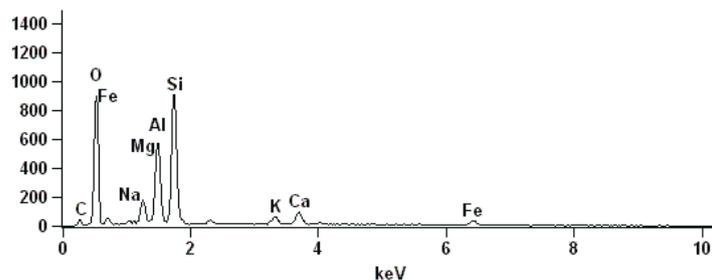
Por fim, é importante destacar que a ausência de portlandita (Ca(OH)_2) nos difratogramas de DRX e sua baixa detecção por EDS pode indicar seu consumo em reações pozolânicas, bem como sua conversão em calcita por carbonatação, como também evidenciado nas análises de FTIR e DRX. Esse fenômeno já foi amplamente relatado por Wild & Khatib (1997), que discutem a instabilidade da portlandita frente ao dióxido de carbono atmosférico, principalmente em sistemas com alta capilaridade e baixa densidade.



a)



b)



c)

Figura 22. Espectros de EDS obtidos nas superfícies de fratura das amostras SF, G10 e G40. As amostras SF e G10 apresentam picos evidentes de Ca, Si e Al, compatíveis com a formação de fases hidratadas como C-S-H e C-A-S-H. A amostra G40 apresenta distribuição elementar heterogênea, com maior concentração de S (enxofre) e menor intensidade de picos de Si e Al, sugerindo maior quantidade de gesso não reagido e menor grau de hidratação.

Fonte: O Autor, 2025

4.6.2 Análise de FTIR

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) (Figura 23) foi utilizada para identificar os principais grupos funcionais presentes nas formulações solo-cimento com 0% (SF), 10% (G10) e 40% (G40) de gesso reciclado. Os espectros revelaram importantes informações sobre os processos de hidratação, carbonatação e a presença de fases reativas ou residuais.

Na formulação de referência (SF), a presença de uma banda estreita em torno de $\sim 3640\text{ cm}^{-1}$, observada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), foi atribuída à vibração de estiramento O–H da portlandita (Ca(OH)_2), uma fase cristalina típica da hidratação do cimento Portland.

Nas formulações G10 e G40, a atenuação ou ausência dessa banda sugere que a portlandita foi consumida em reações pozolânicas com os aluminossilicatos presentes no solo, ou convertida em calcita (CaCO_3) por carbonatação atmosférica. Esse comportamento é corroborado por estudos como o de Wijerathne et al. (2024), que observaram a redução da banda $\sim 3640\text{ cm}^{-1}$ em compósitos com cinza de casca de arroz, associando-a ao consumo de Ca(OH)_2 e à formação subsequente de C–S–H.

Torres-Ortega et al. (2024) relataram redução progressiva da portlandita em concretos com pozolanas agroindustriais, com melhora microestrutural e ganho de resistência, reforçando a interpretação de que a modificação química e mineralógica do sistema cimentício está diretamente ligada à reatividade pozolânica e à exposição ao CO_2 .

A banda larga em torno de 3450 cm^{-1} , observada com maior intensidade em G10 e G40, está associada ao estiramento de ligações O–H de água absorvida fisicamente e de produtos hidratados como o C-S-H. Essa banda indica um maior teor de umidade retida, compatível com a maior porosidade observada nas formulações com adição de gesso. A banda de $\sim 1650\text{ cm}^{-1}$ também presente nestas formulações é atribuída à vibração de flexão da molécula de água (H–O–H), o que reforça a interpretação da maior retenção de umidade nas formulações G10 e G40 (Yusuf, M. O., 2023).

Entre 1550 e 1250 cm^{-1} , os espectros revelaram bandas intensas atribuídas ao estiramento assimétrico do grupo carbonato (C–O), indicando a presença de calcita como produto de carbonatação. Esse fenômeno é comum em sistemas cimentícios expostos à atmosfera e com elevada área superficial, como observado por Koochakzaei, A et. al. (2023). A maior intensidade dessas bandas nas amostras com gesso sugere maior susceptibilidade à carbonatação, possivelmente devido à microestrutura mais porosa e maior presença de sulfato, que pode catalisar a transformação de portlandita em carbonato de cálcio.

Na região entre 1150 e 900 cm^{-1} , as bandas observadas são atribuídas às vibrações de estiramento do grupo sulfato (SO_4^{2-}), oriundos do gesso adicionado, e também às ligações Si–O–Si, características de produtos silicatados como o C-S-H. A maior intensidade dessas bandas na amostra G10 está associada à formação de etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$), conforme corroborado por análises de DRX e MEV. Estudos como os Wang et al. (2025) indicam que a sobreposição das bandas SO_4^{2-} e Si–O–Si nessa faixa espectral é comum em sistemas com presença simultânea de sulfatos e silicatos hidratados, tornando essa região útil para monitorar a coexistência dessas fases.

Já na amostra G40, embora as bandas de sulfato ainda estejam presentes, sua intensidade levemente reduzida pode refletir um menor grau de hidratação efetiva, com parte do gesso permanecendo inerte ou formando fases secundárias de menor reatividade. Esse comportamento foi descrito por Chernyshova et al. (2020), que demonstraram que o excesso de sulfato em sistemas cimentícios pode saturar a capacidade de reação do aluminato disponível, levando à precipitação incompleta de etringita ou formação de gesso secundário não vinculado à matriz.

Na região entre 900 – 700 cm^{-1} , foram detectadas bandas atribuídas às vibrações de flexão das ligações Al–O e Si–O, comuns em argilominerais (como illita) e produtos de hidratação como C-A-S-H. A menor intensidade dessas bandas na amostra G40 indica menor grau de reação com os aluminossilicatos do solo, o que pode estar relacionado à

menor formação de fases cimentícias densificadoras, conforme observado também nas análises EDS e MEV.

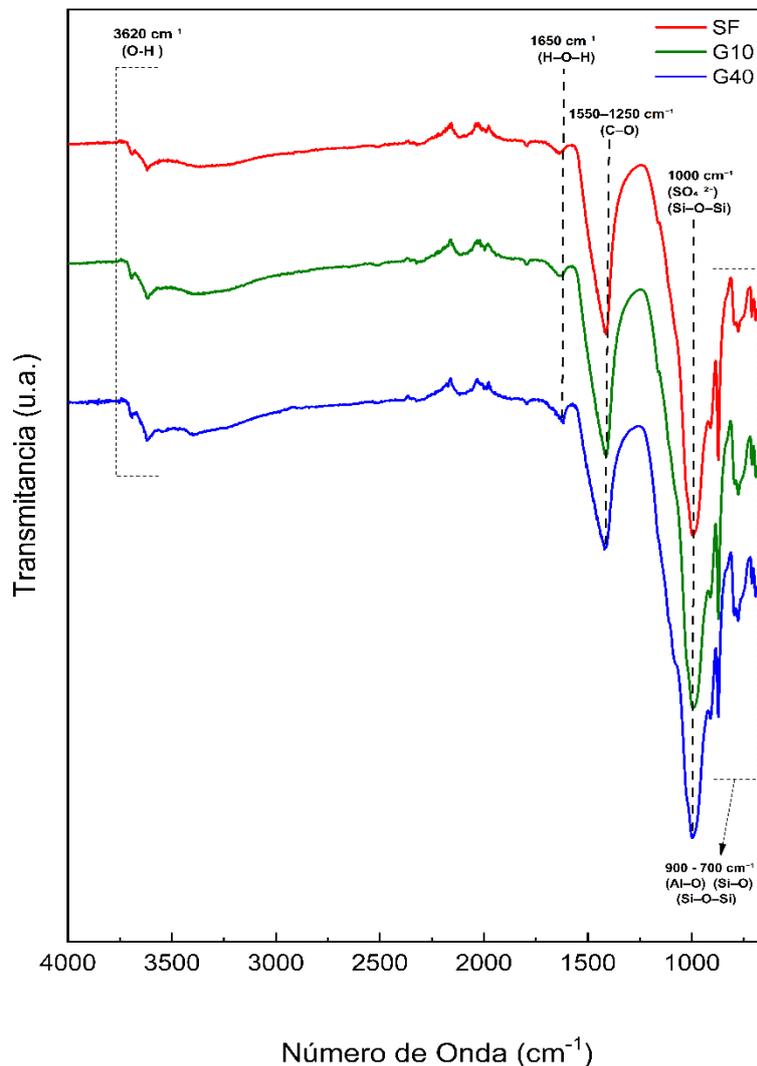


Figura 23. Espectros de FTIR das formulações solo-cimento com 0% (SF), 10% (G10) e 40% (G40) de gesso reciclado, após 28 dias de cura. Observam-se bandas associadas ao grupo hidroxila (O-H), água molecular (H-O-H), carbonato (C-O), sulfato (SO_4^{2-}) e ligações Si-O-Si e Al-O. A atenuação da banda de portlandita ($\sim 3640 \text{ cm}^{-1}$) nas amostras G10 e G40 sugere consumo em reações pozolânicas ou por carbonatação. A maior intensidade das bandas de sulfato e carbonato nessas formulações indica a formação de etringita e calcita, enquanto a redução das bandas Si-O e Al-O em G40 pode estar relacionada à menor formação de fases cimentícias hidratadas.

Fonte: O Autor, 2025

4.6.3 Análise Integrada dos Resultados e Contribuições Tecnológicas e Ambientais

A análise integrada dos resultados obtidos neste estudo permite traçar uma avaliação crítica sobre o desempenho dos compósitos solo-cimento com adição de gesso reciclado, considerando não apenas as propriedades isoladas, mas a sinergia entre os aspectos mecânicos, físico-químicos e microestruturais.

As formulações contendo 5% e 10% de gesso apresentaram comportamento técnico estável, compatível com as exigências normativas para alvenaria de vedação, com desempenho superior ao da formulação padrão (SF) em algumas propriedades. A presença controlada de sulfato favoreceu a formação de etringita primária e a compactação microestrutural, o que se refletiu em melhor coesão interna e maior resistência mecânica sem comprometer a durabilidade, condição corroborada por trabalhos como o de Samchenko et al. (2023), que apontam melhorias microestruturais com teores moderados de sulfato de cálcio em sistemas cimentícios.

Por outro lado, a substituição de 40% do cimento por gesso reciclado resultou em microestrutura heterogênea, maior porosidade e perda significativa de desempenho frente à exposição cíclica, o que aponta para uma limitação técnica importante quanto à quantidade máxima viável de incorporação. Estudos como o de Tian e Cohen (2000) demonstram que, acima de certos limites, o excesso de gesso pode induzir reações expansivas internas e comprometer a integridade estrutural do material, especialmente em ambientes úmidos.

Do ponto de vista da aplicação prática, a formulação com 10% de gesso destaca-se como tecnicamente viável e ambientalmente vantajosa, pois possibilita a redução de 10% no consumo de cimento — material responsável por até 8% das emissões globais de CO₂, segundo a Cement Sustainability Initiative (WBCSD, 2018). Considerando que a produção de 1 tonelada de cimento emite cerca de 900 kg de CO₂ (Scrivener et al., 2018), a substituição parcial estudada representa um potencial significativo de mitigação de impactos, especialmente se replicada em larga escala em programas habitacionais.

Além disso, o reaproveitamento do gesso, frequentemente classificado como resíduo Classe C pela Resolução CONAMA nº 307/2002, contribui para a valorização de um rejeito de difícil destinação e reforça os princípios da economia circular. A literatura evidencia que sua reciclagem ainda é incipiente no Brasil devido à contaminação e à falta de padronização do resíduo (Almeida et al., 2021), mas iniciativas locais e pesquisas como esta demonstram a viabilidade de reinserção controlada em produtos de baixo custo e menor exigência estrutural, como blocos de vedação ou sistemas de alvenaria não portante.

É importante destacar, contudo, que o comportamento a longo prazo dos compósitos com adição de gesso reciclado ainda demanda estudos complementares, especialmente em condições de exposição natural prolongada, ciclos térmicos e ambientes com presença de íons agressivos. Ensaio como lixiviação de sulfatos,

carbonatação acelerada e resistência à abrasão devem ser incluídos em investigações futuras para validar a segurança ambiental e a durabilidade em campo.

Portanto, os dados obtidos neste estudo não apenas demonstram a viabilidade técnica da incorporação de gesso reciclado em compósitos solo-cimento até o limite de 10%, como também indicam um caminho promissor para soluções construtivas mais sustentáveis e alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 11, 12 e 13). A formulação de materiais mais ecológicos, com base em resíduos amplamente disponíveis, representa uma estratégia eficaz para conciliar desempenho técnico, viabilidade econômica e responsabilidade ambiental na construção civil.

5. CONCLUSÕES

A presente pesquisa investigou a viabilidade técnica e ambiental da substituição parcial do cimento por gesso reciclado na produção de compósitos de solo-cimento, com base em análises físicas, mecânicas, químicas e microestruturais. Os resultados obtidos demonstraram que a incorporação do resíduo, quando controlada, pode melhorar o desempenho do compósito, contribuir para a sustentabilidade do processo produtivo e viabilizar a valorização de resíduos da construção civil.

A substituição de até 10% do cimento por gesso reciclado promoveu compósitos com desempenho mecânico igual ou superior ao da formulação de referência, especialmente em termos de resistência à compressão e coesão microestrutural, evidenciada nas análises por MEV e EDS. Essa melhora foi atribuída à formação sinérgica de fases hidratadas como C-S-H e etringita, que favoreceram a densificação da matriz e o preenchimento de vazios capilares.

Quanto à durabilidade, as formulações com até 20% de gesso apresentaram perdas de massa inferiores ao limite de 10% estabelecido pela NBR 13558 após ciclos de molhagem e secagem, indicando estabilidade frente à degradação hídrica. No entanto, a formulação com 40% ultrapassou expressivamente esse limite, evidenciando vulnerabilidade microestrutural causada pelo excesso de sulfato, que intensificou a porosidade, favoreceu a lixiviação e promoveu reações expansivas indesejáveis.

As análises por FTIR reforçaram esses achados ao revelar variações na intensidade de bandas associadas à portlandita, carbonatos e sulfatos, indicando a progressiva hidratação do sistema, ocorrência de reações de carbonatação e formação de produtos ricos em enxofre, sobretudo nas formulações com maiores teores de gesso.

De forma integrada, os dados demonstram que a substituição de 10% do cimento por gesso reciclado representa um ponto de equilíbrio entre desempenho técnico, viabilidade ambiental e cumprimento das normas vigentes. Essa proporção permite a redução do consumo de cimento Portland, contribui para o reaproveitamento de um resíduo de difícil destinação e mantém a qualidade do compósito dentro dos parâmetros exigidos.

A produção de tijolos em escala real, empregando a formulação otimizada, confirmou a reprodutibilidade dos resultados laboratoriais, atingindo resistência à compressão superior ao valor mínimo exigido pela NBR 10834, o que valida a aplicabilidade da técnica para uso em elementos construtivos convencionais.

Assim, os resultados desta pesquisa consolidam o potencial do gesso reciclado como adição sustentável para compósitos à base de solo-cimento, contribuindo para práticas alinhadas à economia circular, à redução da pegada de carbono e à gestão responsável de resíduos sólidos da construção civil.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas limitações inerentes ao escopo deste trabalho, sugerem-se as seguintes direções para estudos futuros, com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre o uso de gesso reciclado em compósitos de solo-cimento:

- Avaliação da durabilidade em longo prazo, considerando ciclos prolongados de molhagem e secagem, ataque por sulfatos, variações térmicas e ambientes naturais expostos;
- Estudos de resistência à abrasão e impacto, com vistas à aplicação dos compósitos em elementos sujeitos a solicitações mecânicas repetitivas ou atrito superficial;
- Investigação do comportamento térmico e higroscópico das formulações com adição de gesso, especialmente para aplicações em ambientes internos e externos com variações sazonais de temperatura e umidade;
- Análises de lixiviação e estabilidade química, com foco na liberação de íons sulfato e seus potenciais impactos ambientais em solos e águas subterrâneas;
- Otimização da formulação com aditivos suplementares, como pozolanas, fibras vegetais ou aditivos químicos, com o objetivo de melhorar a resistência mecânica, a durabilidade e a trabalhabilidade do material;
- Modelagem numérica do desempenho mecânico e higrótérmico, com base nos parâmetros experimentais obtidos, visando prever o comportamento dos compósitos em diferentes condições de uso;
- Estudos de viabilidade econômica e análise do ciclo de vida (ACV) da substituição do cimento por gesso reciclado, incluindo aspectos logísticos, custos de produção e impactos ambientais comparativos.

Essas investigações poderão contribuir para o avanço do conhecimento técnico-científico na área de materiais sustentáveis, além de consolidar a aplicação do gesso reciclado como insumo viável na construção civil, em conformidade com os princípios da economia circular e da gestão ambiental integrada.

REFERÊNCIAS

- ABU TAYYEM, N. E. S. et al. **The influence of calcite-producing bacteria on cement mortar compressive strength and durability characteristics.** *IUJAS – Israa University Journal of Applied Sciences*, v. 7, n. 2, 2024.
- ALMEIDA, K. S. DE; SOARES, R. A. L.; MATOS, J. M. E. DE. **Efeito de resíduos de gesso e de granito em produtos da indústria de cerâmica vermelha: revisão bibliográfica.** *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, n. 3, p. e-12568, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM), 2023. **ASTM C109/C109M-23 – Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.
- _____. 2022. **ASTM C188-22 – Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.
- _____. 2023. **ASTM C191-23 – Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.
- _____. 2017. **ASTM D4318-17 – Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- _____. 2017. **ASTM D6913/D6913M-17 – Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- ANDROŠEVIĆ, R. **Environmental impact of built structures during their lifecycles in terms of construction waste.** In: *IntechOpen*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1007471>.
- AQUILANO, D.; BRUNO, M.; GHIGNONE, S. **Gypsum: From the equilibrium to the growth shapes—Theory and experiments.** *Minerals*, v. 14, n. 11, p. 1175, 19 nov. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14111175>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaios.** 3. ed. atual. rev. por M. R. Pitta. São Paulo: ABCP, 1986. 57 p. (ET-35).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2016. **NBR 6457:2016. Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- _____. 2016. **NBR 6459:2016. Solo — Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

- _____. 2016. **NBR 7180:2016. Solo — Determinação da massa específica real — Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- _____. 2016. **NBR 7181:2016. Solo — Análise granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- _____. 2012. **NBR 8492:2012. Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- _____. 2012. **NBR 8491: Tijolo de solo-cimento — Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- _____. 2013. **NBR 10834: Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural — Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- _____. 2013. **NBR 10836: Tijolo de solo-cimento — Determinação da resistência à compressão — Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- _____. 2012. **BR 13554:2012. Solo-cimento — Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem — Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- _____. 2017. **NBR 13558: Solo-cimento — Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem — Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- _____. 2004. **NBR 15112:2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil — Execução de camadas de pavimentação — Procedimento.** Rio de Janeiro, 2004.
- _____. 2015. **NBR 16372:2015 – Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Blaine).** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- _____. 2018. **NBR 16697:2018 – Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- AXTHAMMER, D. et al. **Early hydration and viscoelastic properties of tricalcium aluminate pastes influenced by soluble sodium salts.** ChemRxiv, 26 set. 2024
- AZEVEDO, A. R. G. et al. **Assessing the potential of sludge generated by the pulp and paper industry in assembling locking blocks.** *Journal of Building Engineering*, v. 23, p. 334–340, 2019.
- BAI, W. et al. **Study on multi-scale dynamic mechanical properties of metakaolin modified recycled aggregate concrete under coupling conditions of sulfate attack and dry-wet cycles.** *Journal of Building Engineering*, 94, p. 109921, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109921>.
- BATISTA, M. F.; COSTA, L. R.; RIBEIRO, A. F. **Aplicação do solo-cimento em sistemas construtivos modulares.** *Revista Engenharia Verde*, v. 8, n. 1, p. 54–68, 2020.
- BATISTA, M. L. **Gestão de resíduos na construção civil: ênfase no desenvolvimento sustentável.** *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 4, p. 23356–23373, 2022.

- BÍLEK, V. et al. **Comparison of thermogravimetry response of alkali-activated slag and Portland cement pastes after stopping their hydration using solvent exchange method.** *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 150, p. 1013–1037, 2025.
- BISMARCHI, L. F.; LOSCHIAVO DOS SANTOS, M. C. **Housing the Poor and the Sustainability Context in Brazil: A Study of the Brazilian Building Sector Challenges for the Future.** *s.v.*, v. 4, n. 1, p. 63, 2012.
- BORTOLUZZI, A. C. **Principais desafios para a implantação de métodos sustentáveis na construção civil no Brasil e a importância do planejamento para a sua manutenção.** *s.l.*, 2017.
- BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm.
- BULIŃSKA, S.; SUJAK, A.; PYZALSKI, M. **Sustainable management of photovoltaic waste through recycling and material use in the construction industry.** *Materials*, v. 18, p. 284, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18020284>.
- BULLARD, J. W. et al. **Mechanisms of cement hydration.** *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, p. 1208–1223, 2011.
- CÁRDENAS CLEVES, L. M. et al. **Use of construction and demolition waste (CDW) in public spaces.** *Policy Brief*, PopuLab – Universidad del Valle, 2024
- CHANNOUF, S. et. al. **Spent ion-exchange resin as a new aggregate to enhance specific heat capacity of composite building materials: A case study on gypsum plaster.** *Construction and Building Materials*, 1 abr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135823>.
- CHENG, G. et. al. **Effect of $Al_2(SO_4)_3$ additive on the properties of calcined gypsum prepared from flue gas desulfurization.** *Materials Science (Medžiagotyra)*, 7 dez. 2023. DOI: <https://doi.org/10.5755/j02.ms.34396>.
- CHEN, S. et. al.. **Effect of curing temperature on crack resistance of low-heat Portland cement hydraulic lining concrete.** *Materials*, v. 18, n. 3, p. 1618, 2025.
- CHERNYSHOVA, I. V. et al. **Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution.** *Construction and Building Materials*, v. 231, p. 117142, 2020.
- CHERNYSHOVA, I. V. et al. **Properties of recycled gypsum from gypsum plasterboards and commercial gypsum throughout recycling cycles.** *Construction and Building Materials*, v. 164, p. 669–679, 2020.
- COLORADO, H. A. et al. **Iron oxide powders containing arsenic from water treatment processes mixed with cement as environmental and structural solution.** *Materials*, v. 18, p. 582, 2025. DOI: 10.3390/ma18030582.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a**

gestão dos resíduos da construção civil. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 17 jul. 2002. Disponível em: <https://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>.

- CUESTA, A. et al. **Multiscale understanding of tricalcium silicate hydration reactions.** *Scientific Reports*, v. 8, p. 8549, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-26943-y.
- D'ANGELO, G. **Technologies for the reuse of demolition waste in the production of geopolymer-based building materials: prospects and opportunities.** *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, v. 10, p. 1, 2025. Doi : <https://doi.org/10.1051/rees/2024009>.
- DAS, D.; KUMAR, R.; SOFI, A. **Hydration kinetics and stability study of pure phases of cement clinker with the addition of SCMs and dopants.** *Cementitious Materials: Chemistry, Sustainability, and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2024. cap. 49.
- DELEMONTEY, Y. **Le béton assemblé.** *Histoire Urbaine*, n. 3, p. 15–38, 1 dez. 2007.
- DENG, X. et al. **Impact of ettringite seeding on hydration, strength and shrinkage of Na₂SO₄ activated slag.** *Composites Part B: Engineering*, 263, 111374, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111374>.
- DEY, S. et al. **Crystal structure of gypsum and modeling of mechanical behavior.** *Journal of Applied Crystallography*, v. 49, p. 600–606, 2016.
- DOU, Y. et al. **Optimizing policy mixes for promoting prefabricated construction in developing countries: an fsQCA approach.** *Engineering, Construction and Architectural Management*, [S. l.], ahead-of-print, 2024.
- ENGBRECHT, D. C.; HIRSCHFELD, D. A. **Thermal analysis of calcium sulfate dihydrate sources used to manufacture gypsum wallboard.** *Thermochimica Acta*, Amsterdam, v. 639, p. 173–185, 2016. DOI: 10.1016/j.tca.2016.07.021.
- FENG, K. et al. **Influence of Hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) on the hydration characteristics and early phase composition of C3S-gypsum binary paste.** *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, v. 14, n. 2, p. 379–392, 2024. DOI: 10.1080/21650373.2024.2446852.
- FERRARA, G.; HUMBERT, P.; GARUFI, D.; PALMERO, P. **Evolution of CO₂ uptake degree of ordinary Portland cement during accelerated aqueous mineralisation.** *Ceramics*, v. 7, n. 4, p. 1711–1726, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ceramics7040109>.
- FERRAZ, P. F. P. et al. **Soil-cement blocks: a sustainable alternative for the reuse of industrial solid waste.** *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 56, n. 4, p. 673–686, 2021.
- FORTUNATO, M. A. **A construção com solo-cimento como alternativa para habitação de interesse social.** *Revista de Arquitetura e Urbanismo*, v. 22, p. 91–102, 2014.

- GAO, K. et al. **Effect of sodium sulfate solution coupled with wetting–drying cycles on the properties of nano-alumina-modified concrete.** *Nanomaterials*, 15(2), p. 120, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano15020120>.
- GRABIEC, A. M.; GŁODKOWSKA, W. **Some remarks on new trends in using waste aggregates in civil engineering: an overview.** *Sustainability*, v. 17, p. 233, 2025. DOI: 10.3390/su17010233.
- GENCEL, O. et al. **Properties of concrete paving blocks made with waste marble.** *Journal of Cleaner Production*, v. 21, p. 62–70, 2012.
- GOVERNO FEDERAL. **Plano Nacional de Mineração 2050.** Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2023.
- HABITARE – PROGRAMA DE TECNOLOGIA DA HABITAÇÃO. [Casa popular construída com tijolos solo-cimento]. Disponível em: http://www.habitare.org.br/ConteudoGet.aspx?CD_CONTEUDO=261. Acesso em: 15 maio 2025.
- HACINI-CHIKH, N.; ARABI, N.. **Steelmaking slag recycling as raw material and its effect on burning temperature of Portland cement clinker production.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 36, n. 2, p. 1–11, 2024.
- HASAN, N. A. et al. **Enhancing the characteristics of gypsum soil by adding hydrated lime and cement.** *Revue des Composites et des Matériaux Avancés – Journal of Composite and Advanced Materials*, v. 34, n. 2, p. 207–214, 2024. DOI: 10.18280/rcma.340210.
- HE, P. et al. **Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production.** *Journal of Cleaner Production*, v. 226, p. 1014–1023, 2019.
- HUANG, C. et al. **The preparation of C-S-H powder seeds and their effect on the early hydration performance of cement paste.** *Crystals*, v. 15, p. 73, 2025. DOI: 10.3390/cryst15010073.
- HUANG, R. et al. **Investigations on the hydration of C₃S with different water–solid ratios and subsequent carbonation.** *Magazine of Concrete Research*, v. 77, n. 7-8, p. 434–447, 2025.
- HUMADI, H. S. et al. **A review on treatment gypsum soil by using cement and lime.** *International Journal of Science and Research Archive*, v. 13, n. 2, p. 2728–2733, 2024. DOI: 10.30574/ijrsra.2024.13.2.2465.
- JAYA, A. et al. **Challenges and solutions for using waste materials in various construction applications.** *Smart and Green Materials*, v. 1, n. 2, p. 169–171, 2025. DOI: 10.70028/sgm.v1i2.22
- JAFARI, M. K. et al. **Prediction of strength properties of reinforced and stabilized sandy soil using gene expression programming and SHAP analysis.** *Construction and Building Materials*, v. 392, 2025.

- JIANG, C. et al. **Comparative study on the calcium leaching resistance of low-heat cement, moderate-heat cement, and ordinary Portland cement pastes.** *Materials*, v. 18, n. 1, p. 212, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18010212>.
- JIMÉNEZ-RIVERO, A.; GARCÍA-NAVARRO, J. **Management of end-of-life gypsum in a circular economy.** In: *Woodhead Publishing*, 2020. p. 69–79.
- JOSEPH, S.; SKIBSTED, J.; CIZER, Ö. **A quantitative study of the C₃A hydration.** *Cement and Concrete Research*, v. 115, p. 145–159, 1 jan. 2019.
- KANG, H.; KANG, S.-H.; MOON, J. **A comparative investigation of hydration reaction of Portland cement with the use of alkanolamine as a chemical admixture or grinding agent under laboratory condition.** *Journal of Building Engineering*, v. 88, p. 109214, 1 jul.
- KIRGIZ, M. S. et al. **Waste marble sludge and calcined clay brick powders in conventional cement farina production for cleaner built environment.** *Scientific Reports*, v. 15, p. 3467, 2025. DOI: 10.1038/s41598-024-83163-3.
- LEAL, A. P. **Resíduos da construção civil: uma revisão sobre as possibilidades de aplicação.** *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 7, n. 6, p. 459–483, 2021.
- LEÃO, A. S.; ARAUJO, M. C.; DE JESUS, T. B.; ALMEIDA, E. D. S. **Is the soil-cement brick an ecological brick? An analysis of the life cycle environmental and energy performance of masonry walls.** *Sustainability*, v. 14, n. 19, 12735, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141912735>.
- LEGOULLON, G. **La construction des grands ensembles en France: émergence de nouvelles vulnérabilités environnementales.** *VertigO – la revue électronique en sciences de l'environnement*, v. 16, n. 2, 2016. <https://doi.org/10.4000/vertigo.17984>.
- LE GOULLON, G.; FOURCAUT, A. **Les grands ensembles en France. Genèse d'une politique publique (1945–1962).** [s.l.]: Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques, 2014. Disponível em: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01201257>.
- LIDERI CONSULTORIA. **Panorama do setor gesseiro brasileiro.** *Relatório de Inteligência Competitiva*, 2023.
- LI, K. et al. **Effect of microscale C–S–H on the properties of Portland cement and hydration kinetics analysis at different curing temperatures.** *Composites Part B: Engineering*, v. 267, p. 111461, 2024.
- LIU, Y. et al. **Experimental investigation of how supercritical CO₂ changes the chemistry and microstructure of cements.** *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, Louisiana, set. 2024. DOI: 10.2118/220884-MS.
- LOTTHENBACH, B. et al. **Thermodynamic modeling of cement hydration: Reactions of cement minerals with water.** *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, p. 1208–1223, 2015.

- LU, Y. et al. **External sulfate attack on coal gangue cement backfilling paste: mechanisms and mitigation strategies.** *SSRN*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.5079116>.
- MAALOUF, J. et al. **Impact of alkali-silica reaction and delayed ettringite formation-induced cracking on air permeability and water diffusivity in concrete.** *Case Studies in Construction Materials*, v. 22, e04183, 2025. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e04183.
- MATSCHÉI, T.; LOTHENBACH, B.; GLASSER, F. P. **The role of calcium carbonate in cement hydration.** *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 4, p. 551–558, 2007.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials.** 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- MELO, R. H. R. Q.; HASPARYK, N. P.; TIECHER, F. **Assessment of concrete impairments over time triggered by delayed ettringite formation (DEF).** *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 35, n. 8, 2023. DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-15041.
- MIANOWSKI, A.; BIGDA, R. **Use of kinetic parameters from thermal analysis for balancing free energy of activation based on calcite decomposition.** *Energies*, v. 18, p. 570, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18030570>.
- MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior.** 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- MITIKIE, B. B.; ELSAIGH, W. A.; HARDIDO, A. S. **Enhancing termite mound soil blocks with natural fibers and Portland cement: a sustainable approach to construction.** *Engineering research express*, 31 dez. 2024.
- MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete.** 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.
- MOTA, B. M. et al. **Caracterização física, química e mineralógica do gesso reciclado para uso como adição em materiais cimentícios.** *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 10, n. 4, p. 889–910, 2017.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5. ed. São Paulo: Bookman, 2012.
- NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete.** 5. ed. Pearson Education, 2016.
- NOVYTSKYI, O.; SKRYPKA, Y. **Determination of the deformation modulus of soil-cement by laboratory methods for foundation investigations.** *Bases and Foundations*, n. 49, p. 95–103, 2024. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.49.2024.95-103>.
- OMRANI, I. A. N.; MANIUKIEWICZ, W.; ŚWIĄTKOWSKI, M. **Role of climatic cycles on the duality of chemical and physical modes of sulfate attack in concrete.** *Journal of Civil Engineering and Construction*, 13(3), p. 146–158, 2024. DOI: <https://doi.org/10.32732/jcec.2024.13.3.146>.

- PONDURU, S. A. et al. **Effects of gypsum and limestone on early-age hydration and strength optimization in belite calcium sulfoaluminate cement.** *Infrastructures*, v. 10, p. 27, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures10020027>.
- POUYA, J. et al. **Investigating chemical and cracking processes in cement paste exposed to a low external sulfate attack with emphasis on the contribution of gypsum.** *Construction and Building Materials*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134845>.
- PUERTO, J. D.; URIBE, S.; AYALA, L.; PADILLA, A.; RODRIGUEZ, A. **Reliability of reusing gypsum flat board grinded waste as a conventional plaster replacement for buildings.** *Sustainability*, Basel, v. 16, n. 18, p. 7889, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16187889>.
- RASTOGI, H.; MOHARANA, S.; SUBHASH, S. **Prediction of hydration properties and microstructure development of cement mortar using virtual cement and concrete testing laboratory (VCCTL).** *Discover Civil Engineering*, v. 1, p. 152, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00155-y>.
- RIBEIRO, J. M. G. et al. **Incorporation of liquid WTP sludge into compacted soil–cement mixtures.** *Processes (Basel, Switzerland)*, v. 12, n. 7, p. 1430, 2024.
- ROCHA, D. T.; KOLLING, E. M. **Análise de concreto autoadensável com inserção de resíduos de construção.** *Research, Society and Development*, v. 10, n. 12, 2021.
- ROŠKOVIĆ, T.; BJEGOVIĆ, D. **Role of mineral additions in reducing CO₂ emission.** *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 5, p. 971–976, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.028>.
- SAAD, L. et al. **Analysis of the influence of excavated soil sand characteristics on the rheological and mechanical properties of hydraulic mortars.** *Buildings*, Basel, v. 15, n. 3, p. 1–18, 2025.
- SANTA ROSA, F. A. et al. **Sustainable alternative for the production of soil cement bricks using marble and construction waste.** *Journal of Materials Science*, v. 13, n. 1, p. 45–54, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5539/jms.v13n1p45>.
- SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry.** *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 2–26, 2018.
- SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M. **Advances in understanding hydration of Portland cement.** *Cement and Concrete Research*, v. 78, p. 38–56, 2015.
- SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials.** CRC Press, 2018.
- SELVAM, D. C.; DEVARAJAN, Y. **Bio-inspired hybrid materials for sustainable energy: advancing bioresource technology and efficiency.** *Materials Today*

Communications, v. 46, p. 112647, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112647>.

- SHARMA, S.; SINGH, B.; SINGH, S. **Utilization and effect of specimen shape and size on the strength properties of concrete.** *Journal of Asian Concrete Federation*, **10**(2), p. 1–13, 2024. DOI: <https://doi.org/10.18702/acf.2024.10.2.1>.
- SHAO, C. et al. **Recycling waste gypsum and calcium carbide slag for the production of all-solid-waste supersulfated cement.** *Physics of Fluids*, **36**, 127159, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0244454>.
- SHIGAPOV, R. I. et al. **Evaluation of the durability of dry mix compositions based on gypsum and gypsum cement for 3D printing.** *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*, n. 7, p. 26–32, 2024. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-826-7-26-32
- SILVA, A. et al. **Processamento e caracterização do gesso reciclado para uso em materiais cimentícios.** *Revista Brasileira de Materiais Sustentáveis*, v. 4, n. 1, p. 35–44, 2015.
- SILVA, L. R.; GAMA, K. N. C.; SALLES, P. V.; BRAGA, F. C. S. **Concreto com cinza de casca de arroz (CCA) e resíduos de construção e demolição (RCD).** *Research, Society and Development*, v. 8, n. 4, 2019.
- SILVA, R. F. et al. **Avaliação do uso de gesso reciclado em pisos intertravados.** *Revista Matéria*, v. 26, n. 4, p. 1–10, 2021.
- SINDUSGESSO. **Relatório Anual do Setor de Gesso no Brasil.** Recife: Sindicato das Indústrias do Gesso do Estado de Pernambuco, 2022.
- SUN, W. et al. **Microscopic transport and degradation behavior of CO₂ in C–S–H with varying Ca/Si ratios during carbonation.** *Buildings*, v. 14, p. 2808, 2024. DOI: 10.3390/buildings14092808.
- TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** 2nd ed. London: Thomas Telford, 1997.
- TAYLOR-LANGE, S. C. et al. **Characterization of mineralogical behavior in stabilized soils.** *International Journal of Geotechnical Engineering*, v. 10, n. 1, p. 1–10, 2012.
- THIEBAUT, Y. et al. **Effects of stress on concrete expansion due to delayed ettringite formation.** *Construction and Building Materials*, v. 183, p. 626–641, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.172.
- TORAIGYR, A. D. et al. **Analysis of Asian countries in construction waste recycling and introduction in Kazakhstan.** *Vestnik Torajgyrov Universiteta. Série Químico-Biológica*, n. 4, 2024. DOI: 10.48081/TNAO2663.
- TORRES-ORTEGA, R. et al. **Mechanical properties of hydraulic concretes with partial replacement of Portland cement by pozzolans obtained from agro-industrial residues: a review.** *Heliyon*, 11(1), e41004, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41004>.

- TRAN, D. L. et al. **α -Calcium sulfate hemihydrate bioceramic prepared via salt solution method to enhance bone regenerative efficiency.** *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 120, p. 293–301, 2023. DOI: 10.1016/j.jiec.2022.12.036.
- USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries – Gypsum.** Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 2023. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center>.
- VAGTHOLM, A. et al. **Post-war housing solutions in the UK: exploring the potential of alternative building systems.** *Journal of Housing and the Built Environment*, v. 38, p. 105–122, 2023.
- VIPULANANDAN, C.; MOHAMMED, A. **XRD and TGA, swelling and compacted properties of polymer treated sulfate contaminated CL soil.** *Journal of Testing and Evaluation*, v. 44, n. 6, p. 2270–2284, 2016. DOI: 10.1520/JTE20140280.
- WANG, L. et al. **Experimental study on the mechanical properties and microstructural mechanisms of coal gangue-based cementitious materials synergistically activated by desulfurization gypsum and lime.** *Polymers*, v. 17, n. 7, p. 932, 2025. DOI: 10.3390/polym17070932.
- WAGNER, J. S. et al. **Comparative analysis of mold-cast and 3D-printed cement-based components: implications for standardization in additive construction.** *Canadian Journal of Civil Engineering*, 52(4), p. 388–404, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjce-2024-0169>.
- WANG, X. et al. **Mechanical properties and durability performance of low liquid limit soil stabilized by industrial solid waste.** *Materials*, v. 18, p. 469, 2025. DOI: 10.3390/ma18020469
- WANG, X.; PLANK, J. **C–S–H–PCE nanocomposites as hydration accelerator in calcined clay-limestone-blended low carbon cement.** *Zeitschrift für Naturforschung B*, v. 79, n. 12, p. 651–664, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1515/znb-2024-0083>.
- WBCSD – WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Cement Sustainability Initiative – Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry.** Geneva: IEA/WBCSD, 2018.
- WIJERATHNE, W. D. C. C.; SAMARAWEERA, R. L.; RAJAPAKSHA, R. P. T. N. **Physicochemical properties of a brick made from clay brick waste/cement/rice husk ash – insights from the microstructure and FTIR analyses.** Proceedings of the 5th SLIIT International Conference on Advancements in Sciences and Humanities, p. 82–88, 4 dez. 2024. *Faculty of Humanities and Sciences, SLIIT*. DOI: <https://doi.org/10.54389/gojh6897>.
- WILD, S.; KHATIB, J. M. **Portlandite consumption in pozzolanic reaction of metakaolin in cement pastes.** *Cement and Concrete Research*, v. 27, n. 1, p. 103–112, 1997.

- XIA, X. et al. **Experimental investigation of a C-S-H nanocrystalline nucleus modified with PCE dispersant on the early-age mechanical behavior of oil well cement paste.** *Materials*, v. 18, p. 326, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma18020326>.
- XIAN, X.; LOGAN, C.; SHAO, Y. **Dimensional stability of cement paste and concrete subject to early-age carbonation curing.** *Materials and Structures*, v. 55, n. 94, 2022. DOI: 10.1617/s11527-022-01926-8.
- YANG, Y.; ZHANG, Q.; RAN, Q.; SHU, X.; HAN, F.; LIU, J. **Effect of the hydration of C3A-gypsum on the time-dependent flowability of CaCO₃-C₃A-gypsum paste.** *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, p. 393–404, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/21650373.2024.2440743>.
- YUSUF, M. O. **Bond characterization in cementitious material binders using Fourier-transform infrared spectroscopy.** *Applied Sciences*, Basel, v. 13, n. 5, p. 3353, 2023. DOI: 10.3390/app13053353.
- ZHUANG, D.; CHEN, Z.; SUN, B. **Thermal decomposition of calcium carbonate at multiple heating rates in different atmospheres using the techniques of TG, DTG, and DSC.** *Crystals*, v. 15, p. 108, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst15020108>
- ZHU, J. et al. **Revealing the solid solution tendency of tungsten ions in phases of Ordinary Portland cement clinker: A study based on experiments and DFT calculations.** *Science of The Total Environment*, v. 912, p. 170929, 2024
- ZUNINO, F.; SCRIVENER, K. L. **Insights on the role of alumina content and the filler effect on the sulfate requirement of PC and blended cements.** *Cement and Concrete Research*, v. 154, p. 106720, 2022. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106720.
- ZUNINO, F. et. al. **Surface properties of clinker phases and clay minerals characterized by inverse gas chromatography (IGC) and their link to reactivity.** *Cement and Concrete Research*, v. 178, p. 107458, 2024.