UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLIMERO À BASE DE RESÍDUO DE PERLITA PARA ESTABILIZAÇÃO DE COPRODUTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

GABRIELLA MELO DE DEUS VIEIRA, M.Sc.

ORIENTADORA: PROFª. MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE

COORIENTADOR: PROF. JOSÉ WILSON DOS SANTOS FERREIRA

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD-218/2026

BRASÍLIA / DF: JUNHO / 2026

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLIMERO À BASE DE RESÍDUO DE PERLITA PARA ESTABILIZAÇÃO DE COPRODUTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

GABRIELLA MELO DE DEUS VIEIRA, M.Sc.

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

_____

MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE. D.Sc (UnB)
(ORIENTADOR)

_____

JOSÉ WILSON DOS SANTOS FERREIRA, D.Sc. (UnB)
(COORIENTADOR)

_____

GERMÁN MARTINS VINUEZA FREIRE, Dr. rer. nat. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

_____

NILO CESAR CONSOLI, D.Sc. (UFRGS)
(EXAMINADOR EXTERNO)

_____

ROBERTO AGUIAR DOS SANTOS, D.Sc. (UFV)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 26 de JUNHO de 2026.

FICHA CATALOGRÁFICA

VIEIRA, GABRIELLA MELO DE DEUS
Desenvolvimento de Geopolímero à Base de Resíduo de Perlita para Estabilização de Coproduto de Rejeito de Minério de Ferro [Distrito Federal] 2026
xix, 150 p, 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2026)
Tese de Doutorado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil

1. Novos Materiais Geotécnicos	3. Geopolímeros
2. Obras Geotécnicas	4. Coproduto de Rejeito
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VIEIRA, G.M.D. Desenvolvimento de Geopolímero à Base de Resíduo de Perlita para Estabilização de Coproduto de Rejeito de Minério de Ferro. Tese de Doutorado, Publicação G.DT-218/2026. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 150p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Gabriella Melo de Deus Vieira

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: **Desenvolvimento de Geopolímero à Base de Resíduo de Perlita para Estabilização de Coproduto de Rejeito de Minério de Ferro**

GRAU / ANO: Doutor / 2026

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Gabriella Melo de Deus Vieira
CLN 406 Bloco D, Apto 209, Asa Norte
CEP: 70.847-540 – Brasília/DF – Brasil

"Ocupa-te dos teus deveres profissionais por Amor; leva a cabo todas as coisas por Amor, insisto, e verificarás - precisamente porque amas, ainda que saboreies a amargura da incompreensão, da injustiça, do desagradecimento e até do próprio fracasso humano - as maravilhas que o teu trabalho produz. Frutos saborosos, semente de eternidade!"

São Josemaria Escrivá

AGRADECIMENTOS

A Deus, que é Pai, Filho e Espírito Santo, por sua infinita bondade e por me conceder fortaleza, sabedoria e perseverança ao longo desta caminhada.

À Sagrada Família, com Maria e José, pela proteção, intercessão e amparo nos momentos de desafio e de conquista.

Aos meus pais, Silvane e Ernane, por todo amor, dedicação e pelos inúmeros sacrifícios realizados para que eu pudesse chegar até aqui. Obrigada por acreditarem em mim, por me incentivarem a buscar meus sonhos e por serem meu maior exemplo de honestidade, trabalho e determinação.

Às minhas madrinhas, Odete, Rosa e Rosângela, pelo carinho, apoio constante e pelas orações que sempre fazem por mim.

Ao meu noivo, Kadu Manzoli, por estar ao meu lado ao longo destes quase dois anos de relacionamento e, principalmente, durante a fase mais intensa deste doutorado. Obrigada pela paciência, compreensão e apoio incondicional em todos os momentos. Agradeço por cada gesto de cuidado, pelas louças lavadas, pelas refeições preparadas, pelas horas dedicadas a me ajudar direta ou indiretamente, e por assumir tantas responsabilidades para que eu pudesse me dedicar aos ensaios, às análises e à escrita desta tese. Obrigada por compartilhar comigo as alegrias, as angústias, os desafios e as conquistas desta jornada, sempre acreditando no meu potencial, mesmo quando eu mesma duvidava. Sua presença, incentivo e amor foram fundamentais para que este trabalho se tornasse realidade.

A todos os meus familiares, aos familiares do Kadu, aos nossos amigos que estiveram na torcida por mim e rezaram por esta conquista, meu mais sincero agradecimento. Agradeço com muito carinho aos meus amigos do Clube de Leitura Tolkienianos, à Silvana, Camila, Dite, Milton, Ana, Ester, Thaís, Alessandra, Jade, Natália, Stella, Gabriella, Ângela, Maristella, Érika, Danylo, Soane, Luan e Mateus; e a tantos outros que, de diferentes formas, fizeram parte desta caminhada, oferecendo apoio, incentivo, amizade e orações. Que Deus recompense generosamente cada um de vocês!

Em memória de Marianna Vieira e Ilda Vieira, minha querida prima e minha amada avó, que partiram durante esta caminhada. A saudade é imensa, e a caminhada sem vocês não tem sido fácil, mas guardo a esperança de que estejam na glória de Deus. Obrigada por tudo, amo vocês para sempre.

À minha orientadora, Prof.ª Michéle Casagrande, pela confiança, orientação e pelos valiosos ensinamentos transmitidos ao longo deste trabalho e também da vida. Obrigada por acreditar no meu potencial, pelas oportunidades concedidas, pela paciência nos momentos de dificuldade e por me incentivar constantemente a crescer como pesquisadora e profissional.

Ao meu coorientador, Prof. José Wilson Ferreira, pelas contribuições técnicas, pelo apoio e pelas discussões que muito enriqueceram esta tese. Agradeço também pela disponibilidade e agilidade na revisão dos artigos científicos desenvolvidos ao longo desta pesquisa. Sua experiência e comprometimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Roberto Aguiar, por acreditar nesta pesquisa desde seus primeiros passos e por sua importante contribuição na obtenção dos materiais que possibilitaram sua realização. Meu sincero agradecimento pelo apoio, incentivo e confiança depositada neste trabalho.

Ao pessoal do grupo de oração, Angelus, em especial ao tio Leandro, tia Josy, Elton, Rodrigo Café, Kally e ao nosso querido Padre Ricardo, pelo apoio, pelas orações, pela compreensão diante das minhas ausências e por sempre intercederem por mim ao longo desta caminhada.

Aos colegas do grupo de pesquisa New Geotechnical Materials, em especial ao Bruno, Lídia, Augusto, Nathália, Feliphe e Daniel, e ao técnico Rogério, pela convivência, troca de conhecimentos, apoio mútuo e pelos momentos compartilhados ao longo destes anos.

À Vale S.A., pelo fornecimento do coproduto de rejeito utilizado nesta pesquisa e pelo incentivo financeiro que possibilitou a execução de grande parte dos trabalhos experimentais.

À Buntech, pelo fornecimento do resíduo de perlita utilizado como matéria-prima para a produção dos geopolímeros estudados nesta tese.

Aos técnicos e colaboradores dos laboratórios de Geoquímica, Geociências e Micropaleontologia, em especial ao Flávio, Miller e Lucas, pelo suporte na execução das análises químicas, mineralógicas e microestruturais, contribuindo muito no aprofundamento dos resultados obtidos nesta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de doutorado, cujo apoio financeiro foi essencial para a dedicação e desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta tese e para o meu crescimento pessoal e profissional ao longo desta trajetória. Muito obrigada.

DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLIMERO À BASE DE RESÍDUO DE PERLITA PARA ESTABILIZAÇÃO DE COPRODUTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

RESUMO

Os rompimentos das barragens de Mariana (2015) e de Brumadinho (2019) despertaram, na comunidade técnica e nos órgãos governamentais, a necessidade de mudanças na legislação relativa aos métodos construtivos e monitoramento dessas estruturas, bem como o desenvolvimento de tecnologias para a disposição de rejeitos de mineração; dentre elas tem-se o reprocessamento dos rejeitos na formação de coprodutos. Neste contexto, propõe-se o desenvolvimento de um geopolímero à base de resíduo de perlita para estabilização de um coproduto de rejeito de minério de ferro. Parte-se da premissa de que a utilização de coprodutos pode reduzir passivos ambientais e melhorar o desempenho hidromecânico de materiais. O programa experimental avaliou a influência do teor de geopolímero (20 e 30%), da massa específica seca (1,7 e 1,8 g/cm³), do teor de umidade (12 e 14%) e do tempo de cura (7, 14, 28 e 56 dias). Foram realizados ensaios de caracterização física (granulometria, massa específica real dos grãos, compactação e índice de vazios), química (análises químicas por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado – ICP-OES), ambiental (lixiviação) e mineralógica (difração de raios X – DRX), seguidos de ensaios mecânicos (compressão não confinada, triaxiais consolidados isotropicamente drenados – CID, e não drenados – CIU e triaxiais cíclicos), hidráulicos (sucção, perda de massa por imersão e permeabilidade) e microestruturais (microscopia eletrônica de varredura – MEV e microtomografia). Nos ensaios CID e CIU, a análise conjunta dos resultados permitiu definir uma única envoltória de resistência para cada tempo de cura. Enquanto o coproduto bruto apresentou comportamento predominantemente friccional ($\varphi' = 32,7°$ e $c' = 0$ kPa), os compósitos atingiram valores de $\varphi' = 29,2°$ e $c' = 192,5$ kPa aos 56 dias. Nos triaxiais cíclicos, verificou-se aumento do módulo de resiliência com o avanço da cura e aumento das tensões confinante e desvio, atingindo valores próximos de 2000 MPa aos 56 dias, além de menor suscetibilidade às deformações permanentes. Do ponto de vista ambiental, os ensaios de lixiviação demonstraram que o geopolímero atuou tanto na estabilização mecânica quanto no encapsulamento dos constituintes do coproduto, reduzindo a mobilidade de elementos químicos e minimizando a lixiviação de substâncias potencialmente perigosas. Por fim, as análises microestruturais confirmaram a formação de uma matriz geopolimérica aderida às partículas do coproduto, promovendo a redução da porosidade e maior integração estrutural. Conclui-se que o geopolímero mostrou-se eficaz na estabilização de coprodutos de rejeito de minério de ferro, constituindo uma alternativa inovadora e sustentável com potencial aplicação em pilhas, aterros, pavimentos e outras estruturas geotécnicas.

Palavras-chave: Geopolímeros; Coproduto de rejeito; Resíduo de perlita; Estabilização de rejeitos; Resistência ao Cisalhamento.

DEVELOPMENT OF PERLITE WASTE-BASED GEOPOLYMER FOR STABILIZATION OF IRON ORE TAILINGS BYPRODUCT

ABSTRACT

The failures of Mariana (2015) and Brumadinho (2019) tailings dams highlighted, within the technical community and government agencies, the need for changes in legislation regarding the construction methods and monitoring of these structures, as well as the development of technologies for the disposal of mining tailings. Among these alternatives is the reprocessing of tailings into byproducts. In this context, this study proposes the development of a geopolymer based on perlite waste for the stabilization of an iron ore tailings byproduct. The underlying premise is that the use of byproducts can reduce environmental liabilities while improving the hydromechanical performance of materials. The experimental program evaluated the influence of geopolymer content (20 and 30%), dry density (1.7 and 1.8 g/cm³), moisture content (12 and 14%), and curing time (7, 14, 28, and 56 days). Physical characterization tests (particle size distribution, specific gravity of solids, compaction and void ratio), chemical analyses (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry – ICP-OES), environmental tests (leaching), and mineralogical analyses (X-ray diffraction – XRD) were carried out, followed by mechanical tests (unconfined compression, consolidated isotropically drained – CID, consolidated isotropically undrained – CIU, and cyclic triaxial tests), hydraulic tests (suction, mass loss by immersion, and permeability), and microstructural analyses (scanning electron microscopy – SEM and micro-computed tomography). For the CID and CIU tests, the combined analysis of the results allowed the definition of a single strength envelope for each curing period. While the untreated byproduct exhibited a predominantly frictional behavior ($\varphi' = 32.7°$ and $c' = 0$ kPa), the stabilized composites reached values of $\varphi' = 29.2°$ and $c' = 192.5$ kPa after 56 days of curing. In the cyclic triaxial tests, the resilient modulus increased with curing time and with increasing confining and deviator stresses, reaching values close to 2000 MPa after 56 days, while also exhibiting lower susceptibility to permanent deformation. From an environmental perspective, leaching tests demonstrated that the geopolymer acted not only as a mechanical stabilizing agent but also as an encapsulating matrix for the byproduct constituents, reducing the mobility of chemical elements and minimizing the leaching of potentially hazardous substances. Finally, microstructural analyses confirmed the formation of a geopolymeric matrix bonded to the byproduct particles, promoting porosity reduction and greater structural integration. It is concluded that the geopolymer was effective in the stabilization of iron ore tailings byproducts, representing an innovative and sustainable alternative with potential applications in tailings stacks, embankments, pavements, and other geotechnical structures.

Keywords: Geopolymers; Tailings byproduct; Perlite waste; Tailings stabilization; Shear strength.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO 1
1.1 - OBJETIVOS 2
1.1.1 - OBJETIVO GERAL 3
1.1.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3
1.2 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 3
2 - REVISÃO DA LITERATURA 5
2.1 - COPRODUTOS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO 5
2.1.1 - ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS 8
2.1.2 - FORMA E TEXTURA DAS PARTÍCULAS 10
2.1.3 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO 11
2.2 - GEOPOLÍMEROS 13
2.2.1 - TIPO DE METODOLOGIA 16
2.2.2 - CONCENTRAÇÃO DE ATIVADOR 18
2.2.3 - GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS 19
2.2.4 - TEMPO DE CURA 19
2.2.5 - GEOPOLIMERIZAÇÃO NA GEOTECNIA 20
2.3 - PERLITA 23
2.4 - ÍNDICE POROSIDADE E TEOR VOLUMÉTRICO DE AGENTE 27
3 - MATERIAIS E MÉTODOS 30
3.1 - MATERIAIS 30
3.1.1 - COPRODUTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO E AREIA 30
3.1.2 - RESÍDUO DE PERLITA 31
3.1.3 - ATIVADOR ALCALINO 31
3.2 - MÉTODOS 32
3.3 - TESTES INICIAIS 33
3.4 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA 35
3.5 - CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS 37
3.6 - ENSAIOS MECÂNICOS 38
3.6.1 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA 38

3.6.2 - TRIAXIAIS MONOTÔNICOS CID E CIU 39
3.6.3 - TRIAXIAIS CÍCLICOS DE CARGAS REPETIDAS 41
3.7 - ENSAIOS HIDRÁULICOS 43
3.7.1 - SUCÇÃO 44
3.7.2 - PERDA DE MASSA POR IMERSÃO 45
3.7.3 - PERMEABILIDADE 46
3.8 - ANÁLISES QUÍMICAS E MINERALÓGICAS 47
3.8.1 - DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) 47
3.8.2 - ANÁLISES QUÍMICAS POR ICP-OES 48
3.8.3 - POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH) 50
3.8.4 - ANÁLISE DO LIXIVIADO 51
3.9 - ENSAIOS DE MICROESTRUTURA 51
3.9.1 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) 52
3.9.2 - MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA (μCT) 53
3.10 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS-CHAVE 54
3.11 - ANÁLISE ESTATÍSTICA 54
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES 56
4.1 - CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA 56
4.2 - CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA 58
4.2.1 - DRX 58
4.2.2 - ANÁLISES QUÍMICAS DOS MATERIAIS (ICP-OES) 60
4.2.3 - ANÁLISES QUÍMICAS DO LIXIVIADO 62
4.3 - COMPORTAMENTO MECÂNICO 65
4.3.1 - COMPACTAÇÃO 65
4.3.2 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA 66
4.3.3 - COMPORTAMENTO MECÂNICO DRENADO E NÃO DRENADO 81
4.3.4 - MÓDULO DE RESILIÊNCIA 105
4.3.5 - DEFORMAÇÃO PERMANENTE 113
4.4 - CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA 115
4.4.1 - SUCÇÃO 115

4.4.2 - PERDA DE MASSA POR IMERSÃO 116
4.4.3 - PERMEABILIDADE 120
4.5 - ANÁLISES MICROESTRUTURAIS 121
4.5.1 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) 121
4.5.2 - MICROTOMOGRAFIA 123
5 - CONCLUSÃO 126
5.1 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema de produção de minério de ferro na mina de Brucutu (adaptado de GOLEV et al., 2022). 6
Figura 2.2 - Pátio de Estocagem de areia sustentável na mina de Brucutu (VALE S.A., 2023). 7
Figura 2.3 - Estrutura e análise dos parâmetros de forma de partículas (GOLEV et al., 2022). 11
Figura 2.4 - Resultados do ensaio de cisalhamento direto com areia de minério: a) Gráfico Tensão Cisalhante versus Tensão Normal; b) Gráfico Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (GOLEV et al., 2022). 11
Figura 2.5 - Resultados dos ensaios traixais CD e CIU com areia de minério. Trajetórias de tensão: a) Ensaio CD; b) Ensaio CIU (Vizcarra et al., 2025). 12
Figura 2.6 - Resultados dos ensaios traixais CD e CIU com areia de minério. q/p' versus Deformação Axial: a) Ensaio CD; b) Ensaio CIU (Vizcarra et al., 2025). 12
Figura 2.7 - Resultados dos ensaios traixais CD e CIU com areia de minério. Tensão Desviadora versus Deformação Axial: a) Ensaio CD; b) Ensaio CIU (Vizcarra et al., 2025). 12
Figura 2.8 - Resultados dos ensaios traixais CD e CIU com areia de minério: a) Deformação Volumétrica versus Deformação Axial; b) Ensaio CIU (Vizcarra et al., 2025). 13
Figura 2.9 - Tipos de polissialatos: a) Poli(sialato) PS; b) Poli(sialato-siloxo) PSS e c) Poli(sialato-dissiloxo) PSDS (modificado de Davidovits, 1989). 14
Figura 2.10 - Esquema ilustrativo dos processos reacionais envolvidos na geopolimerização. Fonte: Adaptado de Van Deventer et al. (2007). 16
Figura 2.11 - Tipos de métodos de fabricação de geopolímeros, One Part e Two Part. 17
Figura 2.12 - Curva de dosagem η/Civ para o solo residual Arenito Botucatu (CONSOLI et al., 2007) 27
Figura 3.1 - Materiais Estabilizados: a) Coproduto de rejeito de minério de ferro e b) areia. 31
Figura 3.2 - Resíduo de Perlita: a) sem moagem; b) moído. 31
Figura 3.3 - Hidróxido de sódio (NaOH): a) sem moagem; b) moído. 32
Figura 3.4 - Esquema do programa de ensaios da pesquisa. 33
Figura 3.5 - Análises táteis-visuais: a) Amostras de materiais estabilizados com diferentes teores de geopolímero e umidades de moldagem e b) Amostras com diferentes teores e temperaturas de cura. 34
Figura 3.6 - Pentapicnômetro utilizado na pesquisa. 36
Figura 3.7 - Ensaios de índices de vazios: a) máximo e b) mínimo. 37

Figura 3.8 - Moldagem de corpos de prova cilíndricos 5x10 cm para ensaios de resistência.38
Figura 3.9 - Ensaios de resistência à compressão não confinada: a) Corpos de prova moldados; b) Equipamento e c) Corpo de prova após ruptura.....39
Figura 3.10 - Equipamento triaxial monotônico de 3,2 MPa: a) Sistema completo conectado à pressurização e b) Prensa. 41
Figura 3.11 – Ensaio triaxial cíclico: a) Equipamento; b) C100-14-1,8; e compósitos C70G30-14-1,8 com c) 7 dias de cura; d) 14 dias de cura; e) 28 dias de cura; f) 28 dias de cura após imersão e g) 56 dias de cura ao ar. 43
Figura 3.12 - Equipamento WP4C da METER Group.....45
Figura 3.13 - Execução de ensaio de perda de massa por imersão. 46
Figura 3.14 - Ensaios de permeabilidade: a) Equipamento de permeabilidade à carga constante, b) Amostra de rejeito bruto; c) Equipamento de permeabilidade à carga variável e d) Amostras de coproduto e do compósito. 47
Figura 3.15 - Preparação das amostras para o procedimento de Difração de Raios-X: a) Mini moinho de bolas; b) Destorroamento das amostras em recipiente de Ágata roxa; c) Colocação das amostras nas placas para introduzir no equipamento e d) Difratômetro de Raios-X.....48
Figura 3.16 - Análises químicas dos materiais: a) Forno Mufla utilizado na pesquisa; b) Amostras fundidas; c) Agitação e d) Equipamento de ICP-OES.....50
Figura 3.17 - Amostras de lixiviado para análise química.....51
Figura 3.18 - Amostras metalizadas para análise MEV: a) C100 e b) C70G30. 52
Figura 4.1 - Curvas granulométricas obtidas no estudo.....56
Figura 4.2 – Resultados da análise por difração de raios-x.....59
Figura 4.3 – Curvas de compactação do coproduto e compósitos coproduto-geopolímero. .65
Figura 4.4 - Resistência à compressão não confinada dos compósitos coproduto-geopolímero em função do período de cura ao ar de: a) 7; b) 14; c) 28 e d) 56 dias. 67
Figura 4.5 - Resistência à compressão não confinada dos compósitos areia-geopolímero em função do período de cura ao ar de: a) 7; b) 14; c) 28 e d) 56 dias. 70
Figura 4.6 – Resultados de RCNC: a) Resistência pico versus Tempo de cura ao ar dos compósitos coproduto- geopolímero; b) Umidade versus Tempo de cura dos compósitos coproduto-geopolímero; c) Resistência pico versus Tempo de cura dos compósitos areia-geopolímero e d) Umidade versus Tempo de cura ao ar dos compósitos areia-geopolímero.72
Figura 4.7 – Tensões de pico dos compósitos coproduto-geopolímero. 74
Figura 4.8 – Tensões de pico dos compósitos areia-geopolímero.....74

Figura 4.9 – Ruptura dos compósitos coproduto-geopolímero em cura de: a) 7; b) 14; c) 28 e d) 56 dias. 76
Figura 4.10 - Relação da RCNC com o parâmetro Porosidade/ Teor de agente cimentante para os compósitos coproduto-geopolímero em cura de: a) 7; b) 14; c) 28 e d) 56 dias. 77
Figura 4.11 – Gráfico de Pareto. 80
Figura 4.12 – Gráfico Tensão Desviadora versus Deformação Axial e Deformação Volumétrica versus Deformação Axial dos Ensaios Triaxiais CID para o coproduto bruto e compósito C70G30: a) C70G30 - 7 dias; b) C70G30 - 14 dias; c) C70G30 - 28 dias d) C70G30 - 56 dias e e) C100-14-1,8 – 0 dias. 83
Figura 4.13 – Gráfico Trajetórias de Tensão dos Ensaios Triaxiais CID: a) C70G30-14-1,8 - 7 dias; b) C70G30- 14-1,8 - 14 dias; c) C70G30-14,18 - 28 dias d) C70G30-14-1,8 - 56 dias e e) C100-14-1,8 – 0 dias. 88
Figura 4.14 – Gráfico Taxa de Dilatância versus q/p': a) C70G30-14-1,8 - 7 dias; b) C70G30-14-1,8 - 14 dias; c) C70G30-14,18 - 28 dias d) C70G30-14-1,8 - 56 dias e e) C100-14-1,8 – 0 dias. 90
Figura 4.15 – Gráfico Tensão Desviadora versus Deformação Axial dos Ensaios Triaxiais CIU: a) C70G30 - 7 dias; b) C70G30 - 14 dias; c) C70G30 - 28 dias d) C70G30 - 56 dias e e) Coproduto bruto. 94
Figura 4.16 – Gráfico Trajetórias de Tensão dos Ensaios Triaxiais CIU: a) C70G30 - 7 dias; b) C70G30 - 14 dias; c) C70G30 - 28 dias d) C70G30 - 56 dias e e) C100-14-1,8 – 0 dias..... 96
Figura 4.17 – Gráfico Trajetórias de Tensão Efetivas: a) C70G30 - 7 dias; b) C70G30 - 14 dias; c) C70G30 - 28 dias d) C70G30 - 56 dias e e) C100-14-1,8 – 0 dias. 99
Figura 4.18 – Gráfico dos resultados de Módulo de Resiliência pela norma DNIT 134 no topo da amostra: a) C70G30 - 7 dias; b) C70G30 - 14 dias; c) C70G30 - 28 dias d) C70G30 - 56 dias e e) C100-12-1,8 – 0 dias. 106
Figura 4.19 – Gráfico dos resultados de Módulo de Resiliência pela norma DNIT 134 no terço médio da amostra: a) C70G30 - 7 dias; b) C70G30 - 14 dias; c) C70G30 - 28 dias e d) C70G30 - 56 dias. 108
Figura 4.20 – Gráfico dos resultados de Módulo de Resiliência pela norma DNIT 134 no terço médio da amostra com imersão: a) C70G30 - 14 dias; b) C70G30 - 28 dias e c) C70G30 - 56 dias. 109
Figura 4.21 – Gráfico dos resultados de Módulo de Resiliência pela norma 181 (modelo combinado). 110

Figura 4.22 – Gráfico dos resultados de Deformação Permanente nos compósitos C70G30. 113
Figura 4.23 – Sucção Total versus Tempo de cura ao ar: a) C100-12-1,7 e C70G30-12-1,7; b) C100-14-1,7 e C70G30-14-1,7; c) C100-12-1,8 e C70G30-12-1,8 e d) C100-14-1,8 e C70G30-14-1,8..... 116
Figura 4.24 – Perda de Massa Por Imersão versus Tempo de Cura ao Ar. 117
Figura 4.25 – Amostras ensaiadas quanto à perda de massa por imersão: a) C20G80 - 14 dias de cura; b) C30G70 - 14 dias de cura; c) C20G80 - 28 dias de cura a e d) C30G70 - 28 dias de cura ao ar. 119
Figura 4.26 – Imagens obtidas por MEV: a) Coproduto bruto (50×); b) Compósito C30G70-14-1,8 (50× - 28 dias); c) Coproduto bruto (1.000×) e d) Compósito C30G70-14-1,8 (1000× - 28 dias). 122
Figura 4.27 – Imagens de microtomografia: a) C100-14-1,8 e b) Compósito C70G30-14-1,8 – 28 dias. 123
Figura 4.28 – Imagens da porosimetria: a) coproduto bruto (Identificação do rejeito + hematita); b) Compósito C70G30-14-1,8 – 28 dias (Identificação do rejeito + hematita) e c) Compósito C70G30-14-1,8 – 28 dias (Identificação do geopolímero). 124

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resultados das análises físico-químicas com a areia de minério da VALE S.A. (modificado de GOLEV, 2022). 8

Tabela 2.2 - Resultados da caracterização da areia de minério (Vizcarra et al., 2025). 10

Tabela 2.3 - Razões molares indicadas para um NaPSS (DAVIDOVITS, 1982). 14

Tabela 2.4 – Estudos voltados à utilização de geopolímeros. 22

Tabela 2.5 - Pesquisa de estudos voltados à utilização de perlita e resíduo de perlita. 26

Tabela 3.1 - Quantitativo de ensaios para a tese. 33

Tabela 3.2 - Parâmetros de análise da pesquisa. 34

Tabela 4.1 – Classificação SUCS. 57

Tabela 4.2 – Resumo dos resultados obtidos dos ensaios de caracterização geotécnica. 57

Tabela 4.3 – Resumo dos resultados das análises químicas dos materiais utilizados na tese. 60

Tabela 4.4 – Resultados das medições do pH. 62

Tabela 4.5 – Resultados das análises químicas dos lixiviados. 63

Tabela 4.6 – Tabela ANOVA para os compósitos coproduto-geopolímero com interações de quarta ordem. 79

Tabela 4.7 – Comparação entre os modelos ANOVA considerando os efeitos de segunda, terceira e quarta ordem. 79

Tabela 4.8– Resumo dos resultados dos ensaios triaxiais monotômicos. 103

Tabela 4.9 – Parâmetros obtidos do Módulo de Resiliência pela norma 181 (modelo combinado). 112

Tabela 4.10 – Parâmetros obtidos de Deformação Permanente (Modelo de Monismith). 114

Tabela 4.11 - Resultados dos ensaios de Perda de Massa Por Imersão. 118

Tabela 4.12 – Resumo dos resultados dos ensaios de permeabilidade. 120

Tabela 4.13 – Resultados das análises de microtomografia. 124

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
CID	Consolidado isotropicamente drenado
CIU	Consolidado isotropicamente não drenado
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DP	Deformação permanente
DRX	Difração de raios X
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICP-OES	Espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MR	Módulo de resiliência
NaOH	Hidróxido de sódio
NBR	Norma Brasileira
PIB	Produto Interno Bruto
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RCNC	Resistência à Compressão Não Confinada
SEM	*Scanning Electron Microscopy*
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UNEP	*United Nations Environment Programme*
USCS	*Unified Soil Classification System*
WP4C	Analisador de potencial hídrico

LISTA DE SÍMBOLOS

P100	Perlita bruta
C100	Coproduto bruto
A100	Areia bruta
C80G20	80% de coproduto + 20% de pasta geopolimérica
C70G30	70% de coproduto + 30% de pasta geopolimérica
B_{iv}	Teor volumétrico de agente cimentante
c'	Intercepto coesivo efetivo
Cc	Coeficiente de curvatura
Cu	Coeficiente de uniformidade
D	Taxa de dilatância
D10, D30, D60	Diâmetros efetivos correspondentes a 10%, 30% e 60% passante
e	Índice de vazios
G	Módulo cisalhante
Gs	Massa específica dos grãos
pH	Potencial hidrogeniônico
k	Coeficiente de permeabilidade
M	Inclinação da linha de estado crítico / relação q/p' no estado crítico
p'	Tensão média efetiva
q	Tensão desviadora
R^2	Coeficiente de determinação
u	Poropressão
η	Porosidade
v_v	Volume de vazios
V_{ci}	Volume absoluto de cimento
γ_d	Massa específica seca
ε_a	Deformação axial
ε_r	Deformação radial
ε_s	Deformação cisalhante/distorcional
ε_v	Deformação volumétrica

ϕ'	Ângulo de atrito efetivo
σ_3	Tensão confinante
σ_d	Tensão desvio
τ	Tensão cisalhante
ω	Teor de umidade

1 - INTRODUÇÃO

A indústria de mineração é um setor muito significativo para as empresas mineradoras e para o Brasil, que corresponde a cerca de 4% do Produto Interno Bruto (PIB) do país (ANM, 2022), sendo responsável por um faturamento de cerca de 298 bilhões de reais e mais de 229 mil empregos diretos (IBRAM, 2025). Apesar disso, o setor é amplamente questionado pelos eventuais impactos ambientais negativos associados ao beneficiamento mineral e à disposição de rejeitos.

As rupturas das barragens de rejeitos de Mariana em 2015 e de Brumadinho em 2019 intensificaram as discussões acerca da segurança das estruturas de barramentos, resultando em mudanças legislativas, como a Lei 14.066 (BRASIL, 2020), que proibiu novas barragens construídas pelo método de alteamento a montante e determinou a descaracterização das existentes devido à heterogeneidade das propriedades *in situ* e maiores instabilidades. Braga (2021) ainda destaca o aumento da rigidez no monitoramento dos maciços e das restrições para licenciamento de novas estruturas. Nesse contexto, alternativas como o empilhamento de rejeitos filtrados e a produção de coprodutos vêm sendo amplamente estudadas (LEWICKA, 2020; KIM & PARK, 2020; COELHO et al., 2024; MASHAAN & YOGI, 2025).

O empilhamento reduz os teores de umidade dos rejeitos e busca melhores condições de compactação, diminuindo riscos de instabilidade e liquefação. Ainda assim, casos de ruptura demonstram a necessidade de aprimoramento das propriedades mecânicas desses materiais, sendo o cimento Portland tradicionalmente utilizado para estabilização. Apesar de sua ampla aplicação e baixo custo (PINTO, 2006), a produção do cimento está associada a elevados impactos ambientais, especialmente pela emissão de gases de efeito estufa.

A substituição por materiais alternativos na formação de geopolímeros tem apresentado vantagens em relação ao cimento Portland: redução das emissões (1/6) de gases do efeito estufa por unidade de massa de cimento, melhores resistências ao fogo e à ácidos e menor consumo de energia (VANCE et al., 2009). Castro (2015) ainda cita que os geopolímeros são materiais com elevada resistência mecânica, baixa condutividade hidráulica e dureza elevada. Além dos benefícios ambientais, estudos recentes têm demonstrado que geopolímeros podem proporcionar desempenho geotécnico superior ao do cimento Portland, promovendo aumentos da resistência à compressão e ao cisalhamento, nos módulos elástico e confinado, na taxa de consolidação e permeabilidade, além de redução da compressibilidade em diferentes tipos de solos, incluindo materiais granulares, argilosos e contaminados (YAGHOUBI et al., 2022; NEGAHDAR & TOHIDI, 2025; RAOOF et al., 2025). Essas tendências também foram

observadas na estabilização geopolimérica de rejeitos de mineração (MORALES et al., 2024; CUNHA et al., 2025).

Segundo Davidovits (1991) os geopolímeros são resultado de um processo de policondensação interna ou reação hidrotérmica entre uma base de silicato (precursor) e um hidróxido alcalino (ativador). Existem uma variedade de precursores utilizados na estabilização de solos e de rejeitos de mineração, sendo os usuais: escórias (VELTEN et al., 2006; SANTOS et al., 2018), cinzas volantes (VIZCARRA, 2010; CASTRO, 2015; ARAÚJO et al., 2023), cinzas vulcânicas (GHADIR et al., 2021) e metacaulim (GAMA et al., 2015; ARCANJO, 2019; FIGUEIREDO et al., 2021; SANTOS et al., 2024). Dentre os ativadores, tem-se o hidróxido de cálcio, hidróxido de potássio, carbonato de sódio e silicato de potássio. Essas reações geopoliméricas produzem estruturas tridimensionais e estáveis, diferentemente do que ocorre nos processos de ativação alcalina, o que, consequentemente, reflete no ganho de propriedades físico-químicas.

Entre os materiais com potencial de aplicação, destaca-se o resíduo de perlita, originado da expansão térmica da perlita vulcânica a cerca de 900ºC, processo que expande suas partículas em até 20 vezes devido à vaporização da água em sua estrutura (BUNTECH, 2026). O material expandido apresenta baixa condutividade térmica e elevada resistência ao fogo e a agentes químicos (GRZESZCZYK & JANUS, 2023), sendo muito utilizado para na aeração e drenagem de plantas; a fração de perlita que não sofreu a expansão é o resíduo. Segundo Chanta & Palazzi (2017), o resíduo de perlita, embora não seja um aglomerante hidráulico, possui sílica e alumina em frações amorfas com potencial pozolânico para formação de compostos cimentícios.

Diante desse contexto, esta tese busca contribuir para o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis para o aproveitamento de coprodutos de rejeitos de mineração, reduzindo sua destinação a estruturas de disposição e ampliando seu potencial de aplicação na engenharia geotécnica. Para isso, propõe-se a estabilização de um coproduto de rejeito de minério de ferro por meio de um geopolímero desenvolvido à base de resíduo de perlita, a fim de se verificar a resposta hidromecânica. Foram investigadas a influência da metodologia de produção do geopolímero, da concentração do ativador alcalino, do teor de geopolímero, da massa específica seca, do teor de umidade e do tempo de cura no desempenho dos compósitos.

1.1 - OBJETIVOS

Os objetivos que orientam o desenvolvimento da presente pesquisa são apresentados a seguir, contemplando o objetivo geral e os objetivos específicos.

1.1.1 - OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa consiste em avaliar experimentalmente o desenvolvimento e a utilização de um geopolímero à base de resíduo de perlita na estabilização de um coproduto de rejeito de minério de ferro, quanto às melhorias das propriedades hidromecânicas do material.

1.1.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Entender as características física (granulometria, massa específica real dos grãos, compactação e índice de vazios), química (análises químicas por ICP-OES), mineralógica (DRX), ambiental (lixiviação) e microestrutural (MEV e microtomografia) do coproduto de rejeito de minério de ferro, do resíduo de perlita e dos compósitos coproduto-geopolímero;
- Avaliar a influência do teor de geopolímero, da massa específica seca, do teor de umidade e do tempo de cura no comportamento hidromecânico dos compósitos coproduto-geopolímero, considerando diferentes metodologias de produção e concentrações de ativador alcalino.
- Identificar as variáveis mais significativas no processo de estabilização do coproduto a partir da análise de variância (ANOVA) e índice porosidade/teor volumétrico de agente cimentante (η/Biv), a partir de ensaios de resistência à compressão não confinada;
- Avaliar o comportamento mecânico dos compósitos por meio de ensaios de resistência à compressão não confinada, triaxiais monotônicos (drenados e não drenados) e ensaios triaxiais cíclicos de cargas repetidas, para a determinação dos parâmetros de resistência, deformabilidade, módulo de resiliência e deformação permanente;
- Investigar o comportamento hidráulico dos compósitos por meio de ensaios de permeabilidade, sucção e perda de massa por imersão, para avaliação dos efeitos da estabilização geopolimérica na capacidade de fluxo do coproduto de rejeito.

1.2 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta tese está estruturada em cinco capítulos. O *Capítulo 1* apresenta a introdução, na qual são abordados o tema de pesquisa, a problemática associada, a justificativa do estudo e os objetivos que orientam o desenvolvimento do trabalho. O *Capítulo 2* é dedicado à revisão da literatura, contemplando os principais conceitos teóricos e o embasamento científico que fundamentam a pesquisa. O *Capítulo 3* descreve o programa experimental, incluindo os materiais utilizados, as normas técnicas adotadas e as metodologias aplicadas nos ensaios realizados. No *Capítulo 4*,

são apresentados e discutidos os resultados obtidos, com base nas análises desenvolvidas. Por fim, o *Capítulo 5* reúne as conclusões da tese, sintetizando as principais observações e as principais contribuições do estudo.

2 - REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os principais fundamentos teóricos que embasam o desenvolvimento desta pesquisa. Inicialmente, são discutidos os coprodutos de rejeitos de mineração e suas potencialidades de aplicação na engenharia, seguidos dos conceitos relacionados aos geopolímeros, ao resíduo de perlita e aos mecanismos envolvidos na estabilização geopolimérica. Também são abordados os principais fatores que influenciam o desempenho desses materiais, bem como estudos recentes que evidenciam o estado da arte e as limitações existentes na literatura que motivaram a realização desta pesquisa.

2.1 - COPRODUTOS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

Visando a substituição da disposição de rejeitos em barragens, novas pesquisas e tecnologias foram desenvolvidas, dentre as quais se destacam o sistema de empilhamento de rejeitos filtrados e a fabricação de coprodutos de rejeitos de mineração. O sistema de empilhamento atualmente já está sendo implementado nas mineradoras brasileiras, muita das vezes se utilizando dos rejeitos retirados durante a descaracterização das barragens construídas pelo método à montante. Após o beneficiamento ou descaracterização, o rejeito, a depender de suas características, como o teor de umidade, podendo estar em estado de polpa, pasta e massa, passa por etapas de desaguamento, sendo as mais utilizadas as etapas de espessamento (em que ocorre a separação sólido-líquido por meio da sedimentação, sendo muito utilizados floculantes ou coagulantes para aceleração do processo), filtração (seja por filtros-prensa ou por filtros a vácuo, para retirada de parte da umidade do rejeito), secagem ao ar e preenchimento de cavas desativadas (FONSECA et al., 2019). Assim que o rejeito atinge as condições mais próximas do ideal para empilhamento, são levados por caminhões ou correias transportadoras até a sua área de disposição final, onde são lançados, espalhados e compactados em pilhas.

O desenvolvimento de coprodutos vem como uma solução a fim de reduzir não só a disposição de rejeitos em barragens e em pilhas, mas também como um material promissor na substituição do uso de areia. Sabe-se que a extração de areia traz inúmeros prejuízos como erosão costeira, alteração dos ecossistemas aquáticos e na qualidade da água e pode contribuir no processo de desertificação, ocasionando também impactos sociais. Segundo relatório do *United Nations Environment Programme* (UNEP), ou Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), aproximadamente 50 bilhões de toneladas de areia e cascalho são consumidas anualmente em todo o mundo (UNEP, 2026), e essa demanda, somente no setor da construção civil, poderá aumentar em até 45% até 2060 (ZHONG et al., 2022). No Brasil, a

empresa VALE S.A. foi a precursora na pesquisa e desenvolvimento de coprodutos de rejeitos de mineração por meio do projeto Quartzo, desde 2013, e hoje já comercializa o material para a área de construção civil, com aplicação em pisos intertravados, blocos de alvenaria e de vedação, e na geotecnia, principalmente na área de pavimentação (VALE S.A., 2023). A areia sustentável ou também chamada areia de minério (*ore sand*) é obtida como coproduto ou subproduto de minérios minerais, sendo necessárias etapas de britagem e moagem mecânica para recuperação de concentrados minerais, incluindo a otimização desses processos e etapas adicionais de processamento para se atingir as propriedades exigidas da areia (GOLEV et al., 2022), garantindo um produto com alto teor de sílica, baixo teor de ferro e com alta uniformidade química e granulométrica (VALE S.A., 2023). A Fig. 2.1 mostra um esquema com todos os processos de produção de minério de ferro na mina de Brucutu da VALE S.A.

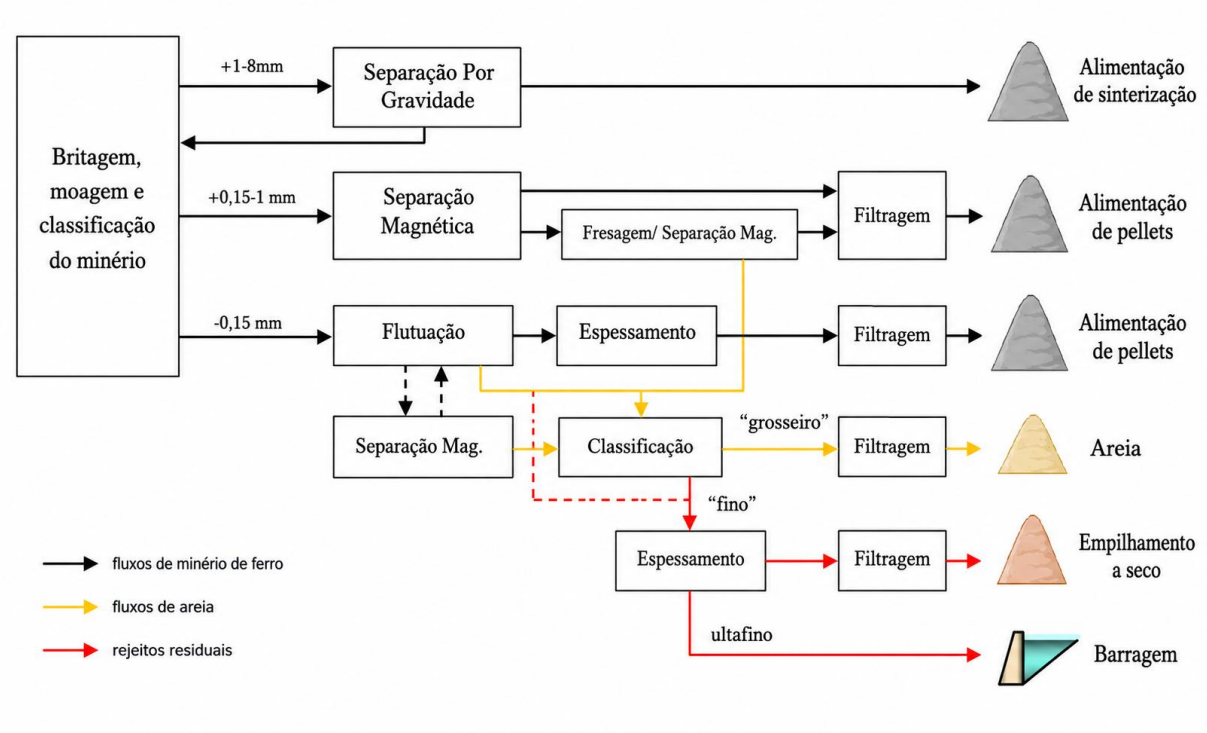


Figura 2.1 - Esquema de produção de minério de ferro na mina de Brucutu (adaptado de GOLEV et al., 2022).

Em outubro de 2023, a Vale S.A. anunciou a criação da Agera, empresa voltada à pesquisa, desenvolvimento e à expansão do negócio de areia sustentável. Com sede em Nova Lima, Minas Gerais, a Agera recebe a areia produzida a partir do tratamento de rejeitos provenientes das operações de minério de ferro da Vale no estado e é responsável por sua comercialização e distribuição (VALE S.A., 2024). Em 2024, a Agera manteve sete centros de distribuição e contratos com 18 fornecedores de transporte rodoviário e ferroviário, atendendo a 80 clientes em Minas Gerais, Espírito Santo, Distrito Federal e São Paulo, acumulando 1

milhão de toneladas do material vendidas desde que começou a operar, em 2023 (VALE S.A., 2024). Em 2025 a Vale dobrou sua produção de minério de ferro por fontes circulares, alcançando 26,3 milhões de toneladas, destacando-se a areia sustentável, que já ultrapassou 3 milhões de toneladas destinadas, desde 2023, à produção de insumos para construção civil (VALE S.A., 2026). Cabe ressaltar que apenas o complexo de Itabira, em Minas Gerais, possui potencial para produzir 130.000 toneladas de areia mineralizada por ano (SALDANHA et al., 2024).

Na Fig. 2.2 tem-se uma imagem do pátio de estocagem da areia sustentável da VALE S.A. na mina de Brucutu em São Gonçalo do Rio Abaixo, Minas Gerais.



Figura 2.2 - Pátio de Estocagem de areia sustentável na mina de Brucutu (VALE S.A., 2023).

Segundo GOLEV et al. (2022), existem três principais grupos de aplicação economicamente significativos para utilização da areia de minério: Construção, recuperação e restauração de terrenos e aplicações industriais. Os autores ainda explicitam as principais propriedades e características que devem ser consideradas para escolha da areia considerando essas diferentes aplicações:

- Físicas: Forma, cor, distribuição do tamanho das partículas, densidade e aspectos mecânicos;
- Químicas: pH, composição mineralógica e química, conteúdo orgânico, entre outros;
- Ambientais: Toxicidade, bacteriologia, contaminantes específicos, compatibilidade com o ecossistema alvo.

É de extrema importância, para o caso de aplicações industriais, a consistência das caraterísticas dos materiais e para projetos de grande escala, a continuidade do fornecimento,

mas deve-se levar em consideração que as características citadas podem variar segundo o tipo de minério processado, etapas e rotas específicas do processamento mineral, condições climáticas e outros fatores (GOLEV et al., 2022; SALDANHA et al., 2024; SEGURA-SALAZAR et al., 2026). Visando a importância da uniformidade das características dos coprodutos, GOLEV et al. (2022) revelaram que a areia da Vale possui teores máximos de Fe_2O_3 entre aproximadamente 8 e 10% e teores mínimos de SiO_2 entre 80 e 92%, contudo, com o propósito de alcançar novas aplicações, tem potencial de redução do Fe_2O_3 para a faixa de 0,1% a aproximadamente 8% e de acréscimo de SiO_2 para até 99%.

2.1.1 - ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Duas amostras do coproduto de rejeito de minério de ferro da mina de Brucutu foram enviadas para a Universidade de Queensland na Austrália em 2021 e na Tab. 2.1 serão explicitadas algumas características encontradas segundo o estudo de GOLEV et al. (2022):

Tabela 2.1 - Resultados das análises físico-químicas com a areia de minério da VALE S.A. (modificado de GOLEV, 2022).

Parâmetros	Unidades	Amostra 1	Amostra 2	Observações
Partículas de argila e silte (< 75µm)	% em vol.	17,00	19,00	Valor inferior ao encontrado em peso
Partículas de argila e silte (< 75µm)	% em peso	22,20	21,00	Recomendado para areias manufaturadas: 15 a 20%
Partículas < 2µm	% em vol.	0,00	0,00	Não foram detectadas partículas de argila
Massa Específica	g/cm³	2,79	2,79	Quartzo (2,65); Areia com ferro (2,75 a 3) e areias de peso normal (2,1 a 3,2)
Densidade Aparente	kg/m³	1430	1450	Areias normais (1300 a 1700); Areias siltosas (1100 a 1600)
pH	-	7,3	6,9	Neutro, adequado para a maioria das aplicações
Pasta Saturada com pH	-	8,8	8,6	Ligeiramente alcalino, maioritariamente aceitável
Condutividade Elétrica (pasta)	µS/cm	21	20	Indica indiretamente baixos níveis de sais solúveis
Sulfatos Solúveis	mg/kg	<10	<10	Adequado para a maioria das aplicações
Cloretos Solúveis	mg/kg	<10	<10	Adequado para a maioria das aplicações

Parâmetros	Unidades	Amostra 1	Amostra 2	Observações
Carbono Total	%	<0,02	<0,02	Adequado para a maioria das aplicações
Teor de Umidade	%	12,1	9,3	Esperado no intervalo de 2 a 6%
Índice de Plasticidade (IP)	%	0,00	0,00	Não plástico
Teor de SiO_2	%	89,7	90,8	-
Teor de Fe_2O_3	%	8,6	9,7	-

Os testes de lixiviação mostraram que a maioria dos metais, como Cádmio, Cromo, Cobre, Chumbo, Nitrogênio e Mercúrio se mantiveram abaixo dos limites de detecção, apenas concentrações de zinco de 0,2 e 0,5 mg/L, respectivamente, paras as amostras 1 e 2, foram detectadas, mas estão abaixo do limite recomendado para qualidade de água potável (5 mg/L). Também foram realizados ensaios para determinação da mineralogia do material, sendo que os resultados mostraram 90-91% de quartzo, 8-9% constituídos de hematita e goethita, 0,2% de caulinita e <0,1% constituídos por clorita, pirolusita, sericita, diásporo e feldspato (GOLEV et al., 2022).

Na pesquisa de Saldanha et al. (2024), os resultados dos ensaios físicos indicaram que a areia de minério obtida do complexo de Itabira, da Vale, apresenta densidade de 2,75, massa específica de 1,49 g/cm³, módulo de finura de 0,5 e taxa de absorção de água de 0,7%. A análise granulométrica evidenciou que a areia mineralizada se enquadra como agregado fino (0,06 mm < diâmetro < 0,2 mm), contendo cerca de 26% de material pulverulento (< 0,075 mm). Com base nos ensaios de fluorescência de raio-x, verificou-se que a composição química é predominantemente formada por 87,9% de SiO_2, 10,25% de Fe_2O_3 e 0,19% de Al_2O_3, enquanto a análise mineralógica indicou a predominância de quartzo, hematita e ilita. Os parâmetros D_{30}, coeficiente de curvatura (C_p) e coeficiente de uniformidade (C_u) foram, respectivamente: (i) areia de minério - D_{30} = 95, Cc = 0,9 e Cu = 2,6. De modo geral, a areia mineralizada apresenta distribuição granulométrica relativamente uniforme, com variação em faixa estreita de diâmetros, sendo mais homogênea que as areias convencionais, o que favorece o melhor preenchimento dos vazios na mistura com cascalho e areia natural.

Os autores Vizcarra et al. (2025) também investigaram a utilização de uma areia de minério da Vale da região do quadrilátero ferrífero, em Minas Gerais. Os resultados de caracterização obtidos podem ser observados conforme a Tab.2.2.

As análises físico-químicas e mineralógicas da areia de minério proveniente da Vale S.A., oriunda principalmente das minas de Brucutu e Itabira, indicam que o material apresenta

características compatíveis com aplicações geotécnicas e de construção civil. Os resultados mostram massa específica elevada (entre 2,75 e 2,89 g/cm³), pH neutro a levemente alcalino, baixos teores de sais solúveis e ausência de plasticidade, evidenciando um material quimicamente estável e não plástico. A composição é predominantemente de sílica (entre 88 e 91% de SiO_2), com presença significativa de óxidos de ferro (8 a 10% de Fe_2O_3), além de minerais secundários em pequenas quantidades.

Do ponto de vista granulométrico, a areia de minério é classificada como agregado fino a areia siltosa (SM), com distribuição relativamente uniforme e presença de finos variando entre aproximadamente 22% e 28%. A permeabilidade observada (ordem de 10^{-4} cm/s) e a granulometria homogênea favorecem o preenchimento de vazios em misturas, contribuindo para maior densificação.

Tabela 2.2 - Resultados da caracterização da areia de minério (Vizcarra et al., 2025).

Parâmetros	Unidades	Resultados
Argila (d < 0,005 mm)	% em vol.	1,00
Silte (0,005 mm < d < 0,075 mm)	% em peso	27,00
Areia (0,075 mm < d < 4,75 mm)	% em vol.	72,00
Gs		2,89
Classificação (USCS)	-	SM (Areia Siltosa)
Quantidade de finos	%	28,00
Limite de Liquidez	%	-
Limite de Plasticidade	%	-
Índice de Plasticidade (IP)	%	-
Permeabilidade	cm/s	$6{,}7 \times 10^{-4}$

2.1.2 - FORMA E TEXTURA DAS PARTÍCULAS

No estudo realizado por GOLEV et al. (2022) para identificação da forma e textura das partículas da areia de minério, foram realizadas análises automatizadas de liberação mineral, em inglês, Mineral Liberation Analyser (MLA), que constitui de um equipamento que combina imagens de elétrons retroespalhados com um sistema de energia dispersiva de raios-x para análise elementar, além de coletar outros dados de forma quantitativa e qualitativa, como a distribuição dos tamanhos do grãos, formatos de partícula, fator de formato e angularidade. Conforme os resultados obtidos, a esfericidade média para os grãos da areia de minério resultou em 0,37 e a redondeza média de 0,66. A Fig. 2.3 ilustra uma comparação dos grãos de areias manufaturadas, areias de rio e da areia de minério da VALE S.A., dessa forma, vê-se que a areia

de minério possui um comportamento intermediário entre as areias manufaturadas e areias de rio em termos de esfericidade e redondeza.

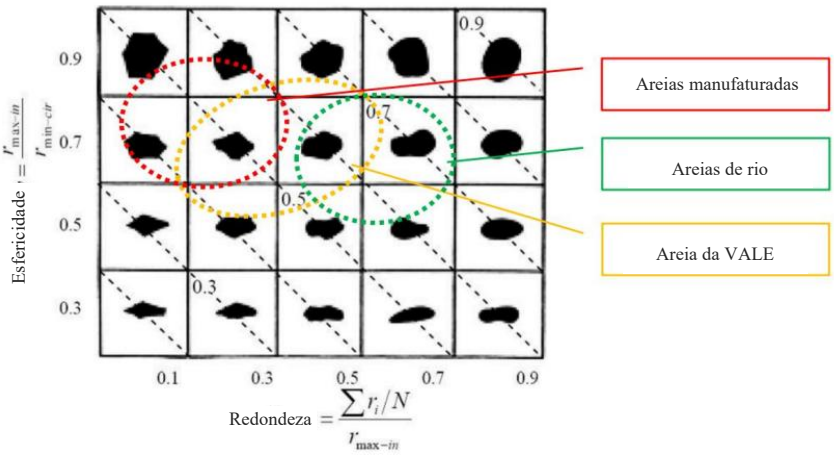
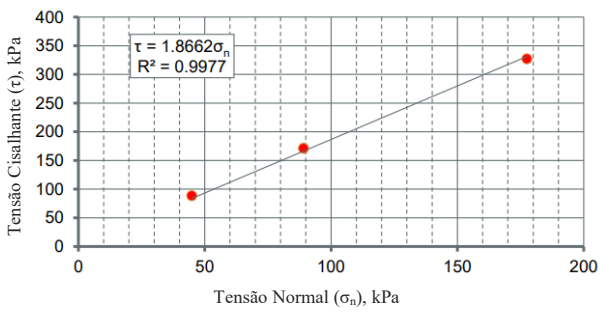


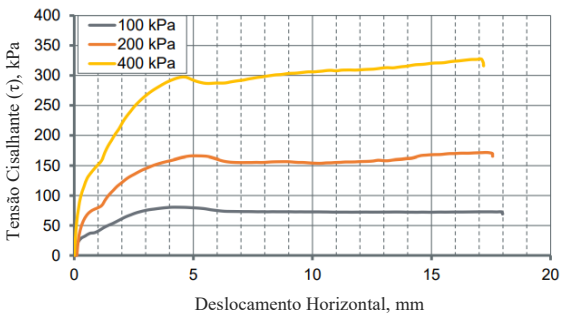
Figura 2.3 - Estrutura e análise dos parâmetros de forma de partículas (GOLEV et al., 2022).

2.1.3 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

O ensaio de cisalhamento direto com a areia de minério de ferro foi realizado na Universidade de Queensland conforme a norma AS 1289.6.2.2-2020, onde uma amostra constituída de 50% da amostra 1 e 50% da amostra 2 e com 5% de umidade foi compactada até uma densidade relativa de 35% (aproximadamente 1.543 kg/m³) e disposta em uma caixa de cisalhamento de 100 mm x 100 mm, onde foram aplicadas tensões normais de 100, 200 e 400 kPa a uma taxa de cisalhamento de 1 mm/min (GOLEV et al.,2022). Os resultados mostraram que o material possui grande intertravamento e resistência entre as partículas, sendo passível de utilização como material de preenchimento em obras de recuperação de terrenos e infraestrutura (GOLEV et al., 2022). Os gráficos de Tensão Cisalhante *versus* Tensão Normal e Tensão Cisalhante *versus* Deslocamento Horizontal podem ser observados pela Fig. 2.4a e Fig.2.4b, respectivamente.



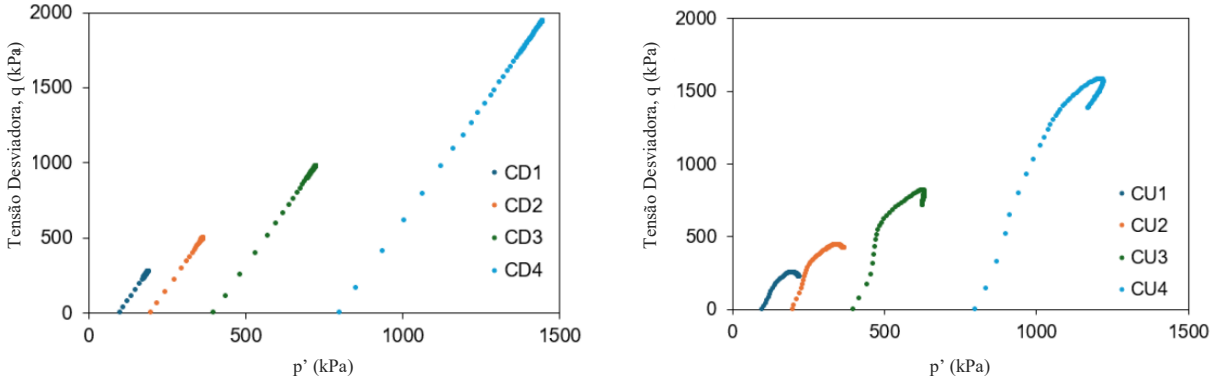
a)



b)

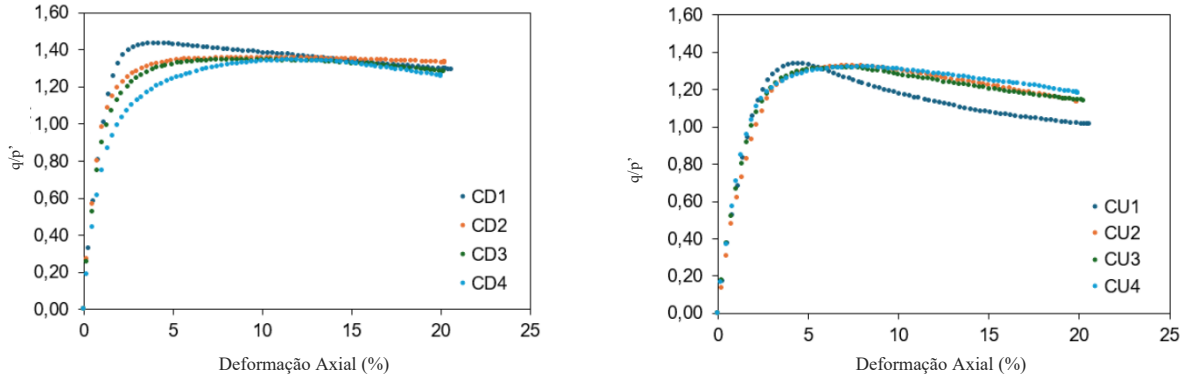
Figura 2.4 - Resultados do ensaio de cisalhamento direto com areia de minério: a) Gráfico Tensão Cisalhante versus Tensão Normal; b) Gráfico Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal (GOLEV et al., 2022).

Os resultados dos triaxiais consolidados drenados e não drenados obtidos por Vizcarra et al. (2025) para as amostras de areia de minério podem ser observados conforme a Fig. 2.5, Fig. 2.6, Fig. 2.7 e Fig 2.8.



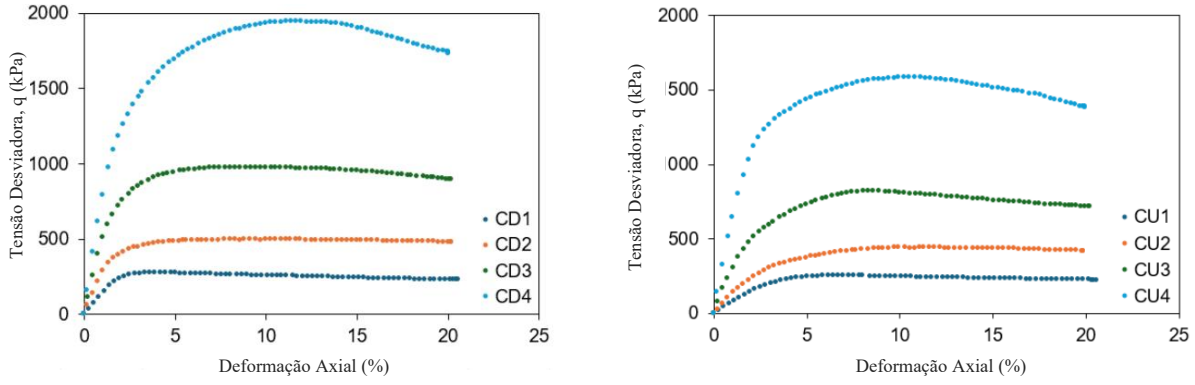
a) b)

Figura 2.5 - Resultados dos ensaios traixais CD e CIU com areia de minério. Trajetórias de tensão: a) Ensaio CD; b) Ensaio CIU (Vizcarra et al., 2025).



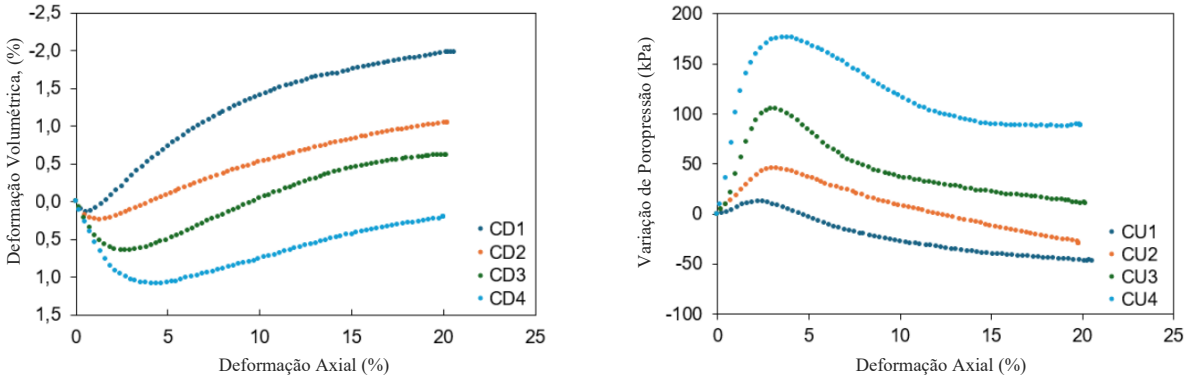
a) b)

Figura 2.6 - Resultados dos ensaios traixais CD e CIU com areia de minério. q/p' *versus* Deformação Axial: a) Ensaio CD; b) Ensaio CIU (Vizcarra et al., 2025).



a) b)

Figura 2.7 - Resultados dos ensaios traixais CD e CIU com areia de minério. Tensão Desviadora *versus* Deformação Axial: a) Ensaio CD; b) Ensaio CIU (Vizcarra et al., 2025).



a) b)

Figura 2.8 - Resultados dos ensaios traixais CD e CIU com areia de minério: a) Deformação Volumétrica *versus* Deformação Axial; b) Ensaio CIU (Vizcarra et al., 2025).

Os resultados obtidos dos triaxiais por Vizcarra et al. (2025) mostram um ângulo de atrito alto para a areia de minério (ϕ'=32°) com pronunciada dilatância, atingindo uma relação de tensão crítica q/p'=1,27. Essa resistência excepcional, mantida mesmo sob altas tensões, reflete as características favoráveis das partículas do material para a construção de aterros (VIZCARRA et al., 2025).

2.2 - GEOPOLÍMEROS

As primeiras ideias sobre a criação de materiais de construção alternativos com base em reações químicas inorgânicas começaram na década de 30, por Olsen em 1934, e há contribuições por Viktor Glukhovsky nas décadas de 50 e 60, mas os termos "polímeros inorgânicos" e "geopolímeros" foram descritos pela primeira vez por Joseph Davidovits na década de 70. A busca por esse tipo de material começou devido aos grandes incêndios que ocorreram na França nessa época, fazendo-se necessária a criação de materiais resistentes ao calor, não inflamáveis e não combustíveis, isso explica o fato da maioria das referências envolvendo geopolímeros se concentrar à literatura de patentes, uma vez que não era um objetivo acadêmico (DAVIDOVITS, 1989).

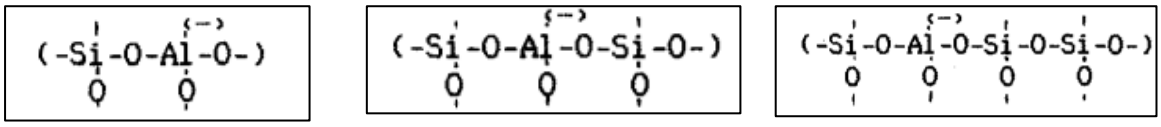
A composição química de um geopolímero consiste na formação de polissialatos por meio da mistura de um precursor aluminossilicato (cita-se a utilização de escórias de alto forno e de aciaria, cinzas vulcânicas, cinzas volantes, metacaulim, pó de telha, entre outros) e um ativador (álcalis, como hidróxido de sódio, hidróxido de potássio, carbonato de sódio, silicato de potássio, entre outros) que policondensam e adotam uma forma rapidamente a baixas temperaturas. A rede de sialatos consiste em tetraedros de SiO_4 e AlO_4 ligados alternadamente, partilhando todos os hidrogênios, assim os íons positivos Na^+, K^+, Li^+, Ca^{++}, Ba^{++}, NH^{3+} e H_3O^+

fazem o balanceamento juntamente com as cargas negativas do Al^{3+} nas quatro coordenações de dobras (DAVIDOVITS, 1989). Os poliassilatos possuem a fórmula empírica, conforme a Eq. 2.1:

$$M_n(-(SiO_2)_z - AlO_2)_n, wH_2O \quad (2.1)$$

Onde: z= 1,2 ou 3; M= Cátion monovalente como K ou Na; n= Grau de policondensação.

Segundo Davidovits (1989) há três tipos de polissialatos, conforme a Fig. 2.9.



a) b) c)

Figura 2.9 - Tipos de polissialatos: a) Poli(sialato) PS; b) Poli(sialato-siloxo) PSS e c) Poli(sialato-dissiloxo) PSDS (modificado de Davidovits, 1989).

Esse formato permite uma estrutura estável, tridimensional, sem a permanência de álcalis livres, diferentemente do que ocorre nos produtos finais de álcali-ativados, tem-se assim um material com melhores propriedades de resistência não só mecânica, mas à corrosão, agentes químicos e térmicos, por isso é muito promissor na fabricação de concretos (DAVIDOVITS, 2014). O tipo de polissialato dependerá dos materiais disponíveis e das aplicações desejadas, assim é possível conseguir melhor desempenho conforme as razões molares dos elementos, sendo às vezes necessário acrescentar a mistura alguma fonte extra de sílicio ou alumínio a fim de se alcançar os padrões.

No caso de um polissialatosiloxo de sódio (NaPSS), Davidovits (1982) por meio da patente 4.349.386 sugere as seguintes razões molares dos óxidos na formação de um polímero mineral de alta resistência, conforme a Tab. 2.3.

Tabela 2.3 - Razões molares indicadas para um NaPSS (DAVIDOVITS, 1982).

Elementos	**Razões molares**
$(Na_2O, K_2O)/SiO_2$	0,20 a 0,28
SiO_2/Al_2O_3	3,5 a 4,5
$H_2O/(Na_2O, K_2O)$	15 a 17,5
$(Na_2O, K_2O)/Al_2O_3$	0,8 a 1,20

O autor ainda coloca a preferência por razões molares de (Na_2O, K_2O)/Al_2O_3 igual a 1 e de SiO_2/Al_2O_3 igual a 4. Razões mais altas que estas podem induzir uma alcalinidade livre no polímero solidificado e causar a migração de silicatos alcalinos, o que, consequentemente, pode afetar as propriedades físicas e mecânicas dos produtos minerais resultantes (DAVIDOVITS, 1982). O artigo de Shariatmadari et al. (2021) detalha todo o cálculo para obtenção das razões molares.

Durante a formação dos geopolímeros, ocorre a ativação alcalina, por isso é importante explicar o processo. Segundo Van Deventer et al. (2007), existem quatro etapas do processo de álcali-ativação de geopolímeros. A primeira chama-se dissolução, na qual ocorre a quebra de ligações covalentes da fase vítrea da matéria-prima, Si-O-Si e Al-O-Si (CASTRO, 2015), originando monômeros de silicato e aluminato. Na segunda etapa tem-se a oligomerização, ou também chamada de coagulação por alguns autores, sendo a etapa em que as espécies dissolvidas são incorporadas na fase aquosa, formando uma mistura complexa e mantendo-se em equilíbrio dentro da solução (COSTA et al., 2022). Na terceira fase há a polimerização ou nucleação, que consiste na organização e formação do polímero de aluminossilicato ou a nucleação, que consiste no crescimento dos núcleos até os seus tamanhos críticos e os cristais começam a crescer (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2005). Na última fase há a gelificação, ou seja, a formação do gel de aluminossilicato (N-A-S-H), a cristalização consta no processo como uma possível fase secundária, zeolítica formada durante o processo (COSTA et al.,2022).

No caso de aplicações de geopolímeros em solos, segundo Castro (2015) o gel toma a função de ligante e desenvolve a reorganização das partículas do solo, o qual adquire maior resistência mecânica. A Fig. 2.10 retrata os processos de álcali-ativação de geopolímeros.

Apesar de todos os benefícios envoltos da substituição do uso de cimento aos geopolímeros, a técnica ainda não é consolidada, muitas das vezes devido à falta de informação sobre os custos. Na pesquisa de Torgal et al. (2005) foram avaliados os custos de quatro tipos de concretos, sendo dois geopoliméricos e dois à base de cimento Portland. Os resultados mostraram que os valores dos preços variam muito de acordo com as substâncias utilizadas, por exemplo, o primeiro tipo de geopolímero apresentou custos superiores aos com cimento em valores de 28% e 77%. Já o segundo geopolímero apresentou um valor 22% inferior e outro apenas 7% superior quando comparado aos concretos com cimento.

Nos tópicos a seguir serão detalhados alguns fatores importantes considerados nesta tese para a formação dos geopolímeros.

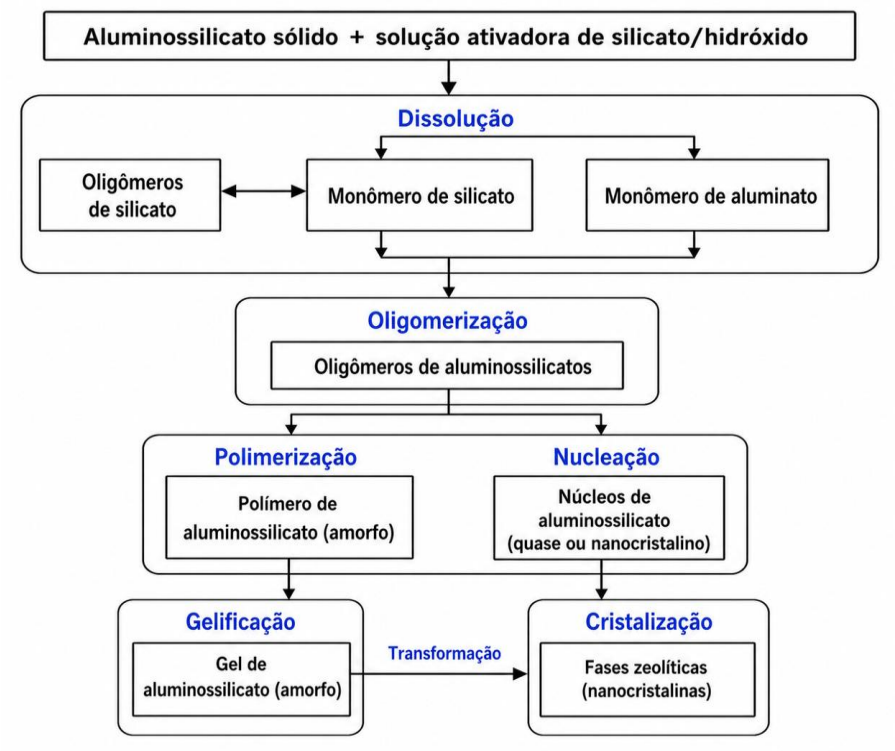


Figura 2.10 - Esquema ilustrativo dos processos reacionais envolvidos na geopolimerização. Fonte: Adaptado de Van Deventer et al. (2007).

2.2.1 - TIPO DE METODOLOGIA

Existem duas metodologias utilizadas para fabricação de geopolímeros, a mais antiga e consolidada é denominada de *Two Part*, ou "em duas partes", que se refere a adição de água no geopolímero durante duas etapas da fabricação, uma ótima opção para o caso de materiais pré-moldados, pois como visto na pesquisa de Segura et al. (2022) apresenta maiores resistências quando comparado ao segundo método. No método *Two Part* o ativador em solução, já na concentração desejada, é misturado ao precursor em pó para a formação da pasta geopolimérica, depois adiciona-se mais água a fim de se obter as características desejadas conforme a influência do fator sólido-líquido. Visando a dificuldade de transporte de soluções alcalinas, corrosivas para as obras, conforme apontado no artigo de Luukkonen et al. (2018), foi criado o segundo método, *One Part*, ou "em uma etapa", que consiste na fabricação da pasta geopolimérica com a adição de água apenas uma em todo o processo. A Fig. 2.11 retrata um esquema dos dois métodos de fabricação de geopolímeros.

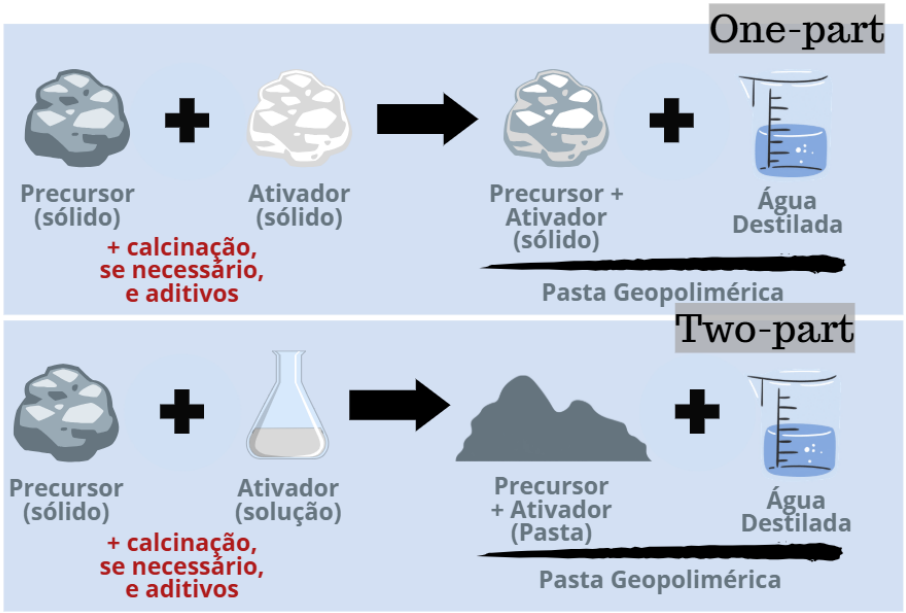


Figura 2.11 - Tipos de métodos de fabricação de geopolímeros, *One Part* e *Two Part*.

Zhao et al. (2023) avaliaram o desempenho de geopolímeros fabricados à base de cinza de lodo de esgoto e escória granulada de alto-forno moída com ativadores Na_2SiO_3 e NaOH. Os resultados mostraram que a resistência à compressão inicialmente aumentou e depois diminuiu com o aumento do módulo dos ativadores alcalinos ou do teor de Na_2O, sendo que a resistência do geopolímero *one-part* foi cerca de 20% inferior à do geopolímero *two-part* com o mesmo módulo e teor de Na_2O. Em relação à reação e microestrutura, observou-se um maior grau e taxa de reação de geopolymerização no geopolímero *two-part*, resultando em uma matriz mais densa e compacta, enquanto o geopolímero *one-part* apresentou cerca de 20% maior porosidade. Os autores também realizaram um procedimento de lixiviação para avaliação de toxicidade, que revelou que as concentrações de metais pesados lixiviados em ambos os tipos de geopolímero ficaram bem abaixo dos limites estabelecidos pela norma chinesa. O índice de custo do geopolímero *one-part* foi aproximadamente 15% superior ao do geopolímero *two-part*, porém o índice de emissão de carbono foi 24% menor, indicando tratar-se de um material cimentício mais sustentável.

Huang et al. (2025) também realizaram o comparativo entre os métodos com geopolímeros à base de pó de granito, cinza volante e escória granulada de alto-forno moída como precursores e NaOH como ativador, empregando ionização térmica. O geopolímero *one-part* apresentou maior resistência, chegando a até 68 MPa aos 28 dias, superando o cimento Portland. Já *o two-part* apresentou menor resistência (36 MPa), mas é mais econômico e apresenta menor impacto ambiental, pois não utilizou o processo de ativação termoquímica. A adição de escória é

importante, pois contribui para a formação de uma estrutura mais densa e resistente, melhorando o desempenho mecânico mesmo com cura em temperatura ambiente, porém, em excesso, pode prejudicar a geopolimerização no *one-part* ao reduzir a alcalinidade (HUANG et al., 2025).

No *one-part*, o uso de NaOH no processo de ativação termoquímica aumenta a reatividade do material, melhorando suas propriedades. No entanto, quantidades elevadas de NaOH podem gerar resíduos alcalinos e causar reações incompletas. Esse excesso de alcalinidade pode levar à degradação da microestrutura e reduzir a resistência do material, especialmente no *two-part* (HUANG et al., 2025).

2.2.2 - CONCENTRAÇÃO DE ATIVADOR

A concentração do ativador escolhido afeta diretamente nas propriedades do geopolímero, isso porque uma menor concentração pode ser insuficiente para que ocorra a mobilização das reações geopoliméricas e concentrações muito altas podem fazer com que o geopolímero desenvolva eflorescência.

No estudo de Oyebisi et al. (2018) foram avaliadas as concentrações de 12, 14 e 16 mols de hidróxido de sódio (NaOH) na fabricação de concretos com geopolímeros. Os resultados mostraram que em relação à resistência à compressão, houve aumento com a concentração molar até 14 M, depois disso houve redução com 16 M, o que os autores explicaram que pode ser atribuído à reação do excesso de álcali com o dióxido de carbono atmosférico, desenvolvendo eflorescência, além disso a estrutura amorfa dos materiais de origem pode ser envolvida nas esferas e o depósito de produtos da reação alcalina pode atuar como uma barreira à dissolução alcalina.

O estudo de Abdullah et al. (2021) avaliou o efeito de diferentes concentrações de NaOH (6, 8, 10, 12 e 14 M) na gelificação interpartículas de um agregado geopolimérico de cinzas volantes. Os resultados mostraram uma redução no Valor de Impacto Agregado (*Aggregate Impact Value - AIV*) com a molaridade até 12 M, com 14 M houve aumento dos valores, indicado que a partir desta molaridade uma redução da resistência do material. Mesmo assim, o maior valor de AIV, com 26,95% encontrado foi com 6M, o que os autores explicam que a baixa concentração do NaOH fez com que a dissolução da cinza volante fosse limitada, assim o volume interpartículas não pôde ser totalmente preenchido pelos géis precipitados (ABDULLAH et al., 2021). Já no caso dos agregados com 14 M, os autores observaram que os componentes nesse caso influenciaram no aumento da quebra da cadeia vítrea da cinza volante,

conforme proposto por Ryu et al. (2013). Neste caso, com concentrações elevadas de NaOH, há quantidades excessivas de OH^-, dessa forma, a dissolução das cinzas volantes é acelerada e a precipitação do gel de aluminossilicato, também a quantidade excessiva de Na^+ fez com que o processo ficasse incompleto, reduzindo assim a resistência do agregado (ABDULLAH et al., 2020).

Abdullah et al. (2021) também avaliaram a densidade dos agregados com geopolímeros e a absorção de água. A mesma tendência foi observada, uma vez que houve aumento da densidade com o aumento da molaridade até 12 M, depois, com 14 M houve redução, como a densidade normalmente está ligada à resistência, é provável que a concentração de 12 M seja a que melhor apresente desempenho quanto à resistência. Os resultados com absorção de água mostraram uma redução da absorção com o aumento na molaridade até 12 M. Esse resultado corrobora com os outros, uma vez que, com a concentração ideal, em tese, haverá o processo de geopolimerização completo, apresentando assim uma estrutura mais densa e com menos poros, o que foi constatado pelas imagens microestruturais dos agregados, o que possibilita uma menor absorção.

2.2.3 - GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS

Sabe-se que a granulometria dos materiais também influencia nas características mecânicas dos materiais, isso ocorre porque as partículas mais finas possuem maior superfície específica, possibilitando maior contato e, consequentemente, que as reações ocorram de forma mais completa. O trabalho de Vance et al. (2009) avaliou a diferença nos ensaios de compressão não confinada com o uso de resíduo de perlita com granulometrias diferentes, 100%<500 μm e com 12%> 500 μm e os resultados mostraram que o resíduo de perlita só se mostrou reativo de forma significativa com o material fino, embora com partículas maiores possa atuar como material de enchimento. Consoli et al. (2017) também avaliaram a resistência à compressão não confinada de misturas de solo com cinzas volantes e perceberam um aumento significativo da resistência com a moagem do material. A adição de 1% de NaCl ou moagem das cinzas triplicou os resultados obtidos, já na combinação da adição de 1% de NaCl e moagem do material, foram obtidos resultados com o dobro de resistência comparados às amostras de solo virgens.

2.2.4 - TEMPO DE CURA

O tempo de cura também é um fator que influencia nas propriedades do geopolímero, e que por sua vez, é influenciado pelos materiais e as características anteriormente mencionadas. Oyebisi

et al. (2018) avaliaram os tempos de cura de 7 e 28 dias para a fabricação dos concretos geopoliméricos e verificaram que os corpos de prova com 28 dias de cura apresentaram quase o dobro de resistência à compressão, tendo em média 20 MPa para os corpos de prova de 7 dias e 40 MPa para os corpos de prova de 28 dias.

Azevedo et al. (2018) fabricaram geopolímeros à base de metacaulim e de cerâmica vermelha e avaliaram os tempos de cura para 3, 7, 14 e 28 dias de cura. Ambos os tipos de geopolímeros apresentaram aumento de resistência à compressão com o aumento dos tempos de cura, contudo, os maiores ganhos em termos de resistência foram com os geopolímeros de metacaulim, os autores explicaram que a adição de cerâmica vermelha aumentou significativamente a porosidade do geopolímero, o que pode ter influenciado neste aspecto.

Sabe-se que a temperatura também influencia nas propriedades, acelerando as reações geopoliméricas, mas não foi objeto de estudo nesta tese.

2.2.5 - GEOPOLIMERIZAÇÃO NA GEOTECNIA

Na geotecnia, a geopolimerização está aliada ao processo de estabilização de solos e outros materiais, como rejeitos. A estabilização constitui da adição de substâncias que geram reações químicas entre as partículas de solo e água e que alteram o solo ao longo do tempo, originando um material novo, com propriedades diferentes (ALMEIDA et al., 2016).

Na pesquisa de Cruz et al. (2016) foram produzidos geopolímeros à base de cinzas volantes para aplicação em estradas de baixo custo. Para análise de desempenho, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples, triaxiais drenados, pulso eletrônico e ensaios de fadiga. Os resultados mostraram que o tratamento do solo com os geopolímeros aumentaram sua resistência e rigidez; quando comparado ao solo misturado com cimento Portland, apresentou um crescimento prolongado da resistência, tendendo a estabilização com 28 dias de cura.

Araújo et al. (2021) utilizaram cascas de ovo para obtenção de CaO na estabilização de solos expansivos. Foram realizados ensaios de compressão simples, de pulso eletrônico, rigidez e limites de Atterberg, comparando-se os resultados com cal hidratada industrial. Para todas as amostras, o ligante alternativo apresentou aumento na resistência e redução na expansão. Também foram analisadas diferentes proporções de caulim-bentonita, densidade seca, teor de cal e tempo de cura por meio do parâmetro porosidade/teor de cal, que se provou adequado para avaliar a estabilização do solo expansivo.

No estudo de Barbosa (2021) buscou-se estabilizar um solo com um geopolímero à base de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em camadas de pavimentos

semirrígidos. Os ensaios de compressão simples revelaram aumentos de resistência para todas as idades de cura estudadas (7, 14 e 28 dias) em relação ao solo estabilizado apenas com cimento, notando-se também o crescimento de resistência ao longo do tempo.

Consoli et al. (2024) avaliaram a estabilização de rejeitos de mineração por meio da ativação alcalina de metacaulim, utilizando hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3) como ativadores. Nos ensaios de resistência à compressão não confinada, os compósitos com 5% de agente cimentante e com relações Si/Al = 3,5 e Na/Si = 0,5 atingiu resistência de 1,38 MPa aos 7 dias de cura. Entretanto, aos 28 e 60 dias, os maiores valores de resistência (1,52 e 1,58 MPa, respectivamente) foram obtidos para a composição com Si/Al = 3,5 e Na/Si = 0,4. De modo geral, os resultados indicaram que relações intermediárias de Si/Al associadas a menores relações Na/Si favoreceram o desenvolvimento da resistência mecânica. Observou-se ainda que os ganhos mais expressivos ocorreram até os 28 dias de cura, enquanto entre 28 e 60 dias os incrementos foram menos pronunciados, evidenciando a redução das reações de ativação alcalina com o avanço da cura.

Um dos únicos artigos encontrados que avaliaram a utilização de resíduo de perlita como geopolímero foi o de Vance et al. (2009), já mencionado no item 2.2.3, em que a fração fina do geopolímero possui grande potencial para ser usado na fabricação de materiais de construção e imobilização de resíduos perigosos/tóxicos. Chanta & Palazzi (2017) avaliaram o uso de resíduo de perlita na estabilização de solos com a adição de cal, comparando as amostras com outras estabilizadas somente com cal e com cimento. Os resultados apresentaram aumento nas resistências à compressão simples e diametral das misturas com resíduo de perlita, observando-se também aumento na resistência com o tempo.

Vê-se, então, a necessidade de pesquisas voltadas para a área geotécnica envolvendo geopolímeros, principalmente com a utilização de resíduos (como é o caso da perlita), que podem trazer não só ganhos mecânicos, mas ambientais, reduzindo a emissão de gases prejudiciais ao meio ambiente e apresentando uma finalidade para um material que muitas vezes não é disposto apropriadamente e é dito como rejeito.

A Tab. 2.4 traz outros exemplos de estudos envolvendo geopolímeros, finalidade e principais resultados obtidos.

Tabela 2.4 – Estudos voltados à utilização de geopolímeros.

Autor (Ano)	Tema/Finalidade	Principais resultados
Mohammadinia et al, (2016)	Estabilização de materiais de demolição para aplicações em base/sub-base de pavimentos utilizando geopolímeros de cinzas volantes e escória	A máxima resistência à compressão foi de aproximadamente 4,6 MPa para RCA estabilizado com 4% de escória (L/P = 0,4, razão líquido /precursor) aos 28 dias de cura. MR alcançando cerca de 1,58 GPa aos 7 dias de cura.
Azevedo et al. (2017)	Produção de geopolímeros à base de cinza volante usando soluções ativadoras com diferentes composições de Na2 O e Na2 SiO3	O compósito com NaOH 12 mol/L e teor de silicato de sódio de 30% em relação à massa de cinza volante apresentou resistência à compressão de 47,6 MPa e módulo de elasticidade de 4,5 GPa aos 28 dias de cura.
Duarte et al. (2019)	Desenvolvimento de argamassa geopolimérica incorporando rejeitos de barragem.	A adição de 40% de rejeito resultou na maior resistência à compressão (42,11 MPa aos 7 dias), as misturas com rejeito apresentaram menor volume de poros (redução de 0,063 para 0,039 cm^2/g) que o geopolímero constituído apenas por metacaulim.
Barbosa (2021)	Geopolímero à base de metacaulim em camadas de pavimentos rígidos.	O compósito contendo 10% de metacaulim atingiu 3,7 MPa aos 7 dias de cura.
Morales et al. (2024)	Reutilização de rejeitos de estanho dos Andes em obras geotécnicas por meio da estabilização com ligante geopolimérico (Metacaulim) e NaOH.	Com 30% de metacaulim e ativador de 7 mol/L, as resistências à compressão não confinada variaram entre 3 e 5 MPa.
Wassie & Demir (2024)	Resistência Mecânica e Microestrutura de Solo Mole Estabilizado com Cimento, Cal e Estabilizantes Geopoliméricos à Base de Metacaulim.	Com 15% de geopolímero à base de metacaulim e 14 dias de cura, a coesão não drenada aumentou de 44 para 137 kPa e o ângulo de atrito interno de 3,4° para 8,4°. A adição de 3–7% de metacaulim ao solo estabilizado com 8% de cimento reduziu a resistência à compressão não confinada de 1.382 kPa para 795–1.192 kPa aos 7 dias de cura.
Yu et al. (2024)	Propriedades mecânicas e microestrutura de geopolímero à base de calcinado volantes com ativadores de cálcio.	A maior resistência à compressão foi obtida para a relação $Ca(OH)_2$:$CaSO_4$ de 3:1, atingindo cerca de 26,5 MPa aos 28 dias.
Jia & Chu (2025)	Propriedades mecânicas triaxiais e microestrutura da argila de Tianjin estabilizada com geopolímero à base de cinzas volantes.	Os ensaios triaxiais com 20% de cinza e 28 dias de cura indicaram aumento expressivo da coesão (4,18 para 64,5 kPa) e redução do ângulo de atrito efetivo (30,3° para 28,6°).
Ghorbanipour et al. (2026)	Estabilização e solidificação de rejeitos de minério de ferro utilizando geopolímero ativado por álcalis (escória de alto-forno)	Com 200 kPa de confinamento e 5 M de NaOH, a elevação do teor de 9% de escória elevou a resistência ao cisalhamento de 1.265 para 5.824 kPa e no aumento de 20% no ângulo de atrito.

2.3 - PERLITA

A perlita é uma rocha vulcânica siliciosa cuja composição química média é de aproximadamente 75% de SiO_2, com óxidos de Al (14,8%), K (4,8%), Na (2,9%), Ca (0,9%), Mg (0,1%), R_2O_3 (1,5%) e água ligada (3,0%) (SINGH & GARG, 1991). Esse mineral é geralmente coletado por meio de detonação em minas a céu aberto (EL-MIR et al., 2023). Quando as partículas de perlita bruta pré-dimensionadas são aquecidas a mais de 900 °C se expandem - até 20 vezes o seu volume original (BUNTECH, 2026). A água retida na estrutura do material vaporiza-se e escapa (MARKOSKA et al., 2018) para formar inúmeras células vítreas seladas, de maneira semelhante à pipoca. Esse comportamento explica as excelentes propriedades isolantes, de resistência ao fogo e a leveza da perlita expandida (MARKOSKA et al. 2018; GRZESZCZYK & JANUS, 2021; USGS, 2026). A perlita proporciona o equilíbrio ideal entre ar e água. A perlita é estéril, inerte, não tóxica, não decomponível e fácil de manusear, com capacidade aprimorada de retenção de água e aeração (MARKOSKA et al., 2018).

Segundo Singh & Garg (1991), enquanto a rocha de perlita bruta pode variar de transparente a cinza claro e preto brilhante, a cor da perlita expandida varia de branco neve a branco acinzentado. A perlita expandida pode ser considerada como pedra-pomes sintética, que apresenta muitas vantagens em relação à pedra-pomes natural. Através do controle do tempo e da temperatura de calcinação, suas propriedades podem ser reguladas de acordo com as especificações de granulometria e porosidade (SINGH & GARG, 1991).

Estima-se que, em 2025, a quantidade de perlita bruta processada no mundo de 4,6 milhões de toneladas (USGS, 2026). Segundo a organização, a perlita bruta processada foi expandida em 53 fábricas em 29 estados dos Estados Unidos, processada no mercado interno vendida e utilizada de 460.000 toneladas, com um valor de US$ 36 milhões. As aplicações da perlita expandida foram: produtos para construção civil, 45%; agregados para horticultura, 15%; auxiliares de filtragem, 15%; e outros, como para enchimentos, 25%. A perlita tem sido amplamente utilizada como agregado leve em concreto e argamassa. Em sua forma expandida, a perlita oferece isolamento térmico, resistência ao fogo e outras propriedades desejáveis quando utilizada em rebocos à base de cimento Portland ou gesso (USGS, 2026). Há também estudos voltados para aplicação da perlita expandida como compósitos leves à base de gesso/cimento e como aglomerante (SINGH & GARG, 1991). Segundo a USGS (2026), em usos hortícolas a perlita expandida é utilizada para proporcionar retenção de umidade e aeração

sem compactação quando adicionada ao solo. Além disso, apresenta propriedades como absorção de água, filtrabilidade, retenção de sólidos e abrasividade (BUNTECH, 2026).

Após a expansão, pode ocorrer a moagem do material, que promove a quebra dessas partículas expandidas, criando capilaridades microscópicas ideais para filtrar grande variedades de líquidos, bebidas e produtos farmacêuticos (BUNTECH, 2026). Os principais mercados atendidos pela Perlita Expandida são: filtração de óleos vegetais, minerais e animais, gelatinas e colágeno, ceras vegetais e de polipropileno, xaropes, enzimas, ácido sulfúrico, entre outros. Outros mercados atendidos por esse mineral são: Têxtil (abrasivo para estonagem e marmorização), Criogenia (isolante térmico), Construção Civil (agregado leve) e Agro (BUNTECH, 2026).

Segundo dados de Burgos (2019) o resíduo de perlita constitui aproximadamente 20% do total da produção. O autor revela que de 96 t de perlita, produz-se 19 t de resíduo por dia. Na fabricação de 1 tijolo de perlita, seriam necessários 3,5 kg de resíduo (BURGOS, 2019).

A perlita normalmente apresenta altos teores de alumina e silicatos, como exemplo tem-se os resultados de Burgos (2019) cujos ensaios de fluorescência de raios-x apresentaram 72% e 13% e como apontado por Vance et al. (2009) o material tem a composição básica de 80% e 15%, respectivamente.

Espera-se que, assim como no caso da perlita expandida, o resíduo apresente também altos teores de alumina e silicatos, visto que são composições desejadas para a produção de geopolímeros. Nas análises químicas realizadas na pesquisa de Chanta & Palazzi (2017), os resíduos de perlita apresentaram aproximadamente 78% de sílica e 15% de alumina, já no estudo de Vance et al. (2009) os resultados foram de 33,6% e 6,9%, respectivamente. Essas composições são muito importantes principalmente para a escolha do ativador e dosagem, uma vez que se procura balancear as substâncias. Segundo Palomo et al. (1999) se a solução alcalina contém silicatos de potássio ou potássio solúveis, as reações de condensações das estruturas e o desenvolvimento da resistência mecânica são mais rápidos do que quando o ativador é o hidróxido de sódio ou de potássio.

No estudo de Okuyucu et al. (2011) foram preparadas misturas de concreto semileve reforçado com fibras de aço e de polipropileno com perlita não expandida (resíduo de perlita) como agregado e como material cimentício suplementar. Resistência à compressão, resistência à tração por fendimento e o módulo de elasticidade das misturas endurecidas foram determinados em amostras cilíndricas. Os resultados mostraram que as amostras em que o cimento foi substituído por pó de perlita não expandida apresentaram menores valores de resistência à compressão aos 7 dias de cura em água saturada com cal (35 para 31,5 MPa), que

foi explicado devido a um menor grau de atividade pozolânica nas idades iniciais. enquanto houve aumento da resistência aos 28 dias de cura (36,4 para 52,2 MPa). Com a adição de fibras de aço e de polipropileno e a substituição com a perlita, os valores aos 28 dias foram de 37,9 para 44,7 e de 35,2 para 52,8 MPa, respectivamente. Nos ensaios de tenacidade/flexão dos painéis, o comportamento variou conforme o tipo de reforço. Os painéis com malha de aço apresentaram a maior absorção de energia até 25 mm de deslocamento, com 835 J sem o pó de perlita e 860 J com pó de perlita. Entre os concretos reforçados com fibras, os painéis com fibras de polipropileno e de aço, com a substituição de perlita em pó houve redução da energia absorvida pelos painéis com fibras, para 473 J no caso do polipropileno e 411 J no caso do aço, correspondendo a reduções de 17% e 24%, respectivamente. A carga de pico inicial diminuiu para todos os tipos de painéis no caso da substituição por pó de perlita, enquanto a energia total absorvida correspondente a uma deflexão de 25 mm diminuiu para os painéis reforçados com fibras, mas aumentou ligeiramente para o painel reforçado com malha de aço. As reduções na carga de pico inicial dos painéis podem estar associadas à redução da resistência à tração das misturas de concreto. A substituição por pó de perlita resultou em reduções de 24% e 17% na absorção de energia para uma deflexão de 25 mm para os painéis com fibras de aço e fibras de polipropileno, respectivamente. Esse efeito negativo da substituição por pó de perlita sobre a tenacidade dos painéis reforçados com fibras está provavelmente relacionado à redução da capacidade de resistência à tração da matriz de pasta de cimento, o que também é desfavorável em termos de resistência de aderência das fibras. É sabido que o uso de materiais cimentícios suplementares como substituição parcial do cimento Portland proporciona muitos benefícios às propriedades do concreto fresco e endurecido, tais como a melhoria da trabalhabilidade, a redução do calor de hidratação, a baixa permeabilidade, a alta resistência final e o controle da expansão álcali-sílica, bem como economia de custos e benefícios ambientais. Considerando esses benefícios, os painéis produzidos com uma mistura de concreto contendo substituição por pó de perlita parecem ser favoráveis, apesar da pequena redução na tenacidade.

Omuro et al. (2022) avaliaram a utilizaram de resíduo de perlita em substituição de resíduos de papel nos processos de estabilização de solos com fibra-cimento. Os resultados experimentais (ensaios de compressão não confinada e ensaios cíclicos de secagem e umedecimento) demonstraram que a resistência à ruptura aumenta com o aumento da quantidade de resíduos de perlita adicionados.

Foi realizada uma busca por meio da plataforma Google Acadêmico a partir das palavras-chave "*perlite in soil*" e "*perlite waste stabilization soil*", com o objetivo de avaliar a distribuição das pesquisas relacionadas às diferentes aplicações da perlita e dos resíduos de

perlita. Ao todo, foram analisados 50 artigos, que foram organizados conforme suas aplicações: agricultura, construção civil, estabilização de solos e sistemas de aterramento. A Tab. 2.5 apresenta os artigos encontrados.

Do total analisado, 17 estudos abordam aplicações na agricultura, evidenciando o uso consolidado da perlita nesse setor. Na área de construção civil, foram identificados 7 estudos, enquanto 9 tratam da utilização da perlita em processos de estabilização de solos. Por outro lado, apenas 1 estudo foi encontrado relacionado ao uso da perlita em sistemas de aterramento. Quando se considera especificamente o uso de resíduos de perlita, observa-se um número de trabalhos ainda menor. Foram identificados apenas 2 estudos voltados à construção civil e 2 estudos diretamente relacionados à estabilização de solos com esse material. Esses resultados indicaram que, embora a perlita seja amplamente estudada em sua forma convencional, o aproveitamento de seus resíduos em aplicações geotécnicas e de engenharia civil, no geral, ainda é limitado.

Tabela 2.5 - Pesquisa de estudos voltados à utilização de perlita e resíduo de perlita.

Artigos/ Finalidade	**Agricultura**	**Construção civil, tijolos solo-cimento**	**Geotecnia (Estabilização)**	**Sistema de aterramento**
Perlita	Ristow et al. (2009), Ristow et al. (2011), Lima Filho & Tsai (2006), Maschio et al. (2017), Silber et al. (2010), Sager et al. (2007), Markoska et al. (2018), Shahadha et al. (2023), Vázquez & Carpena-Ruiz (2005), Al-Wazzan & Abdulrahman (2025), Riley (2010), Al-Shamary et al. (2020), Ilstedt et al. (2007), Markoska & Spalevic (2020), Grillas et al. (1999), Daza et al. (2000), Al-Shammari et al. (2018)	Oliveira (2024), Oliveira & Barros (2024), Burgos et al. (2019), Dzięcioł & Szlachetka (2024), Abed & Éva (2025), Szlachetka & Dzięcioł (2026), Fekete-Nagy et al. (2023)	Calik & Sadoglu (2014), Calik & Sadoglu (2014), Hamid (2025), Yilmaz & Fidan (2018), Yusof et al. (2025), Darestani et al. (2025), Yilmaz & Fidan (2017), Naess et al. (2025), Voottipruex et al. (2022), Khodabandeh et al. (2024), Rahat & Eskisar (2025)	Lai et al. (2017)
Resíduo de Perlita		Stefanidou et al. (2023), Makrygiannis et al. (2025)	Omuro et al. (2022), Vieira et al. (2024)	

2.4 - ÍNDICE POROSIDADE E TEOR VOLUMÉTRICO DE AGENTE CIMENTANTE

A relação entre porosidade e teor volumétrico de cimento foi proposta por Consoli et al. (2007) e é um método de dosagem para misturas de solos cimentados (Eq. 2.2 e Fig. 2.12). Os autores basearam-se em ensaios de compressão simples realizados com o solo de formação residual arenito Botucatu e teores de cimento Portland de 1% a 12%. Por meio da curva de porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}) é possível prever a resistência pretendida conforme solicitações de projeto, teor volumétrico de cimento e porosidade necessárias para atingir a resistência.

$$\frac{V_v\ (volume\ de\ vazios)}{V_{ci}\ (volume\ absoluto\ de\ cimento)} = \frac{\frac{V_v}{V_{total}}}{\frac{V_{ci}}{V_{total}}} = \frac{\eta}{C_{iv}} \tag{2.2}$$

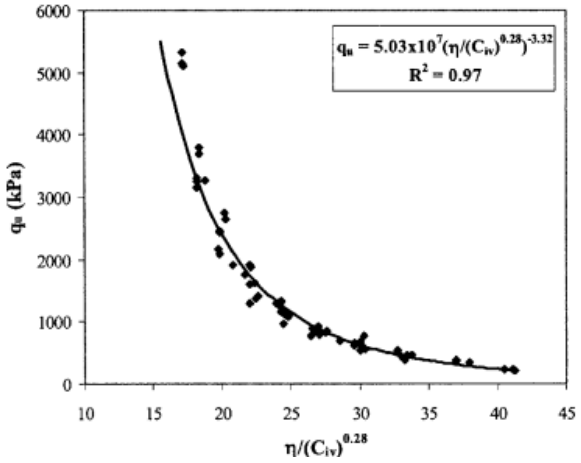


Figura 2.12 - Curva de dosagem η/C_{iv} para o solo residual Arenito Botucatu (CONSOLI et al., 2007).

Foppa (2005) e Consoli et al. (2007) revelaram que existe uma relação de potência entre a resistência à compressão não confinada (qu) e a relação entre porosidade e teor volumétrico de agente cimentante (Eq. 2.3). O expoente k é um ajuste que indica se o efeito da porosidade for maior que o do teor de cimento, k<1, se for o contrário, k>1 e se os efeitos forem iguais, k=1. A é um escalar e B é um expoente de ajuste polinomial.

$$q_u = A\left[\frac{\eta}{{C_{iv}}^k}\right]^{-B} \tag{2.3}$$

Diambra et al. (2017) propuseram uma derivação teórica para essa relação empírica, baseada na superposição das resistências de ruptura da matriz granular (mecânica dos solos em estado crítico) e da fase cimentante (critério de ruptura de Drucker-Prager), oferecendo uma justificativa física para os parâmetros de ajuste A, B e k anteriormente definidos apenas de forma empírica.

Ao reescrever a expressão analítica obtida a partir da superposição de fases de modo a parear com a forma hiperbólica empírica proposta por Consoli et al. (2007), os autores demonstram que o expoente k, referente ao teor volumétrico de cimento, corresponde ao inverso de um parâmetro a da matriz de solo (k = 1/a), o qual governa a dependência da resistência de pico do esqueleto granular em relação ao seu estado de porosidade frente à porosidade crítica. De forma semelhante, o expoente B que multiplica a razão porosidade/cimento também deriva diretamente desse mesmo parâmetro a (B = -a), relação confirmada numericamente pelos próprios autores a partir dos dados de Consoli et al. (2007, 2012, 2013) para diferentes solos granulares. Já o coeficiente escalar A mostrou-se resultado da combinação das propriedades da matriz e do cimento, sendo proporcional à resistência à compressão do próprio ligante e à resistência ao cisalhamento do esqueleto granular. Dessa forma, os parâmetros k, A e B, antes tratados apenas como coeficientes de ajuste estatístico da Eq. 2.3, passam a ter significado físico direto, reforçando a base mecânica da relação η/Civ e explicando por que ela se mostra aplicável a diferentes tipos de solos granulares e agentes cimentantes.

Depois disso, Consoli et al. (2017) abrangeram a relação para diferentes solos granulares (4 solos e 714 amostras) e Consoli et al. (2018), visando os pontos negativos da utilização do cimento Portland, decidiram incorporar resíduos de pó de vidro como material pozolânico no método de dosagem, avaliando os efeitos da porosidade, teor de cal e de pozolana no comportamento mecânico de solos granulares.

Nesta nova abordagem, faz-se necessário trabalhar com um novo índice, B_{iv} (Eq 2.4), que permite normalizar a resistência à compressão não confinada, o módulo de cisalhamento em pequenas deformações (G0) e a perda de massa acumulada para o caso das misturas de solo arenoso-resíduos de vidro moído-cal de carboneto.

$$B_{iv} = \frac{V_{pv}+V_{cc}}{V} = \frac{\frac{m_{pv}}{\gamma_{pv}}+\frac{m_{cc}}{\gamma_{cc}}}{V} \tag{2.4}$$

Para o cálculo da porosidade, Consoli et al. (2019) propôs a seguinte Eq. 2.5, considerando misturas de areia, cal de carbureto e cinzas volantes:

$$\eta = 100 - 100 \times \left\{ \left[\frac{\gamma_d}{\frac{S}{100}+\frac{RHA}{100}+\frac{CL}{100}} \right] \times \left[\frac{\frac{S}{100}+\frac{RHA}{100}+\frac{CL}{100}}{\gamma_{sS}+\gamma_{sRHA}+\gamma_{sCL}} \right] \right\} \tag{2.5}$$

Onde: S = Teor de areia; RHA= Teor de cinza volante; CL= Teor de cal de carbureto; γ_d= Peso específico do corpo de prova; γ_{ss}=Peso específico dos sólidos de areia; γ_{sRHA}= Peso específico dos sólidos de cinza volante; γ_{sCL}= Peso específico dos sólidos de cal de carbureto.

Mesavilla et al. (2026) avaliaram a influência da cimentação e do tempo de cura no comportamento de rejeitos de minério de ferro estabilizados com cimento Portland pozolânico (CP IV), por meio de ensaios de resistência à compressão não confinada, triaxiais CID e triaxiais cúbicos, em períodos de cura de 28, 90, 180, 365 e 730 dias. Os resultados evidenciaram que os maiores ganhos de resistência ocorreram nos primeiros 28 dias, com tendência de estabilização após 180 dias. Nos ensaios drenados, a adição de 2% de cimento elevou a coesão efetiva de 0 para 14 kPa e o ângulo de atrito efetivo de 32° para 40° aos 28 dias, alcançando 59 kPa e 37°, respectivamente, aos 730 dias de cura. A resistência à compressão não confinada apresentou forte correlação com a relação porosidade/teor volumétrico de cimento (η/Civ), indicando que menores porosidades e maiores teores de cimento resultam em maiores resistências. O modelo apresentou melhor ajuste com expoente unitário para o teor volumétrico de cimento e coeficiente B constante igual a 1,7, enquanto o coeficiente A aumentou com o tempo de cura, refletindo o avanço das reações pozolânicas. Em relação aos resultados aos 28 dias, observaram-se incrementos de resistência de 45,9%, 63,7% e 66,5% aos 90, 180 e 365 dias, respectivamente, confirmando a importância do tempo de cura no desenvolvimento das ligações cimentantes e no desempenho mecânico do material.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo está organizado em duas partes; inicialmente é apresentado de forma detalhada os materiais utilizados na pesquisa, incluindo os critérios de seleção e os procedimentos adotados para a preparação das amostras. Na sequência, descreve-se os ensaios realizados, bem como os procedimentos experimentais e as metodologias empregadas, com o intuito de assegurar a repetibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

3.1 - MATERIAIS

Os materiais empregados neste estudo foram o coproduto do rejeito de minério de ferro e a pasta geopolimérica, composta por resíduo de perlita (precursor), hidróxido de sódio (NaOH, ativador) e água destilada. Para fins de comparação em determinados ensaios, utilizou-se também uma areia obtida comercialmente.

3.1.1 - COPRODUTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO E AREIA

Como material estabilizado, utilizou-se um coproduto de rejeito de minério de ferro proveniente de uma mina localizada no Complexo de Itabira, em Minas Gerais, fornecido pela empresa Vale S.A. (ver Fig. 3.1a). A escolha desse material foi motivada pela sua ampla disponibilidade, decorrente da geração em grande volume de rejeitos pela empresa, no potencial de reutilização sustentável e na importância de promover avanços em pesquisas voltadas à sua aplicação.

Como comparativo aos resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada dos compósitos coproduto-geopolímero, foram realizados ensaios com uma areia natural. A escolha desse material fundamentou-se em sua natureza predominantemente quartzosa, em sua reduzida reatividade frente à ativação alcalina e por constituir o agregado miúdo convencional mais amplamente utilizado em materiais cimentícios, com comportamento geotécnico e mecânico amplamente conhecido e documentado na literatura. Dessa forma, sua utilização permite estabelecer uma referência consolidada para avaliar a influência da substituição do agregado convencional pelo coproduto de rejeito de minério de ferro no desenvolvimento da matriz geopolimérica e, consequentemente, na resposta mecânica dos compósitos. A Fig. 3.1b mostra a areia utilizada no estudo, obtida comercialmente.



a) b)

Figura 3.1 - Materiais Estabilizados: a) Coproduto de rejeito de minério de ferro e b) areia.

3.1.2 - RESÍDUO DE PERLITA

O resíduo de perlita utilizado nesta pesquisa foi fornecido pela empresa Buntech. Apresentando aspecto granular, o material foi submetido à moagem em um moinho de bolas até ser reduzido à forma de pó, com granulometria passante na peneira #200 (com diâmetro de grãos de 0,075 mm), para a maioria das análises realizadas nesta tese. A moagem teve como objetivo aumentar a área de superfície específica das partículas, favorecendo o contato com os demais componentes e, consequentemente, intensificando as reações químicas envolvidas na formação do geopolímero. A Fig. 3.2a mostra o resíduo de perlita recebido diretamente da empresa, sem moagem, e na Fig. 3.2b tem-se uma imagem do resíduo moído.



a) b)

Figura 3.2 - Resíduo de Perlita: a) sem moagem; b) moído.

3.1.3 - ATIVADOR ALCALINO

O hidróxido de sódio (NaOH) foi selecionado como ativador alcalino em razão de ser comumente utilizado em pesquisas envolvendo geopolímeros, principalmente devido ao seu

bom desempenho, à sua ampla disponibilidade comercial e ao custo relativamente baixo quando comparado a outros ativadores (Sathonsaowaphak et al., 2009; Bong et al., 2019; Sore et al., 2020; Kan et al., 2025). Comercialmente, o hidróxido de sódio é encontrado nas formas de micropérolas ou escamas, que devem ser dissolvidas em água para aplicação. Nesta pesquisa, foi utilizado o produto da marca Dinâmica, adquirido na forma de micropérolas, com grau de pureza analítica de 99%. Para a maioria dos ensaios realizados, o material passou por um processo de moagem antes de ser incorporado à pasta geopolimérica. A Fig. 3.3 exibe o NaOH utilizado na pesquisa, sendo na Fig. 3.3a o ativador no formato de micropérolas e na Fig. 3.3b já moído.



a) b)

Figura 3.3 - Hidróxido de sódio (NaOH): a) sem moagem; b) moído.

3.2 - MÉTODOS

Para atender os objetivos desta pesquisa, inicialmente foram realizados testes preliminares visando o entendimento do comportamento dos materiais, selecionar os precursores e ativadores, e confirmar os parâmetros de interesse. Concluída essa etapa, iniciaram-se os ensaios de caracterização geotécnicos na areia e nos rejeitos, acompanhados de análises químicas e mineralógicas para conhecimento dos materiais e definição dos teores de cada um. Com todos os parâmetros definidos, prosseguiu-se com as baterias de ensaios mecânicos e hidráulicos. Por fim, para o entendimento dos processos e do comportamento das misturas identificado por meio desses ensaios, foram realizadas novas análises químicas e mineralógicas, bem como análises microestruturais. A Fig. 3.4 apresenta o esquema do programa de ensaios da pesquisa, bem como a Tab. 3.1 revela o quantitativo de ensaios para a tese.

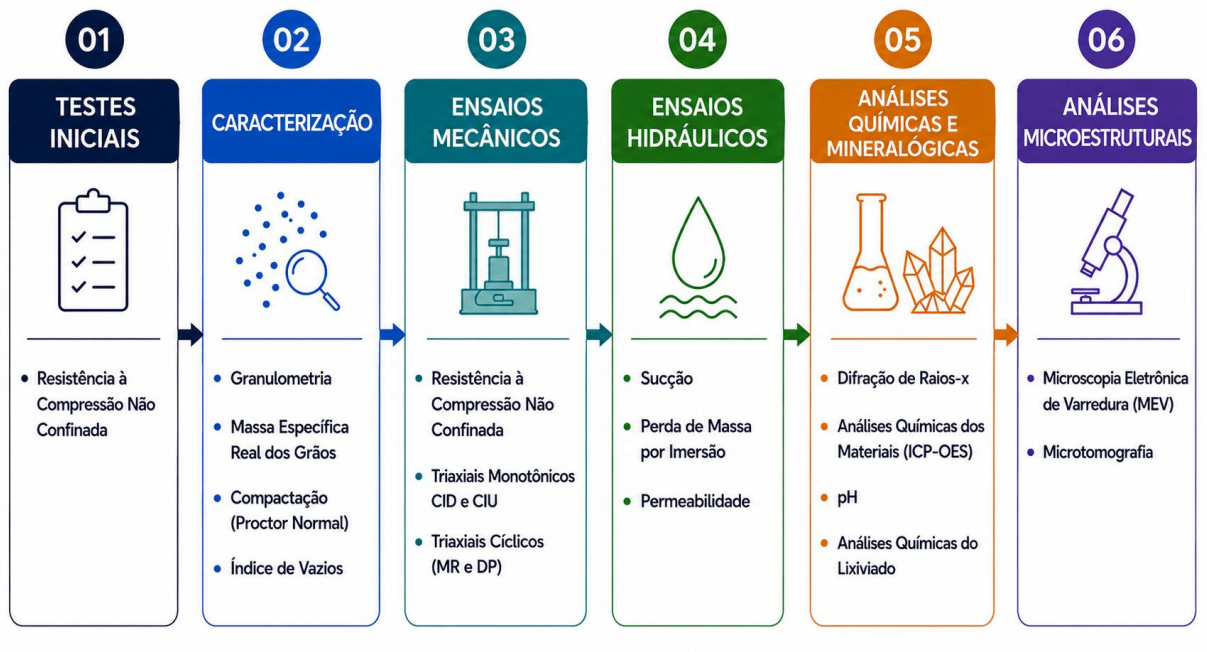


Figura 3.4 - Esquema do programa de ensaios da pesquisa.

Tabela 3.1 - Quantitativo de Ensaios para a tese.

Ensaios	**Quantitativo de Ensaios**
Caracterização Geotécnica	9
Resistência à Compressão Não Confinada	144
Triaxiais Monotônicos CID e CIU	40
Triaxiais Cíclicos de Cargas Repetidas	78
Sucção Total	168
Perda de Massa Por Imersão	16
Permeabilidade	10
Difração de Raios-X	10
Análises Químicas dos Materiais (ICP-OES)	10
pH	18
Análises Químicas do Lixiviado (ICP-OES)	8
MEV	6
Microtomografia	2
Total de Ensaios	**519**

3.3 - TESTES INICIAIS

Inicialmente foram realizados pequenos testes de análises táteis-visuais considerando diferentes teores de geopolímero, variações na umidade de moldagem e na temperatura de cura (Fig. 3.5a). Apenas com estas avaliações, foi possível reduzir o intervalo dos parâmetros a serem avaliados,

um exemplo foi a mistura com o teor de 10% de geopolímero, que se revelou insuficiente para promover a estabilização do rejeito.

Quanto à variação das temperaturas para a geopolimerização, embora os resultados dos testes iniciais contemplando maiores temperaturas (60°C, 80°C e 120°C) tenham indicado ganhos de resistência significativos em curto prazo, optou-se por não aprofundar essa análise devido à dificuldade de se manter condições controladas de temperatura em campo. A Fig. 3.5b exibe algumas amostras colocadas em estufa para avaliação do comportamento do material sob a ação de diferentes temperaturas, contudo, para todos os outros ensaios, a temperatura de cura ao ar de todas as amostras foi mantida em 20°C±2°C.



a) b)

Figura 3.5 - Análises táteis-visuais: a) Amostras de materiais estabilizados com diferentes teores de geopolímero e umidades de moldagem e b) Amostras com diferentes teores e temperaturas de cura.

Após estes testes preliminares, foi conduzida uma nova bateria de ensaios de resistência à compressão simples, avaliando-se parâmetros como concentração de ativador, teor de geopolímero e tempo de cura ao ar. A Tab. 3.2 resume os parâmetros avaliados e os valores finais definidos a partir dos testes iniciais.

Tabela 3.2 - Parâmetros de análise da pesquisa.

Parâmetros	**Testes Iniciais**	**Definidos**
Teor de Geopolímero na Massa de Coproduto (%)	10, 20, 30 e 40	20 e 30
Concentração de Ativador (Mols/L)	2,5,8 e 12	5 e 8
Relação Coproduto/Resíduo de Perlita na Massa de Geopolímero	50/50, 20/80, 30/70 e 0/100	0/100 (100% de resíduo de perlita)
Relação Líquido/Sólido (l/s)	0,8, 1 e 1,5	método *One Part*
Granulometria dos Materiais	Com/sem moagem	Com moagem
Tempo de Cura ao Ar (Dias)	7 e 28	7, 14, 28 e 56
Massa Específica dos Grãos (g/cm³)	1,7 e 1,8	1,7 e 1,8
Umidade de Moldagem (%)	12 e 14	12 e 14

Com o tempo, as reações químicas entre a pasta geopolimérica - principalmente devido à presença de NaOH - e o ar atmosférico avançaram de fora para dentro, aumentando a resistência e rigidez dos compósitos derivados do subproduto. O principal desafio durante a preparação das amostras foi o controle de qualidade, uma vez que os espécimes apresentavam variabilidade devido à temperatura e umidade. Para minimizar esse efeito, todas as amostras foram moldadas e curadas em ambiente controlado. Também, a partir desses ensaios, adotou-se o método *One Part*, visando a aplicação do produto em campo. Por utilizar os precursores e ativadores sólidos, essa técnica apresenta maior praticidade operacional e segurança durante as etapas de armazenamento, transporte e manuseio dos materiais, favorecendo sua utilização em aplicações geotécnicas em larga escala.

O cálculo das relações Si/Al e Na/Al foi realizado segundo a metodologia de Shariatmadari et al. (2021), sendo que, para os teores especificados, a relação Si/Al resultou em 5,4 e a relação Na/Al variou entre 0,7 e 0,9, relações pouco divergentes do indicado por Davidovits (1982) para melhor obtenção das propriedades mecânicas nos geopolímeros.

3.4 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Para caracterização geotécnica dos materiais empregados na pesquisa, foram realizados os ensaios de granulometria, massa específica real dos grãos, compactação e índice de vazios. Não foi possível, entretanto, aferir os limites de Atterberg pois tanto o coproduto quanto as misturas coproduto-geopolímero não apresentaram plasticidade.

A granulometria do coproduto de rejeito de minério de ferro, do resíduo de perlita e da areia utilizados nesta pesquisa foi determinada por meio de um analisador de tamanho de partícula a laser (granulômetro a laser), equipamento que consta no Laboratório de Geotecnia da UnB. O princípio do método se embasa na emissão de um feixe de laser que atravessa a suspensão ou fluxo de partículas, permitindo a detecção e o registro da intensidade de luz espalhada em diferentes ângulos. Em comparação ao ensaio convencional estabelecido pela NBR 7181 (ABNT, 2025), o método a laser apresenta maior precisão e confiabilidade, uma vez que possibilita análises mais rápidas, amplia a capacidade de detecção de partículas muito finas, atingindo dimensões da ordem de 0,0001 mm, e não depende da hipótese de densidade real semelhante entre os diferentes minerais presentes nas amostras (OLIVEIRA, 2015).

A densidade real dos grãos do resíduo de perlita, do coproduto e da areia foi obtida por meio de um analisador automático de densidade, um pentapicnômetro modelo PENTAPYC 5200e da marca Quantachrome Instruments que atende a norma ASTM D5550-23 (ASTM,

2023). Esse tipo de equipamento é projetado especificamente para medir o volume real de materiais sólidos, empregando o princípio de Arquimedes de deslocamento de fluidos associado à expansão de gases (Lei de Boyle). No equipamento, as amostras são acondicionadas em cápsulas, e um gás inerte é injetado para preencher os vazios presentes. Neste caso utilizou-se o hélio como fluido deslocante, pois sua pequena dimensão atômica permite penetrar nos menores poros, com dimensões próximas a 0,2 nm, garantindo máxima precisão na determinação do volume sólido (QUANTACHROME, 2008). A densidade dos grãos é então calculada a partir da razão entre a massa da amostra e o volume efetivamente ocupado, obtido pela diferença entre o volume de gás injetado e o volume livre detectado. Para assegurar a confiabilidade dos resultados, o equipamento realiza cinco medições sucessivas para cada amostra e adota a média das três leituras mais próximas. A Fig. 3.6 mostra o pentapicnômetro utilizado neste estudo.



Figura 3.6 - Pentapicnômetro utilizado na pesquisa.

A determinação do índice de vazios máximo foi realizada por meio da NBR 16840 (ABNT, 2021), que consiste em obter o valor máximo de vazios do coproduto de rejeito de minério de ferro, em seu estado mais fofo, dispondo o material em um cilindro metálico de volume conhecido em uma queda livre entre o bico do funil e a superfície de aproximadamente 1 cm até completar o cilindro a fim de se garantir o seu estado fofo, obtendo-se no mínimo três medições próximas de até 1,5% da média. Já o índice de vazios mínimo foi obtido conforme a NBR 16843 (ABNT, 2020), que consiste em dispor o coproduto no cilindro metálico em uma mesa vibratória eletromagnética de aço, com vibração acionada por um vibrador eletromagnético do tipo impacto sólido com massa maior que 45 kg. Na Fig. 3.7a tem-se uma imagem no ensaio de índice de vazios máximo e na Fig. 3.7b, do índice de vazios mínimo.



a) b)

Figura 3.7 - Ensaios de índices de vazios: a) máximo e b) mínimo.

3.5 - CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Os ensaios de compactação foram realizados em conformidade com a norma ABNT NBR 7182 (ABNT, 2025), com o objetivo de avaliar a influência do geopolímero na matriz do coproduto proveniente de rejeitos de minério de ferro. Utilizou-se um cilindro grande de Proctor com energia normal de compactação (600 kN·m/m³), que consiste em 5 camadas e 12 golpes com soquete grande por camada. A pasta geopolimérica foi preparada pelo método *One Part* e incorporada gradualmente ao coproduto. A preparação da pasta e disposição sobre o coproduto foi realizada de forma rápida e em sacos plásticos, a fim de se evitar a perda de umidade. A compactação foi conduzida tanto no coproduto bruto quanto nos compósitos contendo 80% coproduto + 20% geopolímero (C80G20) e 70% coproduto + 30% geopolímero (C70G30), em relação à massa seca do coproduto.

A partir das curvas de compactação, a massa específica seca máxima das amostras foi padronizada em 1,8 g/cm³ para o restante dos ensaios, com teor de umidade ótima de moldagem de 14%, permitindo comparações entre o coproduto bruto e os compósitos coproduto-geopolímero, sem considerar variáveis adicionais. Considerou-se adequadas as amostras com grau de compactação acima de 95% e variações do teor de umidade ótimo ($\Delta\omega$) de ±1%. A Fig. 3.8 mostra alguns dos corpos de prova moldados para serem utilizados nos ensaios de resistência à compressão não confinada.



Figura 3.8 - Moldagem de corpos de prova cilíndricos 5x10 cm para ensaios de resistência.

3.6 - ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos foram realizados com o propósito de avaliar o efeito da estabilização do coproduto de rejeito de minério de ferro com geopolímero sobre seu comportamento resistente e deformacional. Para isso, foram conduzidos ensaios de resistência à compressão simples, ensaios triaxiais estáticos e ensaios de carregamento cíclico, abrangendo diferentes condições de cura e moldagem. Esses ensaios permitiram analisar a evolução da resistência, da rigidez e da deformabilidade do material ao longo do tempo, fornecendo subsídios para a compreensão das alterações promovidas promovidos pelo tratamento com geopolímero.

3.6.1 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

O ensaio de resistência à compressão não confinada, RCNC ou $\boldsymbol{q_u}$, também denominado de resistência à compressão simples, foi realizado conforme a ABNT NBR 12770 (ABNT, 2022). Foram moldados corpos de prova de coproduto bruto (C100) e dos compósitos coproduto-geopolímero 80% coproduto + 20% geopolímero (C80G20) e 70% coproduto + 30% geopolímero **(**C70G30) e areia-geopolímero 70% areia + 30% geopolímero (A70G30) considerando diferentes densidades (1,7 g/cm³ e 1,8 g/cm³), umidades de moldagem (12% e 14%) e tempos de cura ao ar (7, 14, 28 e 56 dias) em um equipamento de mini-MCV.

Os corpos de prova resultaram em alturas de aproximadamente 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, compactados com energia normal em 2 camadas, com 10 golpes por camada, conforme indicado pela norma DNIT 228/2023 – ME (DNIT, 2023). Para cada uma das dosagens do geopolímero foram moldadas amostras em tréplica, com grau de compactação acima de 95% e variações do teor de umidade ótimo (Δω) de em torno de 1%, visando a maior

confiabilidade dos resultados. A Fig.3.9 mostra a multiprensa Owntec do Laboratório de Novos Materiais Geotécnicos utilizada para a ruptura dos corpos de prova.



a) b) c)

Figura 3.9 - Ensaios de RCNC: a) Corpos de prova moldados; b) Equipamento e c) Corpo de prova após ruptura.

A velocidade da deformação axial específica utilizada nos ensaios foi de 1 mm/min (a norma preconiza o intervalo de 0,5% H/min a 2% H/min, sendo H a altura do corpo de prova em mm). O critério de ruptura foi estabelecido conforme a norma, que é o estado em que se atinge a máxima tensão axial ou deformação axial de 15% sem que se tenha caracterizado um valor máximo de tensão axial.

3.6.2 - TRIAXIAIS MONOTÔNICOS CID E CIU

Foram realizados ensaios triaxiais nas amostras de coproduto de rejeito de minério de ferro bruto nos compósitos C70G30 fabricados conforme o método *One Part*, com umidade de moldagem de 14% e densidade de 1,8 g/cm³. As amostras foram avaliadas em quatro tempos de cura ao ar (7, 14, 28 e 56 dias), sob temperatura controlada de aproximadamente 20 °C (±2 °C) e umidade relativa média entre 35 % e 40%. Durante todo o período de cura, os corpos de prova permaneceram no mesmo ambiente, sem alteração das condições de exposição.

Diferentemente dos ensaios de cisalhamento direto, que estabelecem um plano de ruptura pré-definido nas amostras, nos ensaios triaxiais as amostras rompem em seu plano natural, permitindo uma avaliação mais realista do comportamento do material. Além disso, a aplicação de tensões de confinamento nos ensaios triaxiais aproxima as condições de campo às quais o material estará submetido, possibilitando a análise de diferentes cenários. Nesse contexto, esta pesquisa contemplou ensaios triaxiais consolidados isotrópicos drenados (CID)

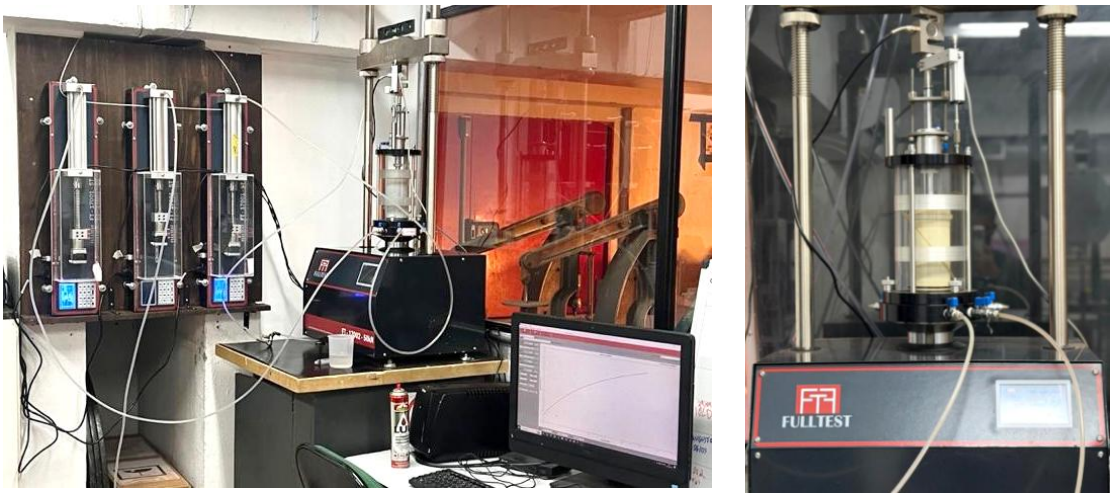
e ensaios triaxiais consolidados isotrópicos não drenados (CIU), fundamentados pelas normas ASTM D7181-20 (ASTM, 2020) e ASTM D4767-11 (ASTM, 2020).

Os ensaios foram conduzidos sob tensões de confinamento de 250, 500, 1000 e 2000 kPa, de forma a simular condições representativas de diferentes aplicações geotécnicas de pequeno e grande porte, tais como aterros, camadas de muros de contenção e empilhamentos. Os corpos de prova apresentavam 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, compactados com os mesmos padrões mencionados anteriormente. Os testes foram realizados utilizando a prensa Fulltest FT-17002, pertencente ao Laboratório de Novos Materiais Geotécnicos, equipada com célula de carga de 50 kN, capaz de aplicar tensões de até 3,2 MPa, atendendo à ASTM D7181-20 (2020).

O procedimento experimental foi estruturado em quatro etapas principais:

1. Saturação por contrapressão: Nesta fase, os corpos de prova foram submetidos à saturação por aplicação de contrapressão, sendo considerada adequada a condição em que o parâmetro B de Skempton atingiu valores iguais ou superiores a 0,96, conforme o critério utilizado por Skempton (1954) para saturação completa;
2. Permeabilidade: Entre a saturação e o adensamento, foi realizada a medição da permeabilidade à carga constante das amostras, como comparativo aos ensaios de permeabilidade em permeâmetro;
3. Adensamento: Após a etapa de saturação, as amostras foram submetidas ao processo de adensamento isotrópico sob as tensões de confinamento previamente definidas;
4. Cisalhamento: Na fase de cisalhamento aplicou-se deformação axial controlada. Nos ensaios CID, foi utilizada uma taxa de deformação de 0,04 mm/min, definida a partir dos parâmetros obtidos na etapa de adensamento e conforme o critério proposto por Head (1998), a fim de evitar o desenvolvimento de poropressões excessivas. Já nos ensaios CIU, adotou-se uma taxa de deformação de 0,06 mm/min, condição usual para obtenção dos parâmetros de resistência em termos de tensões totais. Em ambos os casos, os ensaios foram conduzidos até a deformação axial máxima permitida pelo equipamento, de 30%, de modo a captar tanto o comportamento até a ruptura quanto a resposta pós-pico.

   A Fig. 3.10a e Fig. 3.10b apresentam o equipamento triaxial monotônico utilizado na pesquisa.



a) b)

Figura 3.10 - Equipamento triaxial monotônico de 3,2 MPa: a) Sistema completo conectado à pressurização e b) Prensa.

3.6.3 - TRIAXIAIS CÍCLICOS DE CARGAS REPETIDAS

Os ensaios triaxiais cíclicos foram realizados em complemento à caracterização mecânica obtida por meio dos ensaios triaxiais estáticos, uma vez que ambos avaliam o comportamento do material sob estado triaxial de tensões, porém sob diferentes condições de carregamento. Enquanto os ensaios estáticos permitem determinar os parâmetros de resistência e deformabilidade sob carregamento monotônico, os ensaios cíclicos possibilitam avaliar a resposta do material às solicitações repetidas, reproduzindo de forma mais representativa as condições de serviço de estruturas de pavimentos. Assim, com o objetivo de avaliar a aplicação do geopolímero em estruturas de pavimentos e compreender o comportamento mecânico do coproduto bruto e dos compósitos coproduto-geopolímero sob carregamentos repetitivos, semelhantes aos impostos pela ação do tráfego, foram realizados ensaios triaxiais cíclicos para a determinação do Módulo de Resiliência (MR) e da Deformação Permanente (DP).

Enquanto o Módulo de Resiliência é um parâmetro que possibilita o entendimento da capacidade do material em recuperar sua forma após a aplicação e a remoção de uma carga cíclica, a Deformação Permanente corresponde ao acúmulo de deformações permanentes (plásticas) de um material quando submetido a carregamentos repetidos, que pode ser associada a eventos como afundamentos em trilha de roda e que possibilita uma análise da evolução da deformação acumulada e a calibração de modelos de desempenho (MONISMITH et al., 1975; GUIMARÃES, 2009).

A determinação do MR foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos pelas normas DNIT 134/2018-ME, destinada a solos e materiais não estabilizados quimicamente, e

DNIT 181/2018-ME, aplicável a misturas melhoradas ou estabilizadas quimicamente. Já a avaliação da DP seguiu os critérios da DNIT 179/2018-IE. Os ensaios foram conduzidos em equipamento triaxial cíclico, conforme ilustrado na Fig. 3.11a, utilizando corpos de prova moldados em cilindro metálico tripartido com dimensões de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro. A compactação foi realizada com energia normal, em 10 camadas sucessivas, aplicando-se 5 golpes por camada, adotando-se como critério de controle o grau de compactação de 95% e de ± 1%, com controle da umidade de moldagem. Para cada condição experimental, foram moldados e ensaiados três corpos de prova.

Os compósitos foram preparados na proporção de 70% coproduto + 30% geopolímero (C70G30), utilizando teor de umidade de moldagem de 14% e massa específica seca de 1,8 g/cm³. As amostras foram submetidas a quatro períodos de cura ao ar (7, 14, 28 e 56 dias), em ambiente controlado. Na Fig. 3.11 são apresentadas imagens dos corpos de prova após os respectivos períodos de cura. Com o objetivo de avaliar a influência da umidade no comportamento mecânico dos materiais, os ensaios foram realizados tanto na condição natural quanto após a imersão dos corpos de prova em água durante 4 horas antes da aplicação do carregamento cíclico (ver Fig. 3.11f).

A leitura das deformações foi realizada por meio de LVDTs, cujos dados foram posteriormente tratados e convertidos utilizando o software Easy Converter, disponibilizado pela empresa detentora do triaxial, Owntec. Para as medições realizadas no topo dos corpos de prova, utilizou-se LVDT com curso de 20 mm, enquanto para as leituras no terço médio foi empregado LVDT com curso de 2 mm, possibilitando maior precisão na aquisição das deformações locais. Os ensaios de deformação permanente foram conduzidos até o limite de 150.000 ciclos de carregamento, adotando-se como critério de interrupção o número máximo de ciclos ou a ocorrência de deformação permanente de 20 mm. Além disso, foram aplicados com frequência de 2 Hz, conforme indicado pela norma vigente.

Para a obtenção das correlações de ajuste do módulo de resiliência, foram empregados os modelos dependentes da tensão confinante, dependente da tensão desvio, dependente do somatório de tensões e o modelo combinado. Já para a análise da deformação permanente, utilizou-se o modelo proposto por Monismith. Ressalta-se que não foi possível ensaiar na amostra de coproduto bruta devido à sua fragilidade.

É importante mencionar que não foi exequível o ensaio de Deformação Permanente em amostras com 7 dias de cura pois o compósito ainda estava úmido em seu interior e, consequentemente, não apresentou estabilidade estrutural suficiente.

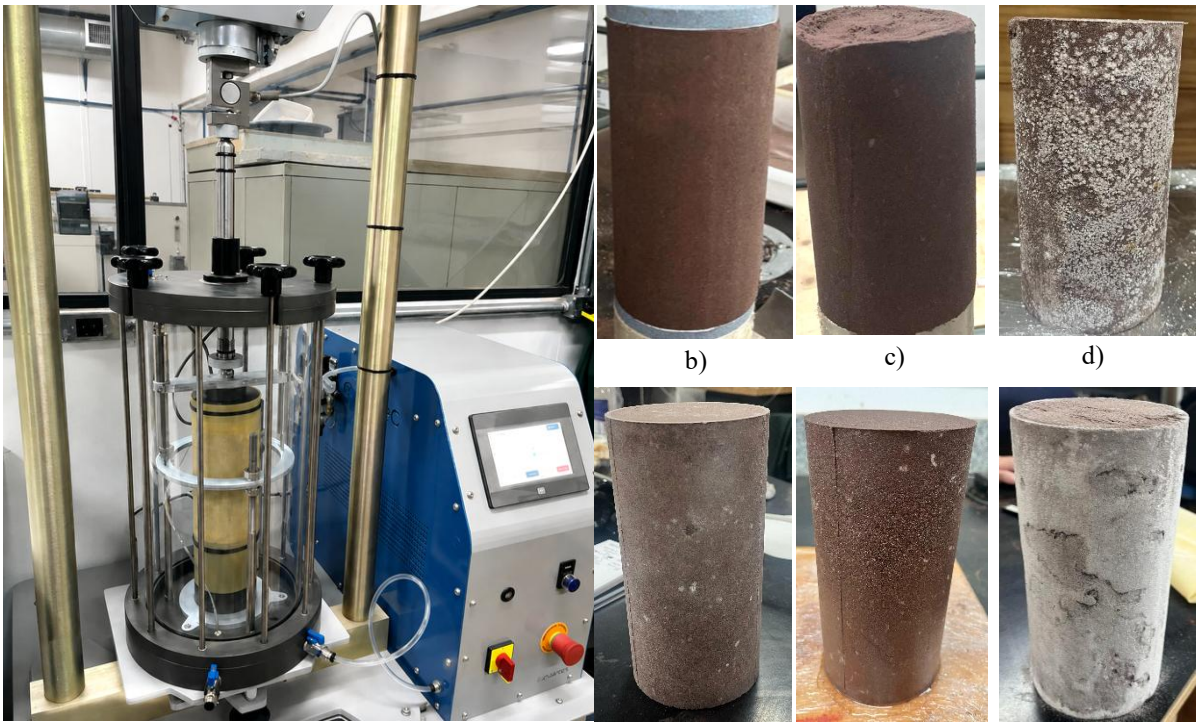


Figura 3.11 – Ensaio triaxial cíclico: a) Equipamento; b) C100-14-1,8; e compósitos C70G30-14-1,8 com c) 7 dias de cura; d) 14 dias de cura; e) 28 dias de cura; f) 28 dias de cura após imersão e g) 56 dias de cura ao ar.

Observa-se a presença de depósitos esbranquiçados nas amostras a partir dos 14 dias de cura (Fig 3.11d, 3.11e e 3.11f). Esse comportamento pode estar associado à ocorrência de eflorescência, fenômeno comum em materiais geopoliméricos, decorrente da migração de espécies alcalinas, principalmente sódio, para a superfície do material e sua posterior reação com o dióxido de carbono atmosférico. A formação desses depósitos indica a presença de álcalis não totalmente incorporados à estrutura aluminosilicática durante o processo de geopolimerização, sendo sua intensidade influenciada pelas condições de cura, disponibilidade de umidade e avanço das reações de endurecimento da matriz.

3.7 - ENSAIOS HIDRÁULICOS

Os ensaios hidráulicos foram realizados com o objetivo de avaliar a influência da estabilização geopolimérica no comportamento da água no interior do material, bem como sua resistência à ação da umidade. Para essa avaliação, foram realizados ensaios de sucção, perda de massa por imersão e permeabilidade, os quais permitiram analisar o comportamento hídrico do material, sua resistência à ação da água e a capacidade de fluxo através da matriz geopolimérica.

3.7.1 - SUCÇÃO

O equipamento WP4C da marca METER Group (ver Fig. 3.12) se trata de um analisador do potencial hídrico de solos, ou seja, da sucção em seus dois componentes principais: matricial e osmótico. Seu funcionamento é fundamentado na medição da umidade relativa do ar acima de uma amostra colocada em uma câmara selada, conforme especificado na ASTM D6836-25 (ASTM, 2025). Quando a amostra atinge o equilíbrio com o vapor, a umidade relativa é determinada pelo método do espelho resfriado, que consiste em esfriar um pequeno espelho até que o orvalho comece a se formar. No ponto de orvalho, o WP4C mede com extrema precisão a temperatura do espelho e da amostra, com resolução de até 0,001°C, permitindo leituras confiáveis na faixa de sucção de -0,1 MPa a -300 MPa (METER Group, 2025).

Embora o WP4C seja amplamente utilizado para determinação da sucção total devido à rapidez e praticidade das medições, estudos recentes indicam que o equipamento pode apresentar desvios sistemáticos em relação a outros métodos de determinação da sucção, como o papel filtro, a placa de pressão e a técnica de equilíbrio de vapor, especialmente para sucções inferiores a 10 MPa (LU et al., 2023). Segundo os autores, essas diferenças estão associadas ao comportamento distinto da difusão de vapor em superfícies do solo quando comparadas a superfícies líquidas, podendo resultar em superestimativas da sucção medida pelo equipamento. Apesar dessas limitações, a utilização do WP4C no presente estudo é considerada adequada, uma vez que o objetivo principal consiste na comparação do comportamento do coproduto bruto e dos compósitos geopoliméricos. Como todas as amostras foram ensaiadas sob as mesmas condições experimentais e utilizando o mesmo equipamento, eventuais incertezas sistemáticas tendem a afetar igualmente os resultados, preservando a confiabilidade das análises comparativas e das tendências observadas entre os materiais.

A medição da sucção é essencial para avaliar a contribuição da sucção na resistência do rejeito estabilizado com geopolímero. Para isso, foram moldadas amostras de 4 cm de diâmetro por 1 cm de altura tanto do coproduto bruto (C100) quanto do compósito C70G30, com 14% de umidade de moldagem e densidade de 1,8 g/cm³, submetidas a quatro tempos de cura ao ar: 7, 14, 28 e 56 dias. É importante ressaltar que o objetivo desses ensaios não foi obter a curva de retenção de água, mas apenas observar as diferenças entre o estado de energia da água do coproduto com e sem a estabilização.



Figura 3.12 - Equipamento WP4C da METER Group.

3.7.2 - PERDA DE MASSA POR IMERSÃO

Os ensaios de perda de massa por imersão foram realizados nos compósitos coproduto–geopolímero de acordo com a norma DNIT 258/2023-ME (DNIT, 2023). As amostras ensaiadas foram constituídas de 80% coproduto + 20% geopolímero (C80G20) e 70% coproduto + 30% geopolímero (C70G30). Para a moldagem, foram adotadas umidades de 12% e 14% e densidades de 1,7 e 1,8 g/cm³, respectivamente, sendo as amostras de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro ensaiadas após 14 e 28 dias de cura ao ar, em temperatura ambiente de 20±2°C. Diferentemente dos outros ensaios, em que foram avaliadas apenas uma umidade de moldagem e uma densidade, este foi um dos primeiros ensaios realizados e por isso ainda se realizava uma análise mais abrangente, com avaliação de diferentes teores de geopolímero.

Após a moldagem, manteve-se uma parte de aproximadamente 1 cm do corpo de prova exposta fora do cilindro, de modo que este pudesse ser imerso em um recipiente com água, onde permaneceu por, no mínimo, 24 horas. Concluída a imersão, determinou-se a massa de material perdida, contabilizada da faixa deste primeiro centímetro, durante o ensaio. Cabe ressaltar que foi necessária uma adaptação, sendo os corpos de prova estabilizados envoltos apenas por plásticos-filme, dada a elevada rigidez deles e dificuldade de retirá-los do molde. Na Fig. 3.13 é possível observar a execução de alguns dos ensaios.



Figura 3.13 - Execução de ensaio de perda de massa por imersão.

3.7.3 - PERMEABILIDADE

Foram realizados ensaios de permeabilidade nas amostras de coproduto bruto e dos compósitos coproduto-geopolímero C70G30 com 7, 14, 28 e 56 dias de cura ao ar, a fim de avaliar a evolução do comportamento hidráulico em função das reações de geopolimerização e da estruturação do material nos coeficientes de permeabilidade (k).

Inicialmente, executou-se o ensaio de permeabilidade à carga constante, conforme a ABNT NBR 13292 (ABNT, 2021), no coproduto bruto e nos compósitos C70G30, por meio de medições realizadas no equipamento triaxial estático. Na sequência, como comparativo, foram realizados os ensaios de permeabilidade à carga variável, de acordo com a ABNT NBR 14545 (ABNT, 2021), tanto para o coproduto bruto quanto para os compósitos coproduto-geopolímero nas mesmas proporções e idades de cura. Em princípio, o método de carga constante seria o mais indicado para o coproduto bruto, em função de sua granulometria arenosa e maior condutividade hidráulica. Contudo, visando uma avaliação mais abrangente do comportamento hidráulico dos materiais, adotou-se a aplicação e comparação de ambos os métodos.

A execução dos ensaios pode ser observada nas Fig. 3.14a e 3.14b, referentes ao ensaio de permeabilidade à carga constante, e na Fig. 3.14c, que ilustram o ensaio de permeabilidade à carga variável em uma amostra do compósito C70G30, moldada com densidade de 1,8 g/cm³, umidade de 14% e 28 dias de cura ao ar.



a) b) c) d)

Figura 3.14 - Ensaios de permeabilidade: a) Equipamento de permeabilidade à carga constante, b) Amostra de rejeito bruto; c) Equipamento de permeabilidade à carga variável e d) Amostras de coproduto e do compósito.

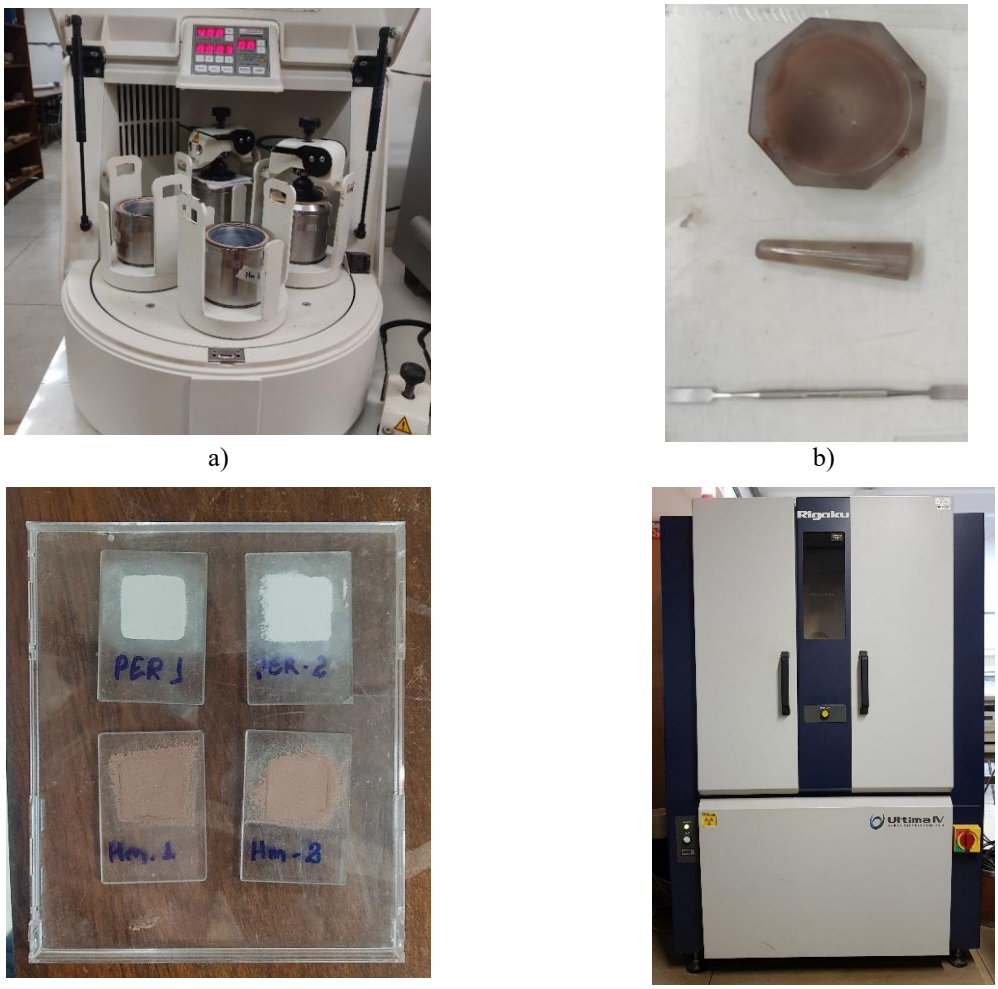
3.8 - ANÁLISES QUÍMICAS E MINERALÓGICAS

As análises químicas e mineralógicas foram realizadas com o objetivo de caracterizar os materiais utilizados e compreender as transformações decorrentes do processo de estabilização geopolimérica. Para isso, foram conduzidos ensaios de difração de raios-x (DRX), análises químicas por Espectrometria de Emissão Ótica Por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES), determinação de pH e análises químicas dos lixiviados, permitindo identificar os principais elementos químicos constituintes dos materiais, as fases minerais presentes antes e após o tratamento, o comparativo da alcalinidade dos materiais e a mobilização de elementos.

3.8.1 - DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

Na presente pesquisa, os ensaios de DRX foram realizados a fim de identificar a composição mineralógica do coproduto de rejeito de minério de ferro, resíduo de perlita, areia e dos compósitos C70G30 e A70G30, realizados no Laboratório de Geociências da Universidade de Brasília (UnB). A preparação das amostras consistiu, primeiramente, na moagem dos materiais em um moinho de bolas (Fig. 3.15a), seguida de destorroamento em recipiente de ágata (Fig. 3.15b), procedimento necessário para desagregar os grãos e alcançar uma granulometria mais fina e homogênea sem contaminar as amostras. Em seguida, as amostras foram cuidadosamente acomodadas em pequenas placas (Fig. 3.15c), que foram inseridas no equipamento de DRX para análise.

A análise por difração de raios X (DRX) foi realizada em amostra total, no intervalo angular de 2° a 60° (2θ), com passo de 0,05° e velocidade de varredura de 5°/min. O ensaio foi conduzido em difratômetro Rigaku Ultima IV, utilizando tubo de cobre (Cu). A identificação das fases cristalinas foi realizada com auxílio do software Jade 9, com consulta aos bancos de dados ICDD PDF-2 e PDF-4 2010. A Fig. 3.15d ilustra o equipamento de difração empregado nas análises desta pesquisa.



a) b)

c) d)

Figura 3.15 - Preparação das amostras para o procedimento de Difração de Raios-X: a) Mini moinho de bolas; b) Destorroamento das amostras em recipiente de Ágata roxa; c) Colocação das amostras nas placas para introduzir no equipamento e d) Difratômetro de Raios-X.

3.8.2 - ANÁLISES QUÍMICAS POR ICP-OES

As análises químicas foram realizadas por meio da Espectrometria de Emissão Ótica Por Plasma Acoplado Indutivamente (*Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry* – ICP-OES), técnica que consiste em determinar a composição química de uma amostra por meio da análise de espectros de emissão ótica gerados pela excitação e ionização de átomos por uma fonte de plasma (Fassel & Kniseley, 1974).

O método utilizado nesta pesquisa para a preparação digestão ácida por ácido hidroclorídrico (HCl) foi por forno mufla, que consiste em utilizar o forno mufla, um equipamento que pode proporcionar temperaturas entre 400 e 1200°C. A amostra em solução, depois de digerida, é aspirada para dentro de uma câmara de plasma, capaz de aquecê-la a altas temperaturas (de até 10.000°C) para que ocorra a vaporização do solvente e a ionização dos elementos presentes na amostra. Os íons e átomos excitados emitem as radiações eletromagnéticas de cada elemento, que são coletadas por meio de um espectrômetro óptico e convertida em um sinal elétrico. A intensidade da radiação (fótons de luz) é proporcional à concentração dos elementos presentes na amostra em seus comprimentos de onda característicos. A ICP-OES é muito utilizada em diversas áreas (química, ambiental, nas indústrias, entre outras), principalmente por ser um pouco mais simples que a técnica de Fluorescência de Raios-X e permitir obter resultados precisos e uma gama de elementos em baixas concentrações.

Para todas as amostras (coproduto de rejeito de minério de ferro, resíduo de perlita bruto, areia bruta e os compósitos C70G30 e A70G30) os ensaios foram realizados em duplicata. Além disso, foram conduzidas análises utilizando padrões nacionais e internacionais como referência, garantindo maior confiabilidade nos resultados.

Depois da digestão, as amostras passaram por diluição em água para que o equipamento de plasma do ICP-OES pudesse detectar com precisão a faixa de elementos detectados pelo equipamento. Enquanto isso, foi realizada a calibração do equipamento, onde são introduzidas amostras dos elementos puros a serem identificados, para assim conseguir as chamadas curvas de referência dos elementos, a fim de quantificar as concentrações reais nas amostras.

Por meio das Fig. 3.16 é possível observar os equipamentos utilizados e parte da execução das análises. Na Fig. 3.16a, tem-se uma imagem do forno mufla utilizado nesta pesquisa, pertencente ao laboratório de Geoquímica da UnB, modelo EDG1800 3P-S da marca EDG, capaz de operar em temperaturas de até 1100°C. Na Fig.3.16b é possível observar as cápsulas com as amostras após a passagem pelo forno mufla por 30 min a 950°C. Em cada uma das cápsulas foram adicionadas 0,05 g do material de análise e 0,17 g de Metaborato de Lítio, substância utilizada para dissolução dos óxidos metálicos, e homogeneizadas. Depois desta etapa, as amostras foram colocadas em béqueres de vidro com adição de uma solução de HCl a fim de se dissolver a massa fundida e colocadas para agitação (Fig.3.16c) até estarem prontas para diluição e depois processamento no equipamento de ICP-OES (Fig. 3.16d) da marca Agilent Technologies modelo 5100.



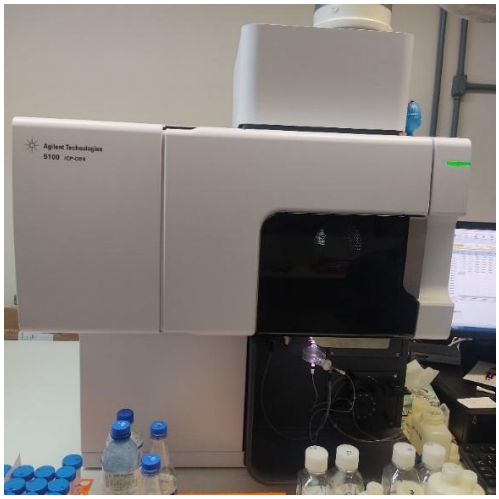
a)



b)



c)



d)

Figura 3.16 - Análises químicas dos materiais: a) Forno Mufla utilizado na pesquisa; b) Amostras fundidas; c) Agitação e d) Equipamento de ICP-OES.

3.8.3 - POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH)

Os valores de pH foram determinados para o coproduto de rejeito de minério de ferro e para os compósitos C70G30 e A70G30, com o objetivo de avaliar a influência da inclusão do geopolímero nas características químicas do coproduto. A medição foi realizada por dois métodos: pHmetro de solo e utilização de fitas indicadoras de pH. O pHmetro fornece resultados mais precisos e confiáveis, medidos por meio de eletrodos sensíveis à atividade de íons hidrogênio na solução, sendo considerado o método de referência para análises laboratoriais. Já as fitas de pH, embora apresentem menor exatidão devido à sua natureza semiquantitativa e dependente da interpretação visual da tabela de cores, foram empregadas neste estudo apenas como método comparativo, servindo como uma verificação rápida dos valores obtidos.

A análise do pH é fundamental, visto que influencia diretamente a estabilidade química e mineralógica das amostras, além de interferir na reatividade dos geopolímeros. Dessa forma, a combinação dos dois métodos buscou garantir maior confiabilidade e suporte à interpretação dos resultados experimentais.

3.8.4 - ANÁLISE DO LIXIVIADO

As análises de lixiviado foram conduzidas a partir das amostras obtidas nos ensaios de permeabilidade à carga variável. Foram coletadas amostras tanto do coproduto bruto quanto nos compósitos coproduto-geopolímero C70G30 para 7, 14, 28 e 56 dias de cura ao ar. Após a coleta, as amostras em estado líquido foram submetidas ao método de preparação por difusão e, em seguida, analisadas quimicamente também por meio do ICP-OES, passando por uma etapa adicional de preparo envolvendo redissolução em HCl antes das análises. Esse procedimento possibilitou avaliar a influência do processo de cura e da adição de geopolímero na liberação de íons para o lixiviado, fornecendo subsídios importantes para a compreensão do potencial de contaminação ambiental (ABNT NBR 10.004/24, CONAMA 357/05, CONAMA 420/09 e CONAMA 430/11) e da estabilidade química das misturas desenvolvidas. Na Fig. 3.17 são exibidas as amostras após a diluição, prontas para a análise por ICP-OES.

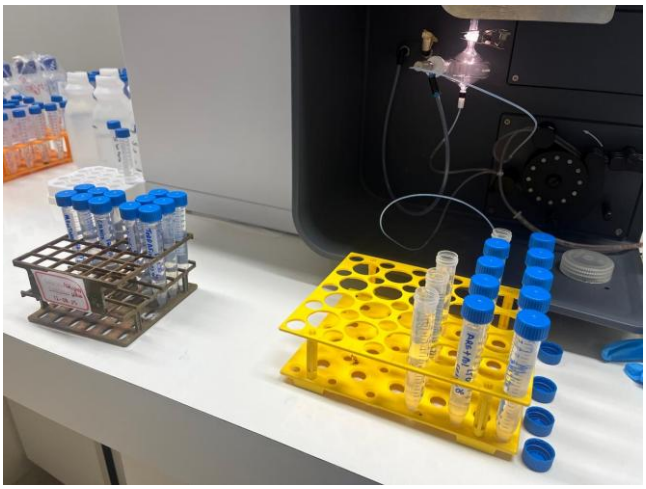


Figura 3.17 - Amostras de lixiviado para análise química.

3.9 - ENSAIOS DE MICROESTRUTURA

Com o objetivo de compreender as alterações microestruturais promovidas pela estabilização do coproduto com geopolímero à base de resíduo de perlita, foram realizadas análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e microtomografia computadorizada (micro-CT). Essas técnicas permitiram avaliar a morfologia dos materiais, a formação da matriz geopolimérica e as modificações na distribuição e conectividade dos vazios.

3.9.1 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizados a fim de avaliar a microestrutura dos materiais e compreender os mecanismos associados à estabilização do coproduto por meio do geopolímero à base de resíduo de perlita (morfologia das partículas, interação entre as partículas do coproduto e a matriz geopolimérica, análise da presença de produtos cimentantes e grau de cimentação e a distribuição e conectividade dos vazios). O microscópio utilizado foi o equipamento JEOL JCM-5000 da marca NeoScope com voltagem de aceleração de 30 KV, resolução de 3 nm, aumento até 300.000 X do Laboratório de Micropaleontologia, vinculado ao Instituto de Geociências da UnB. Para as análises, foram preparados corpos de prova cilíndricos compactados de aproximadamente 5 mm de diâmetro por 5 mm de altura, compostos pelo coproduto bruto, C100, e pelo compósito coproduto-geopolímero C70G30 após 28 dias de cura ao ar, permitindo observar com maior assertividade os produtos formados e a consolidação da matriz geopolimérica. Dos corpos de prova foram retirados pequenos fragmentos (ver Fig. 3.18a do coproduto, e Fig. 3.18b do compósito), procedimento adotado para facilitar o manuseio das amostras e reduzir o tempo de aquisição das imagens. Os fragmentos foram submetidos ao processo de metalização, que consiste na aplicação de uma fina camada de ouro, material eletricamente condutivo, garantindo a correta condução dos elétrons durante a obtenção das imagens. Foram inicialmente imageadas nas ampliações de 22×, 50×, 100×, 500× e 1000×. Entretanto, nesta tese foram mantidas apenas as ampliações de 50× e 1000×, por apresentarem melhor qualidade e maior relevância para as análises realizadas. Não foi possível identificar a composição química por EDS por limitação do equipamento.



a) b)

Figura 3.18 - Amostras metalizadas para análise MEV: a) C100 e b) C70G30.

3.9.2 - MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA (µCT)

Com o intuito de avaliar, de forma não destrutiva e tridimensional, a estrutura interna dos materiais, complementando as análises microestruturais obtidas por MEV, foram realizados ensaios de microtomografia computadorizada (µCT). Essa técnica não destrutiva utiliza raios X para gerar imagens tridimensionais da estrutura interna das amostras, permitindo a caracterização detalhada da porosidade, incluindo volume, tamanho e distribuição dos poros, bem como a avaliação da conectividade dos vazios, diretamente relacionada à permeabilidade do material. Adicionalmente, possibilita a identificação de zonas com diferentes graus de densificação, associadas à atuação do geopolímero, e a verificação da homogeneidade da mistura, por meio da análise da dispersão entre o coproduto e a matriz geopolimérica. Por fim, a técnica permite a comparação da estrutura interna entre o material bruto e o compósito estabilizado, evidenciando as modificações microestruturais decorrentes do processo de estabilização.

Os ensaios foram conduzidos no Grupo de Pesquisa em Microscopia Digital e Análise de Imagens (MicDigi), vinculado ao Departamento de Engenharia Química e de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), utilizando o microtomógrafo de raios X modelo Zeiss Xradia 510 Versa. O equipamento dispõe de sistema de lentes para seleção de volumes de interesse (IVOI – *Interior Volume of Interest*), permitindo a análise detalhada de regiões específicas das amostras. Opera com energia de até 160 kV e potência de 10 W, possibilitando adequada penetração dos raios X em materiais com diferentes densidades. A resolução espacial pode atingir até 0,7 µm, viabilizando a identificação de feições microestruturais finas, como poros e microfissuras. Adicionalmente, o sistema permite a formação de imagens tridimensionais em mosaico, ampliando o volume analisado sem perda significativa de resolução.

As aquisições foram realizadas utilizando lente Macro 0.4X, tensão de 80 kV e resolução espacial de 10 µm por voxel, com reconstrução das imagens em 8 bits (256 níveis de cinza). O tempo de exposição variou em função da densidade e da capacidade de atenuação dos materiais, resultando em tempos totais de varredura da ordem de 1 h 20 min a 1 h 45 min por amostra. As projeções obtidas foram reconstruídas por algoritmo de feixe cônico, gerando volumes tridimensionais posteriormente submetidos a etapas de filtragem para redução de ruído. A segmentação das imagens foi realizada por limiarização dos níveis de cinza, permitindo distinguir as diferentes fases constituintes dos materiais, incluindo poros, partículas minerais e matriz geopolimérica.

Para a realização das análises, foram preparados corpos de prova cilíndricos de aproximadamente 1 cm de diâmetro por 1 cm de altura, devidamente compactados, com as mesmas condições de preparo anteriormente mencionadas.

3.10 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS-CHAVE

Com o objetivo de avaliar a influência conjunta da estrutura interna e do teor de geopolímero no comportamento mecânico dos compósitos, foi empregada a metodologia baseada na relação entre porosidade e teor volumétrico de agente cimentante proposta por Consoli et al. (2007) e posteriormente adaptada para materiais estabilizados com resíduos e ligantes alternativos (CONSOLI et al., 2017; 2018; 2019). Inicialmente, foi determinada a porosidade (η) de cada mistura a partir das características de compactação e das massas específicas dos constituintes. Em seguida, calculou-se o teor volumétrico de agente cimentante (Biv), considerando a contribuição do geopolímero presente na mistura. A partir desses parâmetros, foi estabelecida a relação η/Biv^k, sendo o expoente k obtido por ajuste estatístico dos resultados experimentais. Posteriormente, os valores de resistência foram correlacionados com o índice η/Biv^k por meio de regressão do tipo potencial, conforme metodologia proposta por Consoli et al. (2007), permitindo avaliar a capacidade do parâmetro em representar a influência simultânea da porosidade e do teor de ligante no desenvolvimento da resistência dos compósitos geopoliméricos. Esta análise foi realizada utilizando tréplicas dos resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada executados após 7, 14, 28 e 56 dias de cura ao ar.

3.11 - ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para uma completa avaliação destes resultados, foi empregada a análise de variância (ANOVA). O delineamento experimental considerou quatro fatores: teor de geopolímero (20 e 30%), tempo de cura (7, 14, 28 e 56 dias), massa específica seca (1,7 e 1,8 g/cm³) e umidade de moldagem (12 e 14%), totalizando um arranjo fatorial completo com repetições no software RStudio.

A ANOVA foi conduzida considerando os efeitos principais dos fatores e todas as suas interações. As hipóteses nulas testadas assumiram que as médias de resistência eram estatisticamente iguais entre os diferentes níveis de cada fator, enquanto as hipóteses alternativas consideraram a existência de diferenças significativas entre os tratamentos.

Antes da interpretação dos resultados, foram verificadas as premissas necessárias para aplicação da ANOVA. A normalidade dos resíduos foi avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk e pela inspeção visual dos gráficos diagnósticos do modelo. A homogeneidade das variâncias foi analisada utilizando o teste de Breusch-Pagan. Além disso, foram examinados os

gráficos de resíduos em função dos valores ajustados, gráfico quantil-quantil normal (Q-Q Plot), escala-localização e resíduos versus alavancagem, visando identificar possíveis desvios das premissas do modelo ou observações influentes.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da campanha de ensaios definida na metodologia. Busca-se não apenas relatar os dados obtidos, mas também interpretá-los à luz dos objetivos do estudo, discutindo-os e estabelecendo correlações com a literatura.

4.1 - CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

A Fig. 4.1 apresenta o gráfico com as curvas granulométricas do coproduto de rejeito de minério de ferro bruto, do resíduo de perlita bruto e da areia obtida comercialmente, utilizados no estudo.

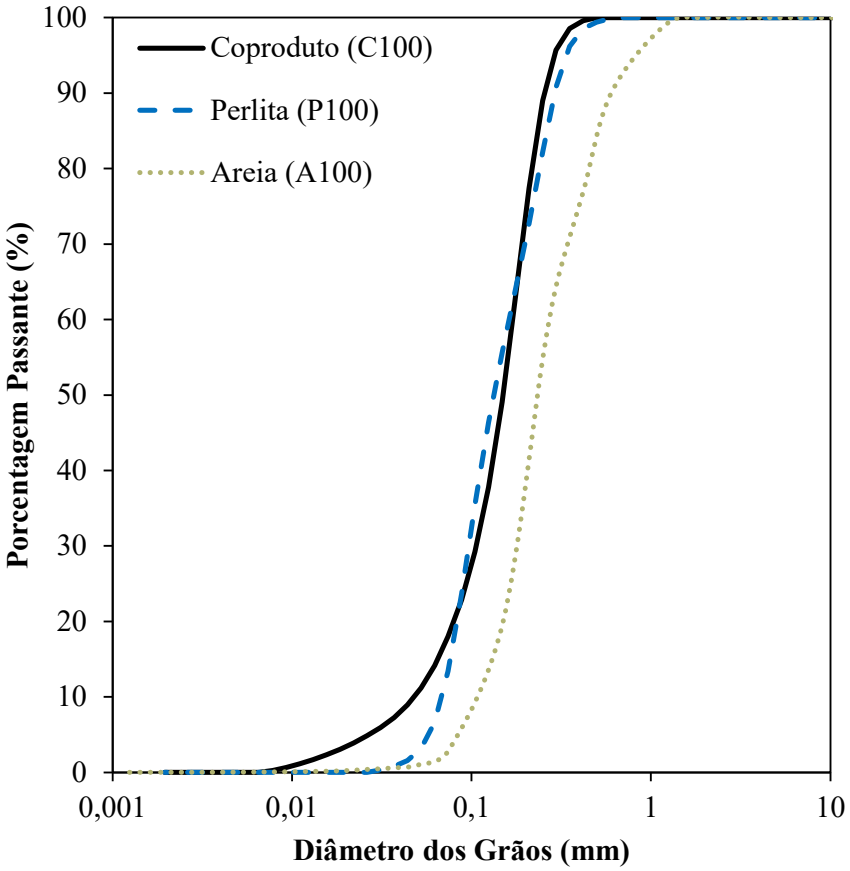


Figura 4.1 - Curvas granulométricas obtidas no estudo.

Na Tab. 4.1 são apresentados os parâmetros obtidos a partir das curvas granulométricas, bem como a classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Os valores dos diâmetros efetivos D10, D30 e D60, empregados nos cálculos dos coeficientes de curvatura e de uniformidade, Cc e Cu, foram determinados de acordo com os pontos das curvas granulométricas. Conforme mencionado anteriormente, nenhum desses materiais apresentou plasticidade, o que corrobora com sua classificação como areias segundo o SUCS. A diferença

entre as classificações deve-se principalmente ao teor de finos presente em cada material: o coproduto apresentou cerca de 13% de silte, sendo classificado como uma areia siltosa (SM), o resíduo de perlita possui uma característica intermediária, com finos entre 5 e 12% (5,9%), sendo classificado, portanto, como uma areia siltosa mal graduada (SP-SM) e a areia, com menos de 5% de finos (1,9%), foi classificada apenas como areia mal graduada (SP). Ressalta-se que não foram observadas frações significativas de argila ou presença de pedregulhos durante os ensaios.

Tabela 4.1 – Classificação SUCS.

Propriedades	Coproduto de Rejeito	Resíduo de Perlita	Areia
Diâmetro Efetivo – D10 (mm)	0,05	0,07	0,11
Diâmetro Efetivo – D30 (mm)	0,11	0,10	0,18
Diâmetro Efetivo – D60 (mm)	0,17	0,16	0,28
Coeficiente de Curvatura – Cc	1,39	0,85	1,10
Coeficiente de Uniformidade – Cu	3,55	2,39	2,60
Classificação SUCS	SM	SP-SM	SP

Na Tab. 4.2 podem ser observados os resultados dos ensaios para caracterização dos materiais.

Tabela 4.2 – Resumo dos resultados obtidos dos ensaios de caracterização geotécnica.

Propriedades	Coproduto de Rejeito	Resíduo de Perlita	Areia
Massa Esp. Real dos Grãos (g/cm³)	2,69	2,16	2,74
Limite de Liquidez (%)	NL	NL	NL
Índice de Plasticidade (%)	NP	NP	NP
Areia Grossa – 0,6 < diâmetro < 2 mm – (%)	0,00	0,10	10,00
Areia Média – 0,6 < diâmetro < 0,2 mm – (%)	26,40	29,50	50,30
Areia Fina – 0,2 < diameter < 0,06 mm – (%)	60,10	64,50	37,80
Silte – 0,06 < diâmetro < 0,002 mm – (%)	13,50	5,90	1,90
Argila – 0,002 mm ≤ diâmetro – (%)	0,00	0,00	0,00
Coeficiente de Curvatura – Cc	1,39	0,85	1,10
Coeficiente de Uniformidade – Cu	3,55	2,39	2,60
Classificação SUCS	SM	SP-SM	SP
$e_{mín}$	0,58	-	-
$e_{máx}$	0,89	-	-

Verifica-se que a massa específica real dos grãos do coproduto de rejeito e da areia apresentaram valores próximos entre si, situando-se dentro da faixa típica reportada para solos arenosos naturais, geralmente entre 2,60 e 2,70 g/cm³, conforme descrito por Carasek et al. (2016). Esse comportamento era esperado, uma vez que ambos os materiais apresentam

composição dominada por quartzo e minerais densos em menores proporções. Para o coproduto de rejeito de minério de ferro, os valores obtidos também se mostraram compatíveis com aqueles reportados por Golev et al. (2022) e pela AGERA (2025), os quais indicaram massas específicas variando entre aproximadamente 2,70 e 2,90 g/cm³ para esse tipo de material.

Em contrapartida, o resíduo de perlita apresentou massa específica significativamente inferior, comportamento associado à sua estrutura vítrea e altamente porosa, resultante do processo de expansão térmica da rocha perlítica. Valores semelhantes foram reportados por Celik et al. (2013), que identificaram massas específicas variando entre 2,2 e 2,3 g/cm³ para materiais à base de perlita. Observa-se ainda que o coproduto de rejeito e o resíduo de perlita apresentaram curvas granulométricas relativamente semelhantes quando comparados à areia comercial. Entretanto, a principal diferença entre esses materiais reside na composição mineralógica, uma vez que o coproduto contém óxidos de ferro em sua constituição, responsáveis por conferir maior densidade ao material, enquanto a perlita é composta predominantemente por sílica amorfa (SiO_2), além de pequenas frações de alumina e outros óxidos, o que justifica sua menor densidade e maior leveza.

Os valores de índices de vazios máximo e mínimo obtidos nesta pesquisa também se mostraram compatíveis com aqueles reportados na literatura para rejeitos de minério de ferro, situando-se entre 0,7 e 1,4 para os índices de vazios máximos e entre 0,3 e 1,2 para os índices de vazios mínimos, conforme observado por Yang et al. (2006), Rezende (2013), Silva (2017) e Silva et al. (2023). Os valores também se encontram dentro das faixas encontradas conforme o teor de finos por Silva (2017) para rejeitos e por Yang et al. (2006) que realizaram ensaios em compósitos de areias com finos não plásticos.

4.2 - CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA

São apresentados os resultados das caracterizações mineralógica e química dos materiais de análise.

4.2.1 - DRX

Os resultados dos ensaios de difração de raios X (DR-X) do coproduto bruto (C100), do resíduo de perlita bruto (P100) e do compósito coproduto–geopolímero (C70G30), moldado com 14% de umidade, densidade seca de 1,8 g/cm³ e submetido a 28 dias de cura, são apresentados na Fig. 4.2.

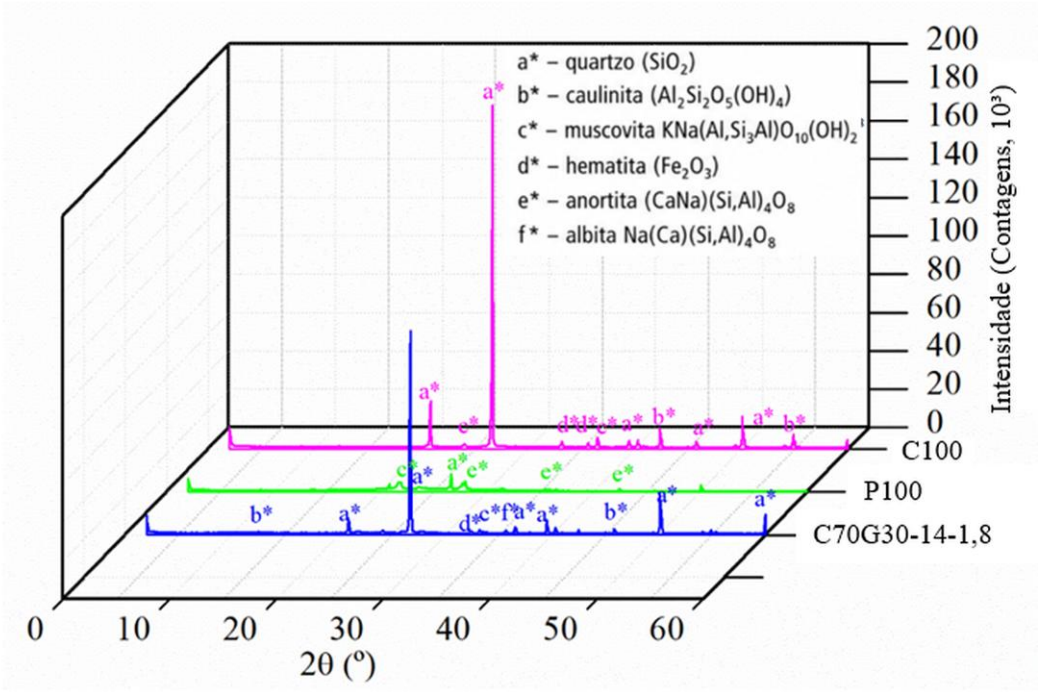


Figura 4.2 – Resultados da análise por difração de raios-x.

A análise mineralógica por difração de raios X evidenciou que o coproduto é composto predominantemente pelos minerais Quartzo, Hematita, Caulinita e Muscovita. A presença do Quartzo era esperada, uma vez que se trata de um dos minerais mais abundantes em solos e materiais granulares naturais, constituído essencialmente por sílica (SiO_2) e caracterizado por elevada dureza, em torno de 7 na escala de Mohs (KLEIN & DUTROW, 2012). A identificação da Hematita também se mostra coerente com a natureza do material, por se tratar de um coproduto de minério de ferro, sendo este óxido de ferro (Fe_2O_3) um dos principais minerais associados a rejeitos ferruginosos, apresentando dureza variando entre 5 e 6 (DEER et al., 2013). A presença de caulinita e muscovita confirma ainda a ocorrência de frações finas observadas nos ensaios granulométricos. A caulinita, argilomineral com composição química $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$, é frequentemente associada a partículas finas e processos de alteração mineralógica, enquanto a Muscovita, mica potássica de composição $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$, está relacionada à fração silto-argilosa dos materiais geotécnicos. Ambos os minerais apresentam baixos valores de dureza, geralmente entre 2 e 2,5 na escala de Mohs (MITCHELL & SOGA, 2005; KLEIN & DUTROW, 2012).

A amostra de resíduo de perlita apresentou quartzo, muscovita e anortita em sua composição mineralógica. A anortita é um mineral do grupo dos feldspatos com composição $CaAl_2Si_2O_8$ muito encontrado em rochas ígneas, o que corrobora com a origem do resíduo de

perlita, advindo de sedimentos de rochas vulcânicas. Possui um grau de dureza em torno de 6 a 6,5 (DEER et al., 2013).

O compósito coproduto-geopolímero apresentou em sua composição os minerais quartzo, hematita, caulinita, muscovita e albita. A albita também é um mineral do grupo dos feldspatos, com composição $NaAlSi_3O_8$, apresentando grau de dureza em torno de 6 a 6,5 (KLEIN & DUTROW, 2012; DEER et al., 2013). O aparecimento desse mineral no compósito pode estar associado à adição do resíduo de perlita na massa do corpo de prova e ao ganho de resistência e rigidez do novo material, uma vez que possui grau de dureza maior.

Além da identificação das fases minerais, os difratogramas evidenciaram a predominância de picos bem definidos, principalmente associados ao quartzo, indicando elevada cristalinidade dos materiais precursores e reduzida reatividade intrínseca do coproduto. No compósito, a ausência de novas fases cristalinas hidratadas típicas de ligantes cimentícios reforça que a estabilização ocorreu predominantemente por mecanismos geopoliméricos, com desenvolvimento de uma matriz ligante de natureza amorfa ou semicristalina. Esses resultados mostram-se coerentes com as análises químicas por ICP-OES e com as observações microestruturais, indicando a formação de uma estrutura híbrida composta por fases cristalinas herdadas dos materiais de origem e por uma matriz geopolimérica predominantemente amorfa.

4.2.2 - ANÁLISES QUÍMICAS DOS MATERIAIS (ICP-OES)

Os resultados das análises químicas por ICP-OES do coproduto bruto (C100), resíduo de perlita bruto (P100) e do compósito coproduto-geopolímero (C70G30) moldado com 14% de umidade, aos 28 dias de cura e densidade de 1,8 g/cm³, podem ser observados na Tab. 4.3.

Tabela 4.3 – Resumo dos resultados das análises químicas dos materiais utilizados na tese.

Material	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	Na_2O (%)	CaO (%)	K_2O (%)	MnO (%)	TiO_2 (%)	Outros (%)
C100	83,98	0,39	13,12	0,71	0,32	0,25	0,04	0,02	1,16
P100	73,54	11,63	2,77	3,82	1,33	2,17	0,07	0,47	4,20
C70G30	78,11	1,70	10,19	3,81	0,20	0,52	0,04	0,04	5,40

O coproduto de rejeito de minério de ferro é constituído predominantemente por sílica (83,98%) e óxido de ferro (13,12%), em concordância com a identificação mineralógica de quartzo (SiO_2) e hematita (Fe_2O_3). O quartzo é amplamente reportado como um dos principais constituintes de rejeitos de minério de ferro (Lin, 1997; Long et al., 2024; Pereira et al., 2006) e apresenta elevada dureza (7 na escala de Mohs), contribuindo essencialmente para a estrutura

granular do material. A presença de hematita era esperada em função da origem ferrífera do coproduto, apresentando dureza entre 5,5 e 6,5. O teor extremamente reduzido de Al_2O_3 (0,39%) evidencia a baixa reatividade aluminosilicática intrínseca do coproduto, o que explica seu comportamento predominantemente inerte quando empregado isoladamente. A identificação de fases secundárias como caulinita e muscovita, minerais argilosos e micáceos, respectivamente, é consistente com a fração fina observada nos ensaios granulométricos, ambos apresentando dureza relativamente baixa (2-2,5).

O resíduo de perlita apresenta composição típica de materiais aluminosilicáticos reativos, com 73,54% de SiO_2 e 11,63% de Al_2O_3, além de teores de Na_2O (3,82%), CaO (1,33%) e K_2O (2,17%). Essa composição é compatível com a presença de quartzo, muscovita e anortita [$(Ca,Na)(Si,Al)_4O_8$], um feldspato cálcico característico de rochas ígneas, com dureza entre 6 e 6,5 na escala de Mohs. A identificação dessa fase corrobora a origem vulcânica do resíduo de perlita, uma vez que feldspatos cálcicos são típicos de ambientes magmáticos. A presença significativa de alumina e óxidos alcalinos favorece a dissolução das fases aluminosilicáticas durante o processo de ativação alcalina, viabilizando a formação da matriz geopolimérica.

A composição química do compósito geopolimérico (C70G30) reflete a contribuição combinada dos materiais constituintes, resultando em teores intermediários de SiO_2 (78,11%) e Fe_2O_3 (10,19%), acompanhados por um aumento expressivo do teor de Al_2O_3 (1,70%) em relação ao coproduto bruto. Adicionalmente, os elevados teores de Na_2O (3,81%) e K_2O (0,52%) evidenciam a atuação dos ativadores alcalinos no sistema, essenciais para a formação dos géis geopoliméricos. Esses resultados são coerentes com a identificação mineralógica de albita [$(Na,Ca)(Si,Al)_4O_8$], um feldspato sódico não presente nos materiais originais, cuja formação é atribuída às reações entre o resíduo de perlita, o hidróxido de sódio e o coproduto durante a ativação alcalina.

Assim como a anortita, a albita apresenta elevada dureza (entre 6 e 6,5 na escala de Mohs), contribuindo para o aumento da rigidez e da resistência mecânica do compósito geopolimérico. A formação dessa nova fase cristalina indica que o processo de ativação alcalina promoveu não apenas a estabilização química do sistema, mas também o desenvolvimento de fases mineralógicas mais duras e estáveis, reforçando a matriz sólida do compósito. De forma integrada, os resultados de ICP-OES confirmam as análises mineralógicas e demonstram que o desempenho mecânico e a durabilidade superiores dos compósitos estão diretamente associados à introdução controlada de alumina e óxidos alcalinos, fundamentais para a efetiva geopolimerização e densificação microestrutural.

Finalmente, a Tab. 4.4 mostra os resultados obtidos das medições de pH do coproduto bruto e dos compósitos coproduto-geopolímero (C70G30) e areia-geopolímero (A70G30), moldados com 14% de umidade e densidade de 1,8 g/cm³ aos 28 dias de cura ao ar.

Tabela 4.4 – Resultados das medições do pH.

Amostra	pH (pHmetro) - média	pH (fitas) - média
C100	6,8	6,0
C70G30	12,2	12,0
A70G30	12,3	12,0

Os resultados de pH evidenciaram um contraste marcante entre o coproduto bruto e os compósitos estabilizados. O coproduto de rejeito de minério de ferro apresentou pH próximo da neutralidade (com valores entre 6,5 e 7,0 no pHmetro e 6,0 nas fitas), indicando um material sem alcalinidade significativa e, portanto, com baixa capacidade de induzir reações de dissolução/precipitação associadas à ativação alcalina.

Em contrapartida, os compósitos produto-geopolímero e areia-geopolímero, aos 28 dias, apresentaram pH fortemente alcalino, com média de 12,2 e 12,3 (pHmetro) e 12,0 (fitas), respectivamente. Esses valores são coerentes com a presença de ativadores alcalinos e com o ambiente químico necessário para a dissolução das fases alumino silicáticas e a formação e manutenção da matriz geopolimérica. A semelhança dos valores de pH entre os dois compósitos indica que, para a mesma dosagem e condição de cura, o pH foi controlado predominantemente pela composição do precursor e do ativador, e não pelo tipo de material granular empregado (rejeito ou areia).

Por fim, a boa concordância entre os valores obtidos por pHmetro e por fitas indicadoras confere confiabilidade aos resultados e reforça que o tratamento promoveu uma alteração química consistente do sistema, passando de um meio praticamente neutro para um meio altamente alcalino, compatível com o desempenho mecânico e a durabilidade dos ensaios.

4.2.3 - ANÁLISES QUÍMICAS DO LIXIVIADO

A Tab. 4.5 traz um resumo dos principais elementos encontrados nas amostras dos lixiviados coletados dos ensaios de permeabilidade. As análises químicas dos lixiviados permitem avaliar o potencial de liberação de elementos químicos a partir do coproduto bruto e dos compósitos tratados ao longo do tempo de cura, bem como sua conformidade com os limites estabelecidos pela legislação ambiental brasileira, em especial a Resolução CONAMA nº 430/2011, que dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, e, de forma complementar, a

Resolução CONAMA nº 357/2005, que classifica os corpos hídricos e define padrões de qualidade.

Tabela 4.5 – Resultados das análises químicas dos lixiviados.

Amostra	Al (mg/L)	Ca (mg/L)	Fe (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	P (mg/L)	Si (mg/L)
C100-14-1,8	0,144	0,335	0,589	0,197	0,052	4,337	0,023	0,398
C100-14-1,8	0,063	0,248	0,239	0,158	0,026	7,501	0,020	0,253
C70G30-14-1,8-7d	0,952	0,087	0,168	0,856	0,019	82,795	0,036	1,359
C70G30-14-1,8-14d	1,101	0,259	0,069	3,15	0,015	256,613	0,143	2,398
C70G30-14-1,8-28d	0,083	0,577	0,012	7,817	<ld	275,192	0,134	2,501
C70G30-14-1,8-56d	0,358	1,170	0,054	43,741	0,035	1401,906	0,518	5,586

De modo geral, observa-se que os lixiviados do coproduto bruto apresentaram baixas concentrações de elementos dissolvidos, com valores de Al (≤ 0,144 mg/L), Fe (≤ 0,589 mg/L) e Na (≤ 7,50 mg/L), caracterizando um material com baixo potencial de lixiviação. Esses valores encontram-se muito abaixo dos limites estabelecidos pela CONAMA 430/2011, que admite, por exemplo, concentrações de ferro total de até 15 mg/L em efluentes lançados em corpos receptores. Para alumínio, embora a CONAMA 430 não estabeleça limite específico, a CONAMA 357/2005 define valores máximos de 0,2 mg/L para águas doces de Classe 2; nesse contexto, os lixiviados do coproduto bruto atendem integralmente a esse critério.

Nos compósitos, observa-se um aumento significativo das concentrações de sódio (Na), potássio (K) e silício (Si), especialmente nas idades iniciais e intermediárias de cura, comportamento diretamente associado à presença dos ativadores alcalinos e à dissolução progressiva das fases alumino silicáticas durante o processo de geopolimerização. Aos 7 e 14 dias, o Na atingiu 82,8 mg/L e 256,6 mg/L, respectivamente, valores elevados quando comparados ao coproduto bruto, que apresentou concentrações entre 4,7 e 7,9 mg/L. Em termos relativos, as concentrações de sódio nos compósitos foram aproximadamente 14 vezes superiores às observadas no material bruto aos 7 dias e 43 vezes superiores aos 14 dias. Aos 28 e 56 dias, os valores atingiram 275,6 mg/L e 1402,3 mg/L, correspondendo a incrementos de cerca de 46 e 237 vezes em relação ao coproduto, respectivamente. Embora expressivos, esses valores não são regulados diretamente pela CONAMA nº 430/2011, que não estabelece limites para sódio e potássio em efluentes. Assim, o aumento das concentrações de Na é interpretado como um efeito esperado do processo de ativação alcalina, e não como indicativo de contaminação por metais potencialmente tóxicos.

Azevedo et al. (2017) observaram elevadas concentrações de sódio nas superfícies de geopolímeros ativados alcalinamente, atribuindo esse comportamento à migração de álcalis por

difusão e à presença de sódio não completamente incorporado à estrutura alumino silicática, fenômeno também associado à formação de eflorescências. Da mesma forma, nos resultados deste estudo, verificou-se a presença de sódio na matriz geopolimérica após 28 dias de cura, com teores atômicos variando entre 15,9 e 46,0%, enquanto a matéria-prima do precursor não apresentou sódio detectável por EDS. Tal resultado demonstra a influência direta dos ativadores alcalinos na composição química dos geopolímeros, promovendo a incorporação de espécies sódicas à estrutura do material. Dessa forma, as elevadas concentrações de Na observadas nos lixiviados dos compósitos são compatíveis com o mecanismo de geopolimerização e refletem a presença de espécies alcalinas residuais ou parcialmente incorporadas à matriz em formação.

O alumínio apresentou concentrações mais elevadas aos 7 e 14 dias (0,95 a 1,10 mg/L), superando o valor de referência de 0,2 mg/L da CONAMA 357/2005 (Classe 2). Contudo, aos 28 dias, a concentração de Al reduziu-se significativamente para 0,083 mg/L, permanecendo abaixo desse limite, indicando imobilização progressiva do alumínio na matriz geopolimérica com o avanço da cura. Esse comportamento sugere que a liberação inicial de Al está associada à dissolução das fases reativas, seguida de sua incorporação estrutural nos géis geopoliméricos (VAN JAARSVELD et al., 2002).

O ferro (Fe) apresentou concentrações muito baixas em todas as amostras tratadas, variando de 0,012 a 0,168 mg/L, valores amplamente inferiores aos limites estabelecidos pela CONAMA 430/2011 e pela CONAMA 357/2005, indicando elevada estabilidade das fases ferruginosas e baixo risco de lixiviação desse elemento.

Em relação ao fósforo (P), os valores observados nos compósitos tratados aumentaram com o tempo de cura, atingindo 0,518 mg/L aos 56 dias. Esse valor supera o limite típico de 0,1 a 0,15 mg/L adotado pela CONAMA 357/2005 para águas doces de Classe 2, associado ao controle da eutrofização. No entanto, cabe destacar que a CONAMA 430/2011 não estabelece limite direto para fósforo total em efluentes, e que esse comportamento pode estar relacionado à liberação gradual de fósforo presente nos insumos do sistema geopolimérico, devendo ser analisado em função do cenário de disposição ou reutilização do material.

O aumento progressivo das concentrações de Si, Na e K, especialmente aos 56 dias, indica que, embora haja estabilização mecânica e microestrutural, o sistema mantém um ambiente alcalino ativo, favorecendo a mobilidade desses elementos alcalinos e do silício em solução. Ainda assim, esses elementos não são classificados como contaminantes prioritários pela legislação ambiental vigente, diferentemente de metais pesados potencialmente tóxicos.

De forma integrada, os resultados demonstram que os compósitos tratados não apresentam lixiviação significativa de metais regulados, como ferro, manganês e alumínio (em idades mais

avançadas), atendendo aos principais critérios estabelecidos pela CONAMA 430/2011. As concentrações elevadas de Na e K refletem características intrínsecas do processo de geopolimerização e não configuram, por si só, restrição ambiental normativa. A redução das concentrações de Al e Fe com o tempo de cura reforça a interpretação de que o avanço da geopolimerização promove imobilização química progressiva, contribuindo para a estabilidade ambiental do material.

4.3 - COMPORTAMENTO MECÂNICO

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos realizados com o coproduto bruto e os compósitos geopoliméricos. As análises contemplam os ensaios de compactação, resistência à compressão simples, triaxiais monotônicos e triaxiais cíclicos, permitindo avaliar a influência do teor de geopolímero, das condições de moldagem e do tempo de cura no comportamento mecânico dos materiais.

4.3.1 - COMPACTAÇÃO

É possível observar por meio da Fig. 4.3 as curvas de compactação obtidas do coproduto de rejeito bruto (C100) e dos compósitos com 20% de geopolímero (C80G20) e 30% de geopolímero (C70G30), assim como os dados obtidos de massa específica seca máxima e de umidade ótima.

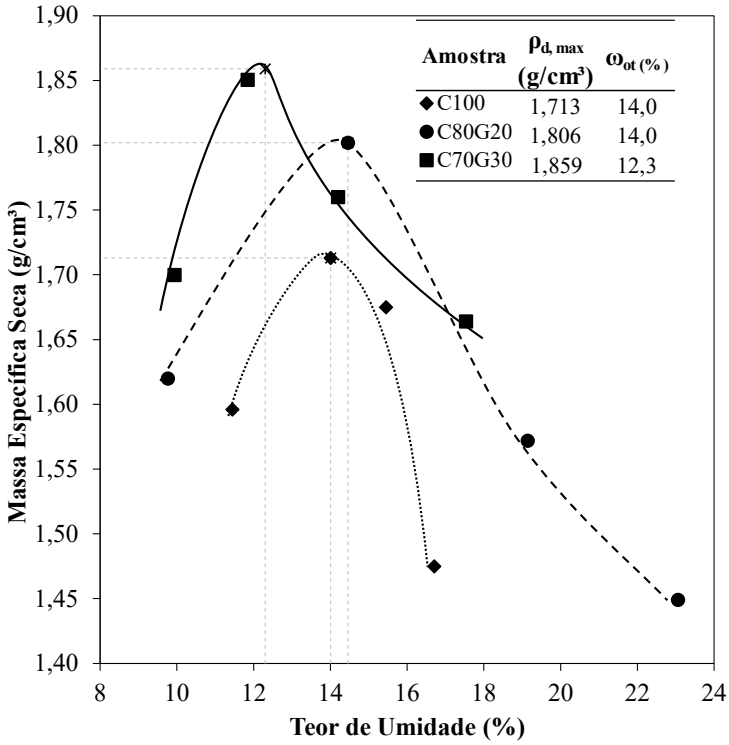


Figura 4.3 – Curvas de compactação do coproduto e compósitos coproduto-geopolímero.

Os resultados dos ensaios de compactação por Proctor Normal mostraram que as amostras de coproduto bruto e dos compósitos coproduto-geopolímero apresentaram massas específicas secas máximas em torno de 1,7 e 1,8 g/cm³ e umidades ótimas em torno de 12 e 14%, com um padrão percebido de acréscimo de massa específica e redução de umidade com o acréscimo de geopolímero. Vizcarra et al. (2025) encontraram valores de 1,6 g/cm³ de massa específica seca máxima e 18% de umidade ótima para o coproduto de rejeito de minério de ferro.

Ressalta-se que, embora o resíduo de perlita e a solução de NaOH apresentem isoladamente densidades mais baixas que o coproduto, a incorporação desses materiais por meio da reação de geopolimerização resultou em uma massa específica seca máxima maior nos compósitos. Isso ocorre porque a formação do gel geopolimérico promove um melhor rearranjo das partículas, reduzindo a quantidade de vazios e aumentando a densidade da matriz. Além disso, a reação alcalina entre a sílica e a alumina presentes no resíduo de perlita gera produtos cimentantes (géis N-A-S-H e C-A-S-H), que preenchem os poros, conferindo maior coesão e compactação ao material.

4.3.2 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

Os resultados de tensão *versus* deformação axial dos ensaios de resistência à compressão não confinada (RCNC) dos compósitos coproduto-geopolímero C80G20 e C70G30 podem ser observados conforme a Fig. 4.4. Ressalta-se que foram consideradas densidades de 1,7 e 1,8 g/cm³ e umidades de moldagem de 12% e 14% e período de cura de 7 (Fig. 4.4a), 14 (Fig. 4.4b), 28 (Fig. 4.4c) e 56 dias (Fig. 4.4d).

Por questões de clareza e melhor visualização dos gráficos, os resultados do coproduto bruto referentes à condição de moldagem com teor de umidade de 14% e massa específica seca máxima de 1,8 g/cm³ não foram apresentados juntamente aos dos compósitos. De modo geral, o coproduto bruto apresentou baixas tensões de ruptura (com média de 14,29 kPa), com curvas mais alongadas e picos pouco definidos, atingidos apenas em elevadas deformações axiais (com média de 4,28%), o que caracteriza um material pouco coeso e predominantemente deformável. Cabe ressaltar que todos os ensaios de resistência à compressão não confinada foram realizados sem a imersão em água por 24 h previamente à ruptura. Essa condição foi adotada em função do comportamento do coproduto bruto que, devido à sua natureza granular e baixa coesão, apresentaria desintegração quando submetido à imersão, impossibilitando a determinação da resistência mecânica nessa condição.

A obtenção da resistência à compressão não confinada em coprodutos e rejeitos brutos é extremamente difícil devido a este comportamento do material, pouco coesivo. No presente estudo, a obtenção de valores de resistência à compressão não confinada do coproduto bruto só foi possível em função da substituição da célula de carga convencional por uma célula de 1 kN, de maior resolução e sensibilidade, capaz de registrar adequadamente esforços de baixa magnitude. Apesar dessa dificuldade experimental, a literatura indica que rejeitos de minério de ferro em estado bruto apresentam valores de resistência à compressão não confinada igualmente reduzidos, situando-se na ordem de grandeza de dezenas a poucas centenas de quilopascais, de 44,9 kPa por Fontes et al. (2024), 70 kPa por Barati et al. (2020) e 300 kPa por Oliveira et al. (2019).

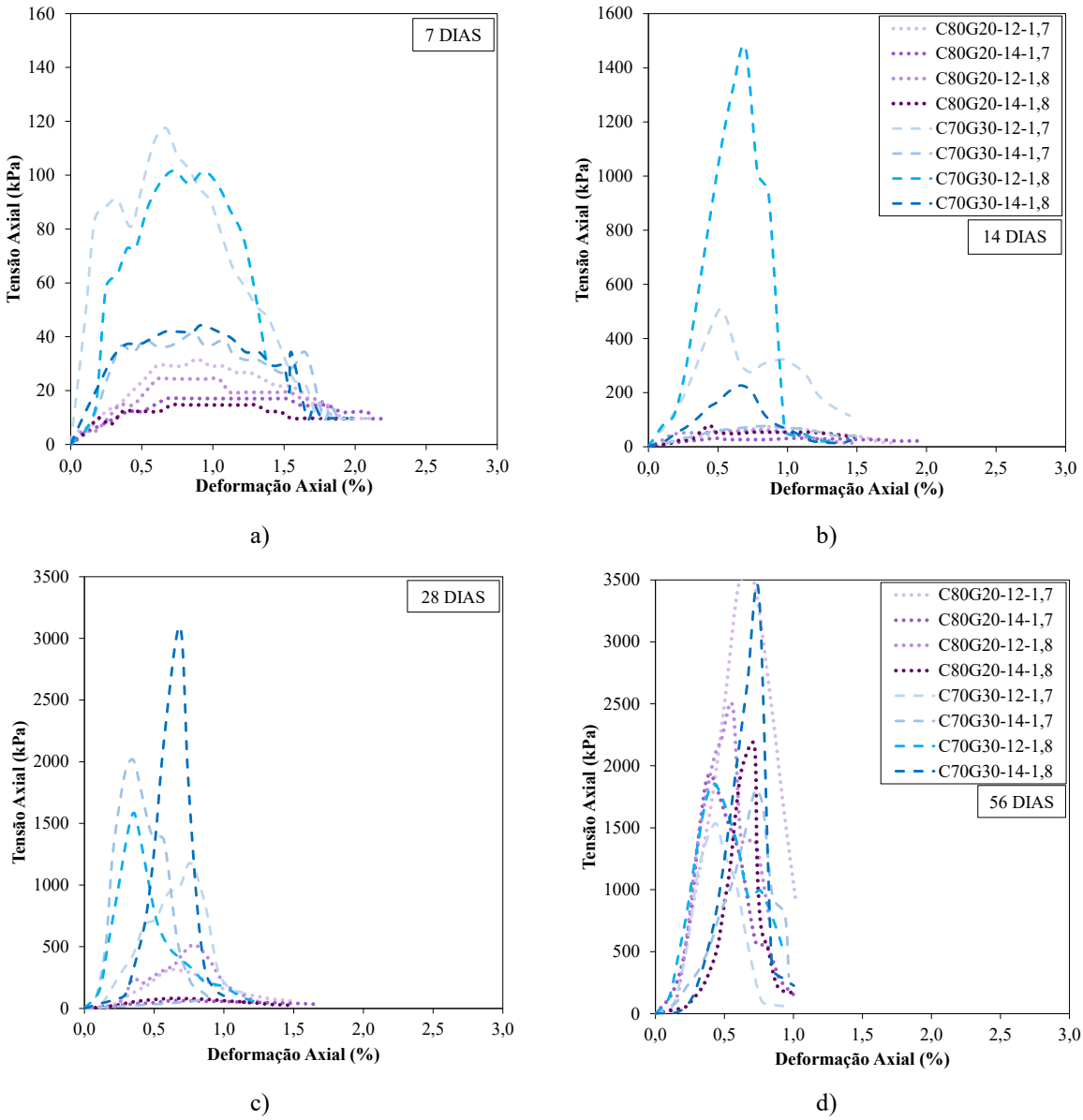


Figura 4.4 - Resistência à compressão não confinada dos compósitos coproduto-geopolímero em função do período de cura ao ar de: a) 7; b) 14; c) 28 e d) 56 dias.

A inclusão do geopolímero na massa seca de coproduto promoveu um aumento expressivo da resistência mecânica já aos 7 dias de cura ao ar, quando comparado ao coproduto de rejeito bruto, variando tensões de pico entre 14,71 e 117,43 kPa e deformações axiais na ruptura entre 0,61 e 0,92%, evidenciando uma redução significativa da deformabilidade e o início do enrijecimento estrutural do material. Esse comportamento frágil, caracterizado por baixa deformabilidade e perda abrupta de resistência após o pico, é amplamente reportado para geopolímeros e materiais ativados alcalinamente (Hardjito & Rangan, 2005;Zhang & Ma, 2020; Turan et al., 2022; Ameen et al., 2023; Fattahi et al., 2025), nos quais a resistência é controlada pela coesão induzida pela matriz geopolimérica e não apenas pelo atrito interparticular, sendo fortemente controlada pela microestrutura do geopolímero (DUXTON et a., 2007).

Aos 14 dias de cura, os compósitos com 20% de geopolímero apresentaram RCS variando entre 31,77 kPa e 78,93 kPa, enquanto aqueles com 30% atingiram valores significativamente superiores, chegando a 507,43 kPa e, no caso do compósito moldado com massa específica seca de 1,8 g/cm³ e 12% de umidade, a 1471,61 kPa. Esse efeito tornou-se ainda mais pronunciado aos 28 dias, quando os compósitos com 20% de geopolímero atingiram resistências entre 63,90 e 514,18 kPa, enquanto os compósitos com 30% alcançaram valores elevados, variando de 1176,47 kPa até 3093,36 kPa, evidenciando a intensificação das reações de geopolimerização e a formação de uma microestrutura mais contínua e densa.

O tempo de cura ao ar exerceu influência significativa no ganho de resistência. Aos 56 dias, observou-se um aumento expressivo da RCS em todas as amostras, com valores máximos da ordem de 3482,69 kPa para os compósitos com 20% de geopolímero e até 3378,41 kPa para os compósitos com 30%, confirmando a consolidação progressiva da matriz geopolimérica ao longo do tempo. Em todas as idades, a ruptura ocorreu associada a baixas deformações axiais, predominantemente entre 0,35% e 0,75%, reforçando o caráter frágil e cimentado do material estabilizado.

A massa específica seca apresentou influência relevante no desempenho mecânico dos compósitos, uma vez que aqueles moldados com 1,8 g/cm³ tenderam a apresentar resistências superiores aos moldados com 1,7 g/cm³, sobretudo nas idades intermediárias e avançadas. Esse comportamento está associado à redução do índice de vazios e ao melhor contato entre as partículas e a matriz geopolimérica, favorecendo a transferência de tensões e, por consequência, as propriedades mecânicas. O estudo de Chen et al. (2022) visou a análise da estrutura de poros de geopolímeros e confirmou o papel determinante da distribuição e do volume de poros na resistência mecânica desses materiais.

A umidade de moldagem, quando comparada ao teor de geopolímero e à massa específica seca, mostrou-se importante para o desenvolvimento da resistência ao longo do tempo. Observou-se que, em diversas combinações, os compósitos moldados com 14% de umidade apresentaram incrementos significativos de RCS nas idades mais avançadas, como aos 28 e 56 dias, atingindo valores superiores a 3000 kPa, o que indica que a maior disponibilidade de água favoreceu a continuidade das reações de geopolimerização e a formação de uma matriz mais densa e eficiente.

Esse efeito está associado ao papel da água como meio para a dissolução, mobilização e difusão dos precursores de sílica e alumina, permitindo a formação progressiva dos géis N-A-S-H e C-A-S-H ao longo do tempo de cura. A umidade inicial também reduz a limitação causada pela perda precoce de água durante a cura ao ar, favorecendo uma polimerização mais completa e a reorganização da rede geopolimérica. Vu et al. (2020) demonstraram que o tempo inicial de cura e a disponibilidade de água promovem a polimerização e reações secundárias de hidratação, além de intensificar a formação de N-A-S-H e fases zeolíticas, o que resulta em uma microestrutura mais densa e em ganhos progressivos de resistência à compressão.

Na Fig. 4.5 são apresentados os gráficos de Tensão Axial *versus* Deformação Axial dos compósitos 70% areia + 30% geopolímero para os tempos de cura ao ar de 7 dias (Fig. 4.5a), 14 dias (Fig. 4.5b), 28 dias (Fig. 4.5c) e 56 dias (Fig. 4.5d). Os resultados de RCNC dos compósitos areia-geopolímero A80G20 e A70G30 evidenciaram um comportamento mecânico mais rígido e resistente do que aquele observado nos compósitos coproduto-geopolímero, com ganho de resistência mais rápido e respostas mais homogêneas ao longo do tempo de cura.

De modo geral, todas as misturas areia-geopolímero apresentaram picos de tensão bem definidos e ruptura associada a baixas deformações axiais (predominantemente <2%), caracterizando um comportamento típico de materiais fortemente cimentados e de natureza frágil, coerente com a elevada rigidez da areia e com a eficiência da matriz geopolimérica em promover a ligação entre os grãos.

Aos 7 dias de cura, já se observam resistências elevadas (de 554,58 a 929,58 kPa), significativamente superiores às obtidas para o coproduto estabilizado com o mesmo teor de geopolímero e idade de cura. Enquanto nas misturas com coproduto os valores iniciais de RCNC, embora elevados, ainda apresentavam maior dispersão, os compósitos areia-geopolímero demonstram um ganho de resistência mais rápido e consistente, indicando uma interação mais eficiente entre o geopolímero e a matriz granular da areia.

Com 14 dias de cura, ocorreu um aumento expressivo da resistência, com picos de tensão de 1053,52 a 1582,64 kPa, superando, de forma geral, os valores observados para o

coproduto-geopolímero na mesma idade. Esse resultado sugere que a areia, por apresentar granulometria mais uniforme e menor variabilidade mineralógica, favorece a formação de uma microestrutura geopolimérica mais contínua e homogênea.

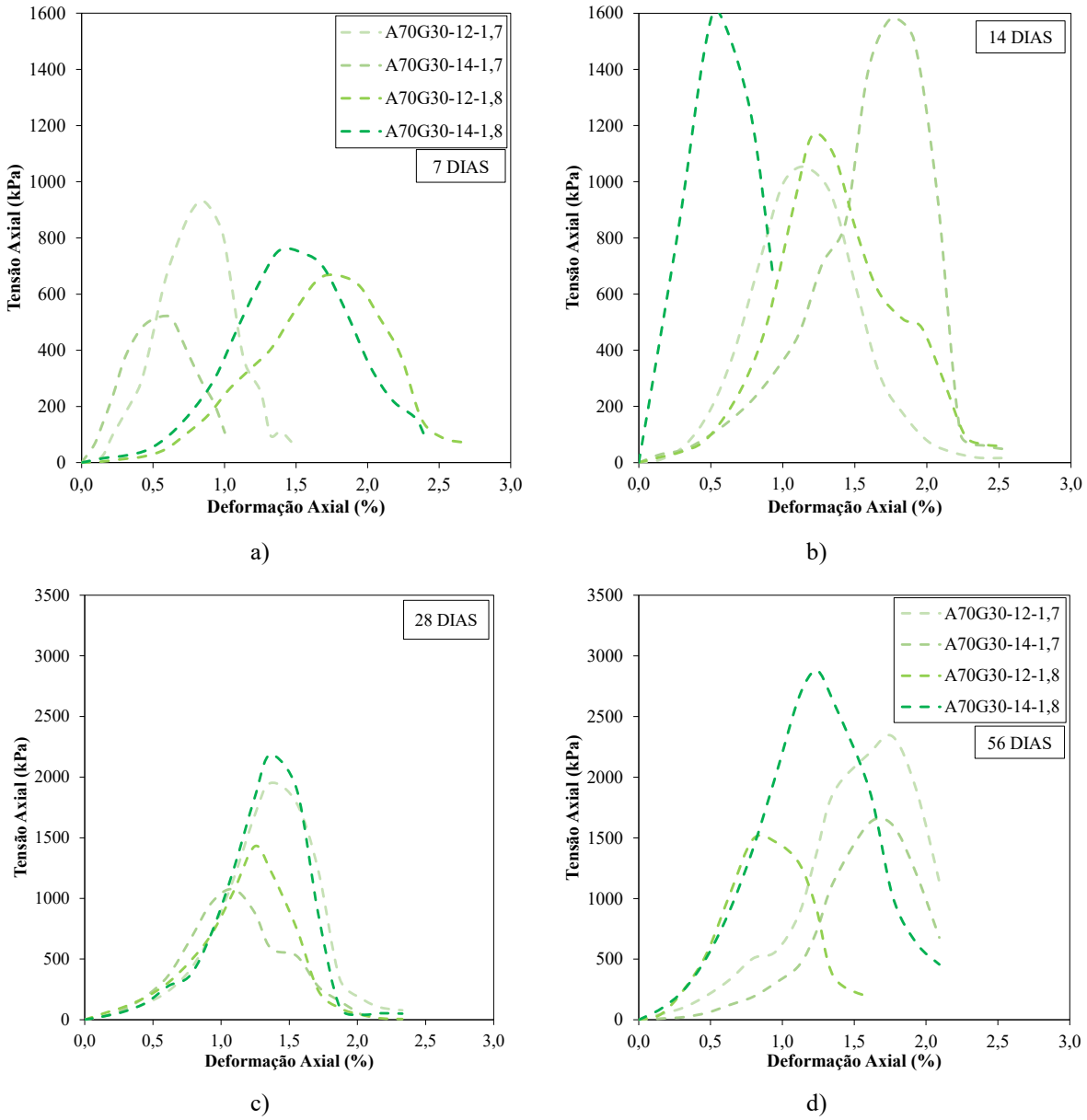


Figura 4.5 - Resistência à compressão não confinada dos compósitos areia-geopolímero em função do período de cura ao ar de: a) 7; b) 14; c) 28 e d) 56 dias.

Aos 28 dias, os compósitos atingem resistências ainda mais elevadas, com valores que ultrapassam 2000 kPa (máximo de 2187,22 kPa), evidenciando a consolidação da matriz cimentante. Em comparação, as misturas com coproduto também apresentaram ganhos relevantes nessa idade, porém, em média, com resistência inferiores, o que pode ser associado

à maior heterogeneidade do coproduto e à presença de vazios ou interfaces menos eficientes entre partículas e agente.

Nos 56 dias de cura, os resultados obtiveram pico máximo de 2880,9 kPa, confirmando a maturação da matriz geopolimérica. Em relação ao coproduto-geopolímero, embora este também apresente ganhos contínuos até essa idade, o compósito areia-geopolímero demonstra um desempenho mecânico mais robusto e consistente, com maiores tensões máximas e menor dispersão entre as curvas.

A influência da massa específica seca permanece evidente, sendo que as amostras moldadas com 1,8 g/cm³ apresentam, de modo geral, resistências superiores às moldadas com 1,7 g/cm³, tanto para areia-geopolímero quanto para coproduto-geopolímero. A umidade de moldagem (12% e 14%) exerce influência secundária, mas ainda perceptível, sobretudo nas idades mais avançadas, indicando que valores maiores de umidade de moldagem contribuem para a otimização das reações de geopolimerização.

Em síntese, o compósito areia-geopolímero apresenta comportamento mecânico superior ao do coproduto-geopolímero, com maiores valores de RCNC, ganho de resistência mais rápido e comportamento mais homogêneo ao longo do tempo de cura. Embora o coproduto apresente elevado teor de SiO_2 (cerca de 84%), altos teores de sílica não implicam, necessariamente, maior potencial de geopolimerização, uma vez que esse processo depende principalmente da disponibilidade de sílica reativa (sílica ativa), e não do teor total de SiO_2. Grande parte da sílica presente em materiais minerais encontra-se frequentemente em fases cristalinas, como o quartzo, que apresentam baixa solubilidade e reduzida reatividade em meio alcalino, limitando sua participação nas reações de dissolução e policondensação responsáveis pela formação dos géis geopoliméricos (DAVIDOVITS, 2013; PROVIS & VAN DEVENTER, 2009; SNELLINGS, 2016). Além disso, a areia tende a proporcionar melhor empacotamento granular e maior eficiência na transferência de tensões, favorecendo o desenvolvimento de um compósito mais homogêneo e resistente. Assim, embora o coproduto estabilizado apresente elevado potencial de reaproveitamento geotécnico, a matriz arenosa proporciona maior capacidade resistente e amplia as possibilidades de aplicação em elementos que demandam elevados níveis de resistência mecânica.

As tensões axiais de pico em função do tempo de cura ao ar, bem como a umidade de moldagem em função do tempo de cura, estão expressas na Fig. 4.6, sendo os resultados referentes aos compósitos coproduto-geopolímero apresentados nas Fig. 4.6a e 4.6b, e aos compósitos areia-geopolímero nas Fig. 4.6c e 4.6d.

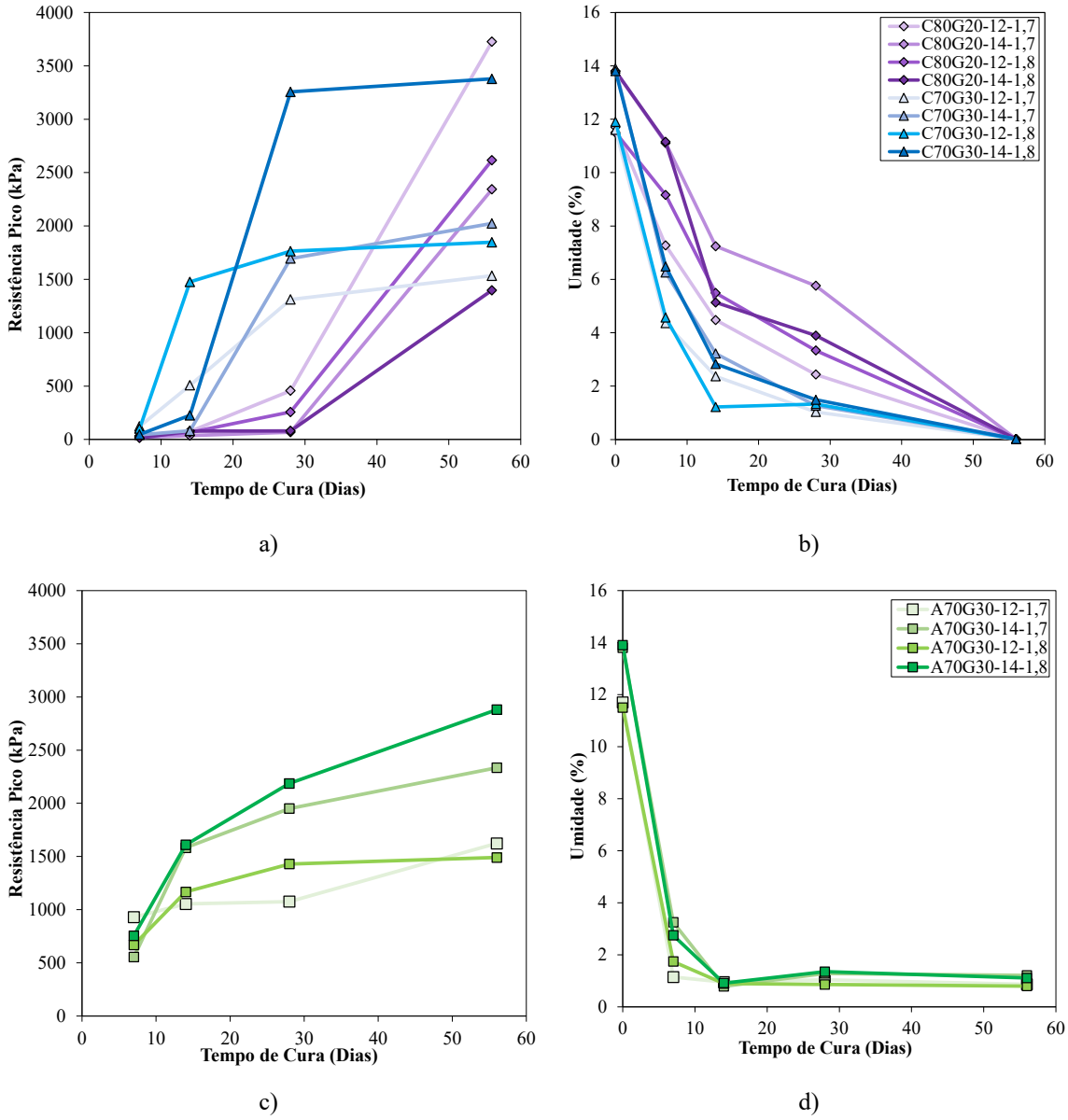


Figura 4.6 – Resultados de RCNC: a) Resistência pico *versus* Tempo de cura ao ar dos compósitos coproduto-geopolímero; b) Umidade *versus* Tempo de cura dos compósitos coproduto-geopolímero; c) Resistência pico *versus* Tempo de cura dos compósitos areia-geopolímero e d) Umidade *versus* Tempo de cura ao ar dos compósitos areia-geopolímero.

Os resultados obtidos demonstraram uma relação clara entre a evolução da resistência à compressão não confinada e a redução da umidade ao longo dos períodos de cura ao ar de 7, 14, 28 e 56 dias, tanto para os compósitos coproduto-geopolímero quanto para os compósitos areia-geopolímero.

No caso do coproduto, observou-se que o material estabilizado apresentou valores de resistência significativamente superiores aos do coproduto bruto, sobretudo após 28 dias de cura, coincidindo com reduções mais acentuadas da umidade. Essa correlação confirma o mecanismo descrito por Davidovits (1991), segundo o qual a água desempenha papel fundamental nas etapas iniciais da geopolimerização, atuando como meio para a dissolução das

fases aluminosilicáticas, a mobilização dos íons silicato e aluminato e a formação dos monômeros ortossialatos, que posteriormente se organizam por policondensação em uma rede tridimensional de ligações Si-O-Al. Segundo o autor, a geopolimerização é um processo exotérmico no qual a água não é incorporada de forma permanente à estrutura final, mas é progressivamente liberada à medida que a rede polimérica se consolida, acompanhando a formação de oligômeros (dímeros e trímeros) e, posteriormente, de uma macroestrutura tridimensional contínua. Assim, a diminuição da água disponível ao longo da cura está diretamente associada ao avanço das reações de geopolimerização, refletindo a densificação e consolidação da matriz ligante, com consequente ganho de resistência mecânica observado nas idades mais avançadas.

Nos compósitos fabricados com areia, verifica-se igualmente o aumento progressivo da resistência à medida que a umidade decresce, porém com valores inferiores de resistência aos obtidos com o coproduto estabilizado, refletindo a natureza predominantemente inerte da areia, que atua mais como agregado do que como participante ativo das reações químicas. Ainda assim, a tendência de correlação entre secagem e ganho de resistência se mantém, confirmando que o consumo da água na reação é determinante para o desenvolvimento da matriz geopolimérica.

Cabe destacar que, de acordo com os resultados de umidade, a maioria das amostras já se encontrava praticamente seca aos 14 dias de cura, apresentando valores residuais muito próximos da estabilização. Esse comportamento indica que o processo de perda de água livre ocorre de forma rápida nas primeiras duas semanas, sendo seguido por uma fase de estabilização em que a umidade remanescente é mínima e pouco variável. Do ponto de vista técnico, tal condição sugere que a maior parte da água disponível para reação ou evaporação é consumida precocemente, de modo que os ganhos de resistência observados após 28 e 56 dias decorrem predominantemente da continuidade das reações de polimerização e da reorganização estrutural da matriz, e não mais da redução significativa do teor de umidade.

A Fig. 4.7 reúne os resultados de resistência à compressão simples e das deformações axiais correspondentes aos picos de tensão obtidos para o coproduto de rejeito bruto e os compósitos coproduto-geopolímero.

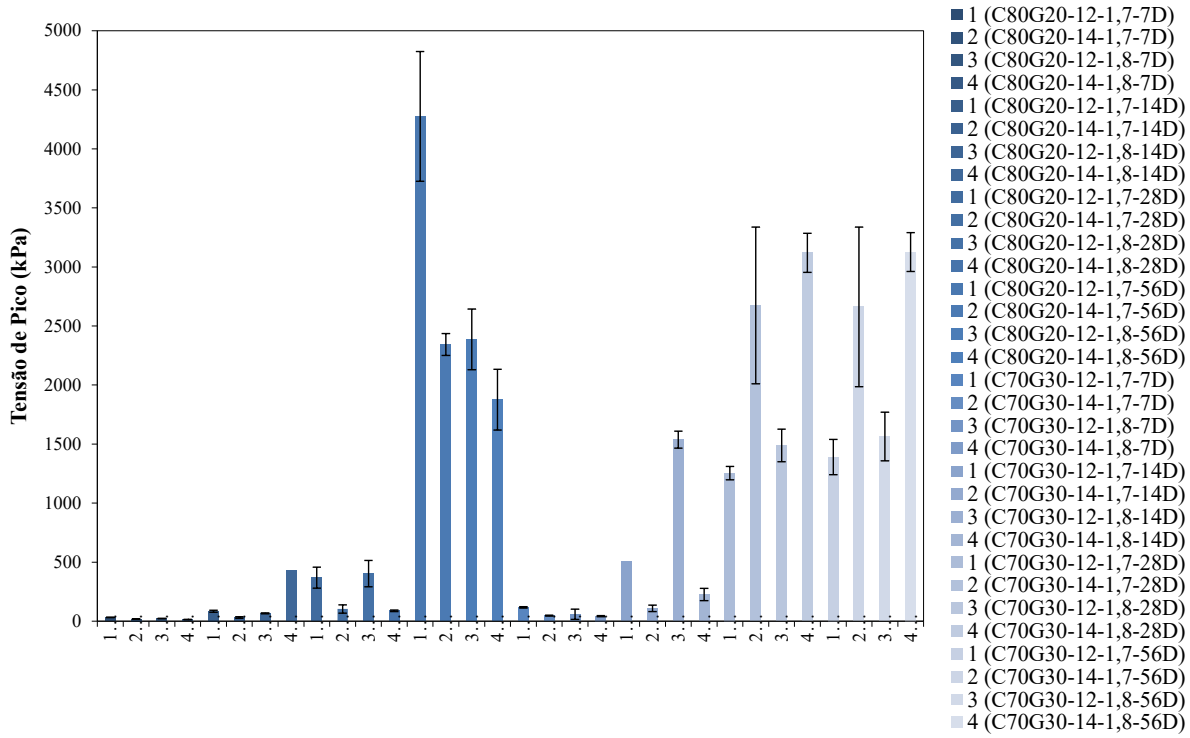


Figura 4.7 – Tensões de pico dos compósitos coproduto-geopolímero.

Na Fig. 4.8 é possível observar os resultados de tensão de pico para os compósitos areia-geopolímero.

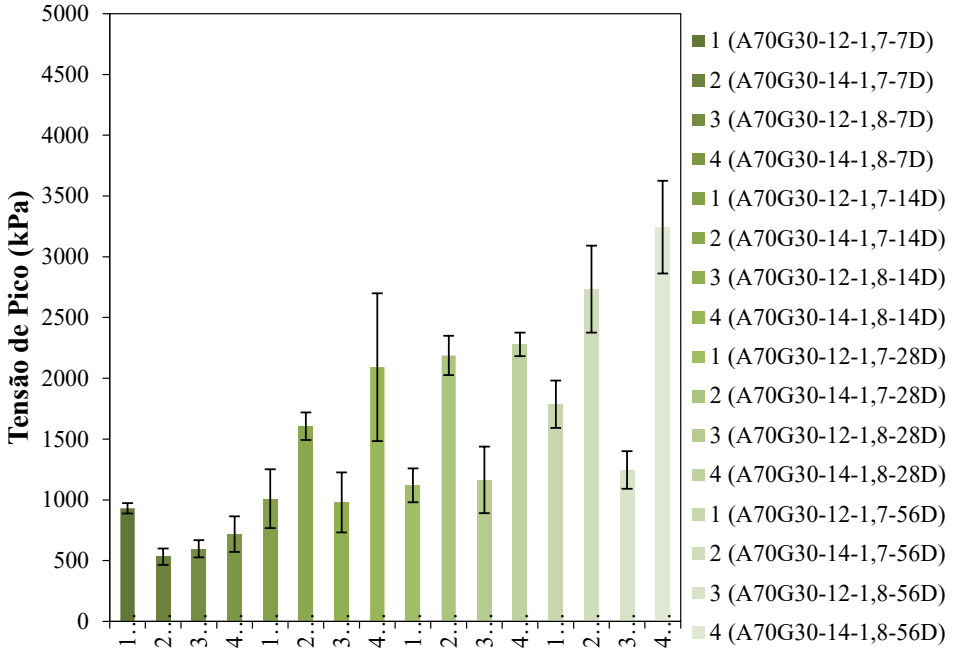


Figura 4.8 – Tensões de pico dos compósitos areia-geopolímero.

Os planos de ruptura formados após os ensaios de resistência à compressão não confinada dos corpos de prova dos compósitos coproduto-geopolímero estão dispostos na Fig. 4.9. Não foi possível registrar a ruptura da amostra de coproduto bruta por apresentar ruptura abrupta acompanhada de desagregação e esfarelamento do material, evidenciando seu caráter pouco coesivo, o que inviabilizou a identificação de um plano de falha bem definido.

A partir da Fig. 4.9 permite-se identificar padrões consistentes de comportamento mecânico e modos de ruptura dos compósitos submetidos aos ensaios de RCNC. De modo geral, observam-se rupturas predominantemente por fissuras longitudinais (também conhecido por fendilhamento axial), De modo geral, observam-se rupturas predominantemente por fissuras longitudinais, caracterizadas pelo desenvolvimento de trincas paralelas ao eixo de carregamento, padrão típico de materiais cimentados submetidos à compressão não confinada ZHANG et al., 2023). No estudo de Zhang et al. (2023), geopolímeros submetidos à compressão axial apresentaram superfícies de fratura com destacamento em flocos e fragmentação lamelar, comportamento observado nos corpos de prova desta pesquisa, o que foi interpretado pelos autores como indicativo de cimentação e geopolimerização eficazes.

Nos compósitos moldados com menor teor de geopolímero e menores tempos de cura, nota-se uma ruptura mais irregular, com desagregação parcial na base e nas bordas, sugerindo uma matriz ainda pouco consolidada. Esse comportamento é mais evidente nos estágios iniciais de cura, nos quais o processo de geopolimerização ainda não se encontra plenamente desenvolvido, resultando em menor coesão interna.

À medida que o tempo de cura aumenta (28 e 56 dias), as imagens revelam amostras com maior integridade geométrica após a ruptura, fissuras mais contínuas e menos fragmentação, o que é indicativo de uma matriz geopolimérica mais densa, homogênea e eficiente (ZHANG & MA, 2020; SILVA (2020); UMAR et al., 2023). Esse efeito é particularmente pronunciado nos compósitos moldados com maior umidade, nos quais a disponibilidade adicional de água favoreceu a continuidade das reações geopoliméricas ao longo do tempo, reduzindo a perda precoce de água durante a cura ao ar.

A massa específica seca mais elevada (1,8 g/cm³) também se refletiu visualmente em rupturas mais definidas e menor esfarelamento, corroborando a redução do índice de vazios e o melhor contato entre as partículas. Em contraste, amostras moldadas com menor densidade apresentaram maior incidência de fragmentação localizada, especialmente nas regiões inferiores.



Figura 4.9 – Ruptura dos compósitos coproduto-geopolímero em cura de: a) 7; b) 14; c) 28 e d) 56 dias.

Em síntese, as imagens corroboram os resultados quantitativos de resistência, evidenciando que maiores teores de geopolímero, maiores tempos de cura, maior massa específica seca e maior umidade de moldagem conduz à formação de compósitos mais coesivos, com rupturas mais controladas e maior comportamento mecânico. Entretanto, o aumento da rigidez associado a essas condições tende a conferir maior fragilidade ao material, resultando em rupturas abruptas e predominantemente frágeis, o que pode representar uma limitação do ponto de vista da segurança estrutural em aplicações práticas. Uma alternativa frequentemente adotada na literatura para mitigar esse efeito é a incorporação de fibras, materiais com elevada resistência à tração que promovem uma conexão entre as fissuras, dissipação de energia e maior tenacidade do compósito. Ressalta-se, contudo, que a adição de fibras não foi contemplada no escopo desta tese.

Portanto, concluiu-se que os compósitos com 30% de geopolímero, 1,8 g/cm³ de massa específica seca e 14% de umidade de moldagem mostraram-se mais consistentes e tecnicamente significativos. Assim, definiu-se essas condições experimentais na execução dos ensaios posteriores.

A Figs. 4.10a a 4.10d mostram, respectivamente, as curvas de RCS *versus* $\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}}$ para os tempos de cura de 7, 14, 28 e 56 dias. Vê-se que foi possível obter uma correlação entre a resistência não confinada e o teor volumétrico de agente cimentante, especialmente nas curvas com 14 e 28 dias de cura, que foram as que apresentaram maiores coeficientes de correlação.

Observou-se também uma tendência inversa entre a RCNC e o parâmetro, indicando que a redução da relação entre índice de vazios e volume efetivo do favorece aumentos significativos na resistência dos compósitos. Esse comportamento confirma que a resistência também depende da eficiência do arranjo microestrutural formado entre partículas e matriz geopolimérica.

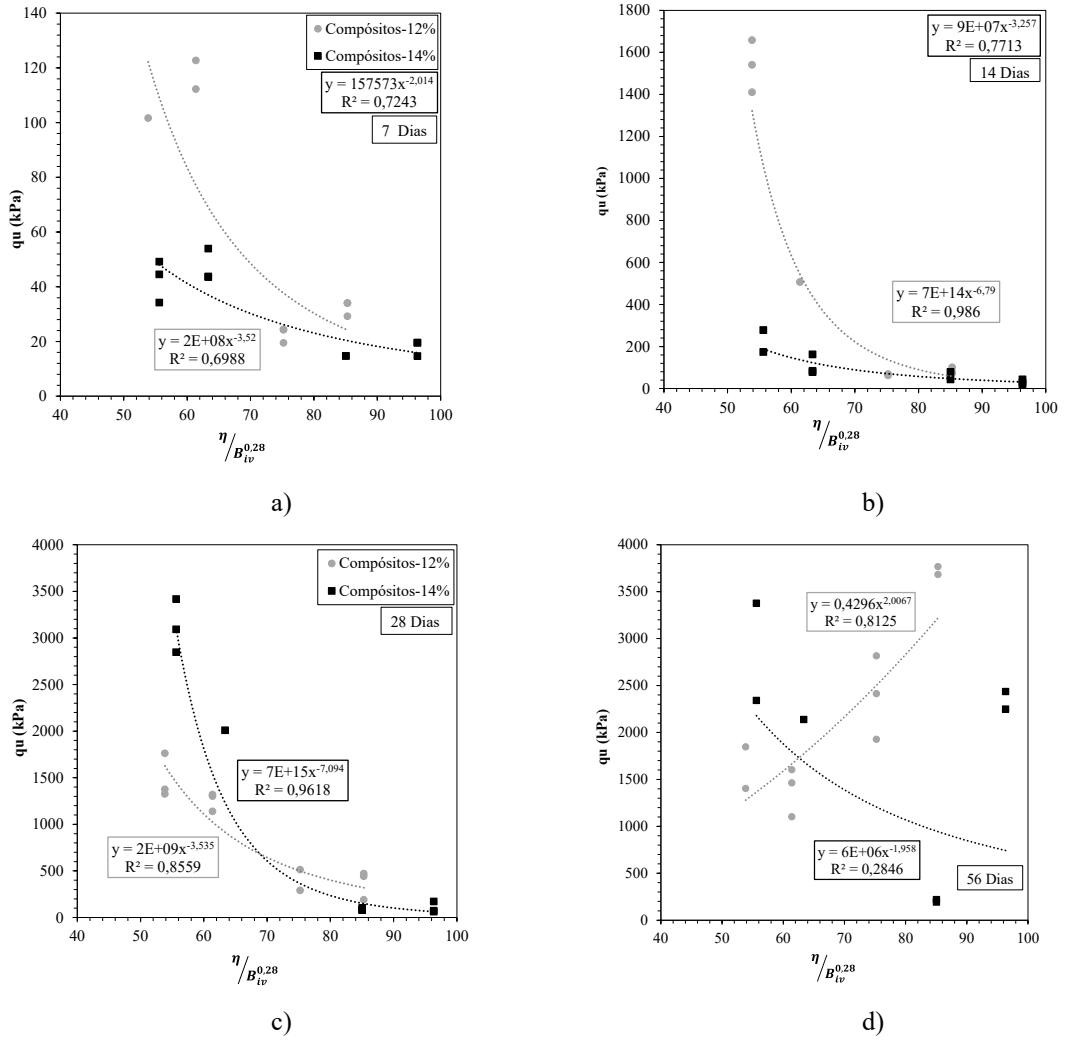


Figura 4.10 - Relação da RCNC com o parâmetro Porosidade/ Teor de agente cimentante para os compósitos coproduto-geopolímero em cura de: a) 7; b) 14; c) 28 e d) 56 dias.

Para os compósitos com 56 dias de cura, não foi observada uma tendência única entre a resistência à compressão não confinada e o índice $\eta/Biv^{0,28}$. Embora uma das regressões tenha apresentado coeficiente de determinação relativamente elevado ($R^2 = 0,81$), a tendência obtida foi inversa à observada nas demais idades, indicando aumento da resistência com o aumento do parâmetro. Esse comportamento sugere que, em idades mais avançadas de cura, a resistência mecânica deixa de ser governada predominantemente pela relação entre porosidade e teor volumétrico de agente cimentante, passando a ser influenciada pela evolução da matriz geopolimérica, com a continuidade das reações de geopolimerização, o fortalecimento das ligações interpartículas e a reorganização microestrutural do compósito. Além disso, as elevadas resistências obtidas em uma faixa relativamente estreita de valores de $\eta/Biv^{0,28}$, associadas à maior dispersão experimental, dificultaram a definição de uma tendência consistente. Assim, a relação $\eta/Biv^{0,28}$ mostrou-se insuficiente para descrever isoladamente o comportamento dos compósitos aos 56 dias, indicando a necessidade de análises complementares para compreender os mecanismos responsáveis pela evolução da resistência ao longo da cura.

Os tratamentos estatísticos para a ANOVA são apresentados na Tab. A.1, incluída no APÊNDICE A, para os quais inseriu-se no modelo o valor das tréplicas realizadas nos ensaios. O código utilizado no software está contido no APÊNDICE B.

Na Tab. 4.6 são apresentados os resultados da ANOVA, considerando interações de quarta ordem. Os fatores avaliados foram representados por A (teor de geopolímero), B (tempo de cura), C (massa específica seca) e D (teor de umidade de moldagem).A ANOVA indicou que os fatores de controle teor de geopolímero e tempo de cura, exerceram influência estatisticamente significativa sobre a RCNC a um nível de significância de 0,01 ($p < 0,001$), sendo o tempo de cura o fator de maior relevância, com valor de F igual a 234,76. Em contrapartida, a massa específica e a umidade não apresentaram efeito principal significativo quando analisadas isoladamente ($p > 0,05$).

Apesar da ausência de efeito principal significativo para densidade e umidade, diversas interações envolvendo esses fatores foram estatisticamente significativas. Destacam-se as interações Teor × Cura (AB), Teor × Densidade (AC), Cura × Densidade (BC), Teor × Umidade (AD) e Cura × Umidade (BD) ($p < 0,001$), além das interações de terceira ordem Teor × Cura × Densidade (ABC) e Teor × Cura × Umidade (ABD). Por outro lado, a interação Densidade × Umidade (CD) não foi significativa, indicando que esses fatores, quando considerados conjuntamente e na ausência dos fatores predominantes, não exerceram influência relevante sobre a resistência. De modo geral, esses resultados sugerem que a massa específica e a umidade

não controlam diretamente a RCNC, mas podem modificar a intensidade dos efeitos promovidos pelo teor de geopolímero e pelo tempo de cura, os quais se configuram como as principais variáveis responsáveis pelo ganho de resistência dos compósitos geopoliméricos.

Tabela 4.6 – Tabela ANOVA para os compósitos coproduto-geopolímero com interações de quarta ordem.

Fatores	GL	Soma dos Quadrados (SQ)	Quadrados Médios (QM)	F	Pr(>F)	p-valor
A	1	4685949,8	4685949,8	44,9	$1,77\ 10^{-08}$	<0,001
B	3	73532102,5	24510700,8	234,8	$1,90\ 10^{-29}$	<0,001
C	1	173722,3	173722,3	1,7	$2,00\ 10^{-1}$	0,203
D	1	1,6	1,6	0,0	$9,97\ 10^{-1}$	0,997
AB	3	17057034,2	5685678,1	54,5	$8,88\ 10^{-16}$	<0,001
AC	1	3264284,4	3264284,4	31,3	$9,37\ 10^{-07}$	<0,001
BC	3	2128202,9	709401,0	6,8	$6,24\ 10^{-04}$	<0,001
AD	1	4887803,8	4887803,8	46,8	$1,06\ 10^{-08}$	<0,001
BD	3	2566799,6	855599,9	8,2	$1,55\ 10^{-04}$	<0,001
CD	1	21763,7	21763,7	0,2	$6,49\ 10^{-1}$	0,65
ABC	3	2343843,4	781281,1	7,5	$3,12\ 10^{-04}$	<0,001
ABD	3	9783406,0	3261135,3	31,2	$1,61\ 10^{-11}$	<0,001
ACD	1	278495,4	278495,4	2,7	$1,09\ 10^{-1}$	0,109
BCD	3	820738,1	273579,4	2,6	$6,09\ 10^{-2}$	0,061
ABCD	3	570311,4	190103,8	1,8	$1,55\ 10^{-1}$	0,155
Residual	50	5220373,5	104407,5	-	-	-

A Tab. 4.7 apresenta a comparação entre os modelos ANOVA considerando interações de segunda, terceira e quarta ordem.. O modelo de quarta ordem apresentou um menor valor da soma dos quadrados dos resíduos e maior R^2, indicando que é um melhor modelo da variabilidade dos dados correspondentes aos compósitos coproduto-geopolímero.

Tabela 4.7 – Comparação entre os modelos ANOVA considerando os efeitos de segunda, terceira e quarta ordem.

Modelo	GL	Soma dos Quadrados dos Resíduos (SSR)	R^2	R^2 Ajustado
Segunda ordem	63	19.017.168	0,8507	0,808
Terceira ordem	53	5.790.685	0,9545	0,9305
Quarta ordem	50	5.220.373	0,9590	0,9336

Observa-se que o modelo de segunda ordem apresentou R^2 de 0,85, indicando que aproximadamente 85,1% da variabilidade da RCNC foi explicada pelos fatores avaliados e suas interações de segunda ordem. A inclusão das interações de terceira ordem elevou o R^2 para 0,95, representando um ganho expressivo na capacidade explicativa do modelo, além de reduzir significativamente a Soma dos Quadrados dos Resíduos (SSR), de 19.017.168 para 5.790.685.

A inclusão da interação de quarta ordem resultou em um aumento discreto do coeficiente de determinação, passando para 0,96, acompanhado de uma redução do SSR para 5.220.373. Entretanto, o ganho obtido em relação ao modelo de terceira ordem foi relativamente pequeno, indicando que a maior parcela da variabilidade dos dados já havia sido capturada pelas interações de terceira ordem.

Por fim, para melhor visualização dos fatores significativos e das interações, é apresentado o gráfico de Pareto (ver Fig. 4.11).

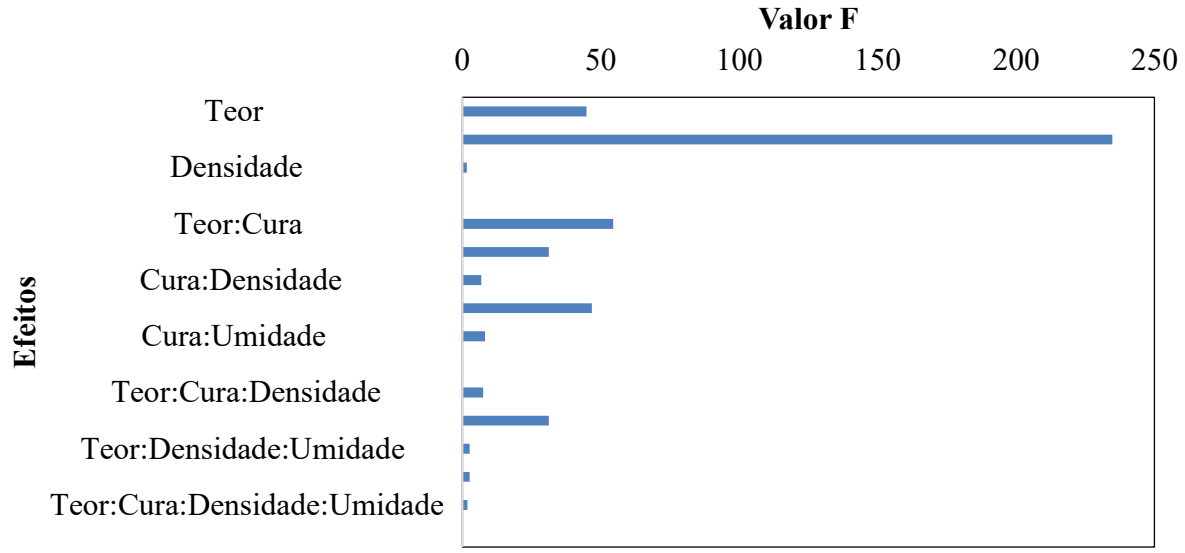


Figura 4.11 – Gráfico de Pareto.

Previamente à aplicação da ANOVA, foram avaliadas as premissas de normalidade e homogeneidade das variâncias dos resíduos por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Breusch-Pagan, respectivamente. O teste de Shapiro-Wilk resultou em $W = 0,819$ e $p < 0,001$, indicando rejeição da hipótese nula de normalidade dos resíduos. De forma semelhante, o teste de Breusch-Pagan apresentou $\chi^2 = 210,30$ e $p < 0,001$, evidenciando a presença de heterocedasticidade. Esses resultados sugerem que os resíduos não atenderam integralmente às premissas clássicas da ANOVA.

Com o objetivo de verificar a possibilidade de adequação dos dados às premissas estatísticas, foi realizada uma transformação logarítmica da variável resposta. Embora tenha sido observada melhora na aderência à normalidade, com aumento da estatística de Shapiro-Wilk de 0,819 para 0,930, a hipótese de normalidade continuou sendo rejeitada ($p < 0,05$). Adicionalmente, a heterocedasticidade permaneceu presente após a transformação, conforme indicado pelo teste de Breusch-Pagan. Dessa forma, a transformação não promoveu alterações substanciais na estrutura estatística dos dados nem modificou as conclusões obtidas para os efeitos dos fatores avaliados.

Optou-se, portanto, por manter as análises utilizando os valores originais de RCNC, preservando a interpretação física dos resultados. Essa decisão é respaldada pela robustez da análise de variância frente a desvios moderados das premissas de normalidade e homocedasticidade em delineamentos experimentais balanceados. No presente estudo, o delineamento experimental foi composto por fatores balanceados, com número semelhante de observações por tratamento e elevada magnitude dos efeitos observados. Além disso, o modelo ajustado apresentou elevado coeficiente de determinação ajustado ($R^2 = 0{,}934$).

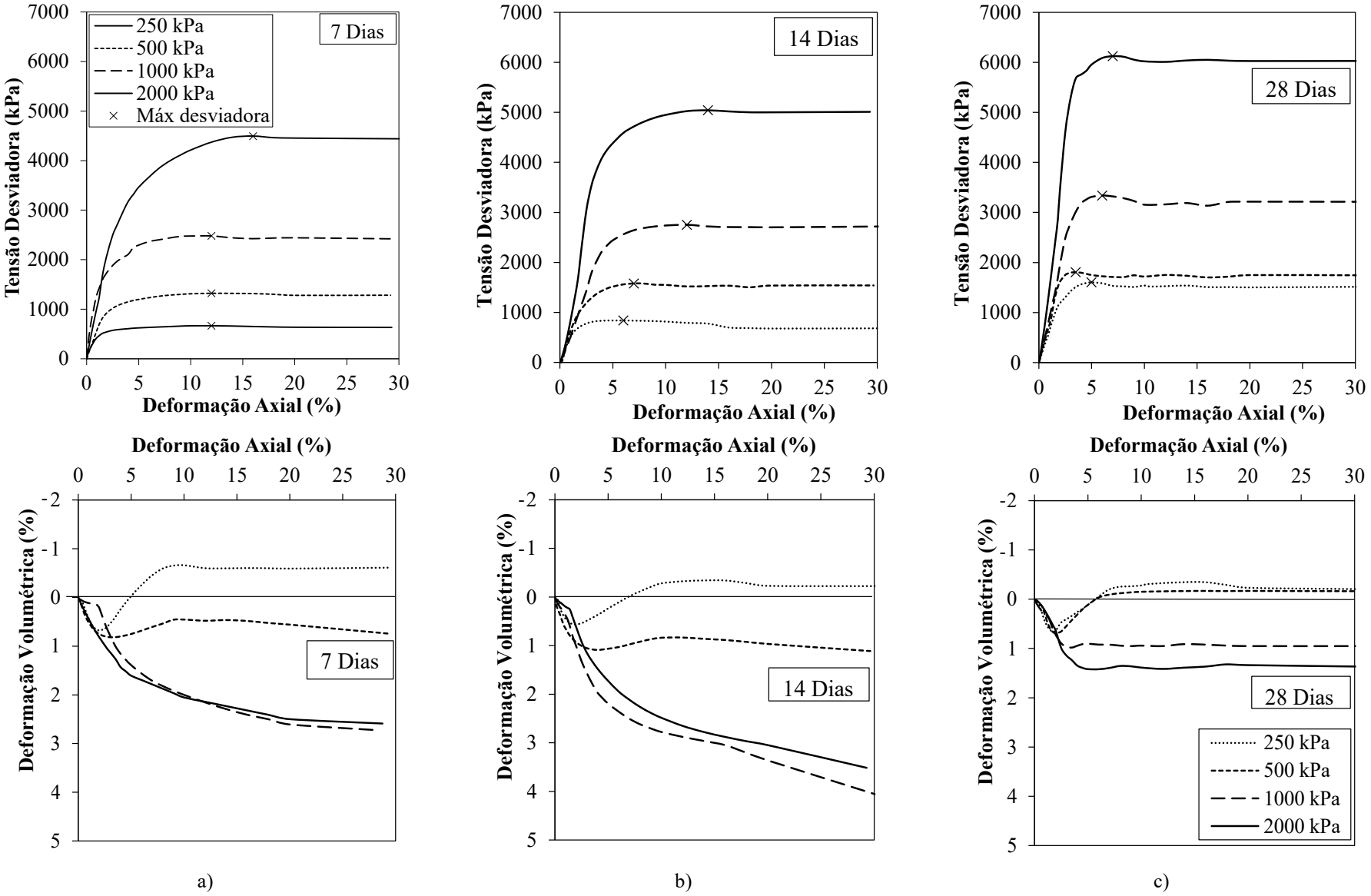
Cabe destacar ainda que a variável resposta apresentou ampla faixa de variação, com resistências variando de valores inferiores a 20 kPa até valores superiores a 5000 kPa. Esse comportamento reflete a forte influência exercida pelo teor de geopolímero e pelo tempo de cura sobre o desenvolvimento da resistência mecânica, aspectos amplamente reconhecidos na literatura de materiais geopoliméricos (PROVIS & VAN DEVENTER, 2009). Em geopolímeros, pequenas alterações na composição e nas condições de cura podem resultar em diferenças expressivas de desempenho mecânico, produzindo elevada variabilidade entre tratamentos com características distintas.

Adicionalmente, a ANOVA foi mantida mesmo diante dos desvios observados nas premissas estatísticas, considerando a reconhecida robustez dos testes F em delineamentos balanceados e com número semelhante de observações por tratamento (MONTGOMERY, 2019). O elevado coeficiente de determinação ajustado obtido para o modelo ($R^2 = 0{,}934$) reforça a elevada capacidade explicativa dos fatores experimentais avaliados.

4.3.3 - COMPORTAMENTO MECÂNICO DRENADO E NÃO DRENADO

Os resultados dos ensaios triaxiais CID (Consolidado Isotropicamente Drenado) em termos de Tensão Desviadora *versus* Deformação Axial e de Deformação Volumétrica *versus* Deformação Axial são apresentados na Fig. 4.12.

Os resultados evidenciaram um aumento progressivo das tensões desviadoras máximas com o acréscimo do tempo de cura ao ar, à exceção do compósito curado por 7 dias. Nessa condição (Fig. 4.12a), as tensões desviadoras mobilizadas, embora superiores às do coproduto bruto, permaneceram relativamente inferiores às observadas para idades mais avançadas, atingindo aproximadamente 932 kPa, 1471 kPa, 2313 kPa e 3301 kPa sob tensões confinantes de 250, 500, 1000 e 2000 kPa, respectivamente.


7 Dias
14 Dias
28 Dias
250 kPa
500 kPa
1000 kPa
2000 kPa
Máx desviadora
Tensão Desviadora (kPa)
Deformação Axial (%)
Deformação Volumétrica (%)
a)
b)
c)

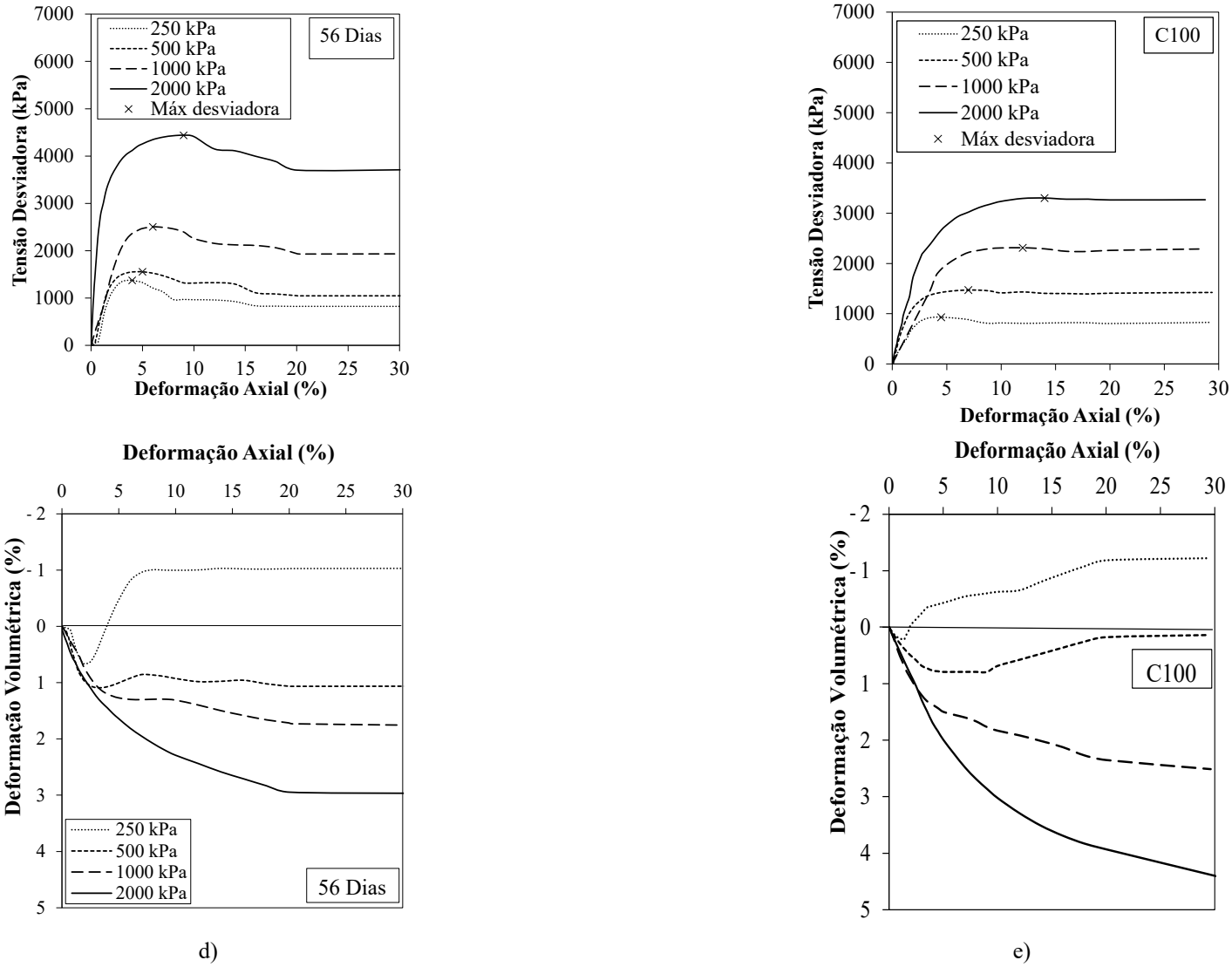


Figura 4.12 – Gráfico Tensão Desviadora versus Deformação Axial e Deformação Volumétrica versus Deformação Axial dos Ensaios Triaxiais CID para o coproduto bruto e compósito C70G30: a) C70G30 - 7 dias; b) C70G30 - 14 dias; c) C70G30 - 28 dias d) C70G30 - 56 dias e e) C100-14-1,8 – 0 dias.

Esse comportamento indica que o período inicial de cura ainda é insuficiente para a completa estabilização do coproduto, uma vez que os processos de hidratação e as reações pozolânicas ainda se encontram em andamento, resultando em uma matriz com elevado teor de água livre e poros ainda não preenchidos, o que reduz a rigidez e limita a capacidade de transferência de esforços entre os grãos (DUXSON et al., 2005; PROVIS & VAN DEVENTER, 2009). Considerando que os geopolímeros são materiais amorfos ou semicristalinos, o processo de cura influencia diretamente a organização da rede geopolimérica e a estrutura de poros, de modo que, com o avanço da cura, ocorre o refinamento da estrutura porosa e o aumento progressivo da resistência mecânica (CHEN et al., 2022).

Com 14 dias de cura (Fig.4.12b), os ganhos tornaram-se mais expressivos, com tensões desviadoras na ruptura de 839 kPa, 1578 kPa, 2751 kPa e 5041 kPa para pressões confinantes de 250, 500, 1000 e 2000 kPa, respectivamente, mobilizadas em deformações axiais de 6 a 14%. Esse comportamento indicou maior rigidez e maior eficiência da matriz geopolimérica na transferência de esforços.

Os maiores valores de resistência foram observados aos 28 dias de cura (Fig. 4.12c), quando as tensões desviadoras atingiram 1605 kPa, 1804 kPa, 3338 kPa e 6122 kPa sob 250, 500, 1000 e 2000 kPa, respectivamente. Nessa condição, a ruptura ocorreu em baixas deformações axiais, tipicamente entre 4 e 7%, caracterizando um material mais rígido, estruturado e com comportamento típico de material cimentado.

Para os compósitos com 56 dias de cura (Fig. 4.12d), as tensões desviadoras na ruptura foram de 1373 kPa, 1555 kPa, 2503 kPa e 4439 kPa para pressões confinantes de 250, 500, 1000 e 2000 kPa, respectivamente, com deformações axiais variando entre 4 e 9%. Embora esses valores sejam ligeiramente inferiores aos observados aos 28 dias, especialmente sob maiores confinamentos, mantiveram-se significativamente superiores aos do coproduto bruto e às idades iniciais de cura. Esse comportamento sugere uma estabilização do ganho resistente, possivelmente associada à redistribuição interna de tensões e ao desenvolvimento de microfissuras na matriz geopolimérica, sem perda significativa da rigidez global.

Observou-se nos compósitos que os picos são mobilizados em deslocamentos reduzidos, tipicamente entre 2 e 4% sendo seguidos por uma redução progressiva da resistência até um patamar residual ainda elevado, sobretudo sob maiores tensões normais. O comportamento pós-pico indica a atuação combinada de dois mecanismos distintos: (i) a ruptura da fase cimentante geopolimérica, responsável pela queda inicial da resistência após o pico, e (ii) a mobilização da resistência residual friccional, que passa a controlar a resposta em grandes deslocamentos, conforme observado em materiais cimentados e estabilizados (GHADIR et al., 2021;

ALELVAN, 2022). A estabilização das curvas em níveis elevados de tensão cisalhante após o pico reforça que, mesmo com a degradação localizada da cimentação, permanece uma contribuição significativa do atrito e do intertravamento granular, conferindo ao material capacidade resistente residual relevante.

De forma geral, verificou-se que o incremento das tensões confinantes resultou em maiores valores de tensão desviadora, comportamento característico de materiais cimentados ou em processo de ganho de resistência. Esse efeito está associado à maior restrição à deformação lateral imposta pelo confinamento, o que retarda o surgimento e a propagação de microfissuras no interior da matriz sólida e favorece a atuação dos produtos cimentantes formados durante a cura, promovendo ligações intergranulares mais resistentes e aumentando a capacidade do material de suportar esforços de cisalhamento (GANESAN et al., 2014). Esse comportamento de dependência do confinamento sobre o estado de tensão é consistente com observações experimentais de resposta ao cisalhamento com variação de σ_3, em que a tensão desviadora mobilizada aumenta com o aumento do confinamento, refletindo a maior capacidade resistente do material sob maior restrição estrutural (DUAN et al., 2024).

Adicionalmente, observou-se uma tendência de redução das deformações na ruptura com o aumento do tempo de cura, atribuída ao incremento da rigidez dos compósitos. Uma matriz mais rígida é particularmente vantajosa, pois proporciona uma estrutura mais robusta, capaz de suportar níveis mais elevados de tensão sem ocorrência imediata de falhas ou deformações excessivas, favorecendo a absorção e a dissipação de energia em regime resistente (PYEON ET AL., 2022; SALZMANN, 2002). Entretanto, à medida que a rigidez aumenta, ocorre uma redução da capacidade de deformação do material. O desenvolvimento das ligações cimentantes restringe o rearranjo das partículas durante o carregamento, promovendo uma transição de um comportamento predominantemente dúctil para uma resposta com amolecimento pós-pico mais pronunciado. Kasama et al. (2000) observaram que o aumento da cimentação em argilas tratadas resultou na evolução do comportamento tensão-deformação de *strain hardening* para *strain softening* (pós-pico), evidenciando o desenvolvimento de uma estrutura mais rígida e suscetível à concentração das deformações durante a ruptura.

Esse comportamento é típico de materiais cimentados: quanto mais avançado o processo de cura, maior a resistência e a rigidez, mas também mais frágil é a resposta na ruptura, em comparação a estados mais iniciais em que o material, menos rígido, apresenta maior ductilidade. Assim, os resultados confirmam que o tempo de cura exerce papel fundamental no desenvolvimento das propriedades mecânicas do material, não apenas pela elevação da resistência, mas também pela modificação do comportamento de deformação. O aumento das

tensões desviadoras e da ductilidade evidencia o avanço do processo de estabilização, caracterizado pelo aumento da coesão entre os grãos e da durabilidade do coproduto tratado.

De forma geral, os resultados de deformação volumétrica revelaram um comportamento dilatante dos materiais até tensões confinantes de 500 kPa, provavelmente devido ao rearranjo das partículas sob baixos níveis de confinamento, o que provoca um aumento de volume. Por outro lado, quando tensões mais elevadas são aplicadas, o material torna-se mais confinado, mais compacto, e a compressão volumétrica passa a predominar.

Para o coproduto bruto e os compósitos, o comportamento volumétrico foi predominantemente contráctil sob maiores tensões confinantes, enquanto sob baixo confinamento (250 kPa) observou-se tendência à dilatância, com valores próximos de 1%. Aos 7 dias, os compósitos apresentaram resposta semelhante ao material bruto, indicando desenvolvimento ainda incipiente da matriz geopolimérica, com dilatância limitada entre aproximadamente 0,5 e 1%. A partir de 14 dias, tornou-se evidente o efeito da estabilização, com redução progressiva das deformações contrácteis, atingindo cerca de 1% sob 500 kPa, e maior ocorrência de dilatância sob baixos confinamentos. Aos 28 dias, verificou-se o comportamento mais estável, com contrações reduzidas para aproximadamente 1 a 1,5% mesmo sob 1000 a 2000 kPa, indicando menor tendência à menor tendência à redução volumétrica durante o cisalhamento e maior intertravamento estrutural. Aos 56 dias, embora a matriz geopolimérica estivesse consolidada, o confinamento elevado ainda exerceu influência significativa, mantendo a contração como mecanismo dominante sob maiores tensões, alcançando cerca de 2 a 3% sob 1000 e 2000 kPa.

É importante destacar que o processo de estabilização com geopolímero e o tempo de cura resultam em uma tendência geral de redução tanto da dilatância em baixos confinamentos quanto da compressão em altos confinamentos. Devido ao aumento de rigidez, a capacidade do material de absorver energia sem sofrer mudanças volumétricas significativas é aprimorada. O comportamento tensão-dilatância em solos cimentados tem sido amplamente discutido por diversos autores como um fenômeno fortemente influenciado pelo cisalhamento em baixos níveis de tensão (AVERSA et al., 1993; COOP & ATKINSON, 1994; CUCCOVILLO & COOP, 1999; LEROUEIL & VAUGHAN, 1990; SILVA et al., 2024; WAGNER et al., 2023). Silva et al. (2024) e Wagner et al. (2023) observaram que amostras mais soltas exibiram um comportamento dúctil acompanhado de resposta contrátil, enquanto amostras mais densas tenderam a apresentar comportamento dilatante. Barden et al. (1969) evidenciaram que esse comportamento também é característico de solos granulares, os quais tendem a mobilizar maiores resistências e apresentar respostas mais rígidas, frequentemente associadas à dilatância,

sob baixos níveis de confinamento e a respostas volumétricas mais restritas e até contrácteis sob tensões normais elevadas. Cuccovillo e Coop (1999) explicaram ainda, com base em considerações de balanço de energia, que a dilatância pode ser restringida pelo travamento dos grãos e pela presença persistente de cimentação interparticular. Após o ponto de escoamento, essa cimentação começa a se romper, levando à dilatância máxima.

A Fig. 4.13 apresenta as trajetórias de tensão obtidas para o coproduto puro e compósitos na condição drenada. Cabe ressaltar que no ensaio drenado não há geração de poropressão, dessa forma as trajetórias totais e efetivas são coincidentes.

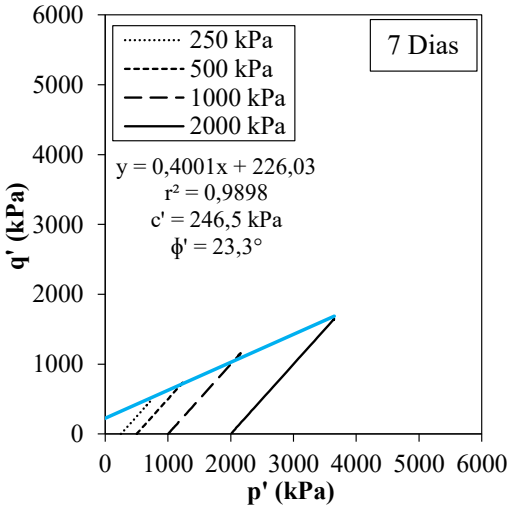
Para o coproduto bruto (Fig. 4.13e), as trajetórias de tensão mostraram comportamento típico de material predominantemente friccional, com envoltória de ruptura linear passando na origem, isto é, ausência de intercepto coesivo. Esse resultado indica que a resistência foi governada essencialmente pelo atrito intergranular, sem contribuição relevante de ligações cimentantes.

No compósito com 7 dias de cura (Fig. 4.13a), observou-se o surgimento de um intercepto coesivo (246,5 kPa) na envoltória de ruptura. Esse comportamento evidencia o início do desenvolvimento da matriz geopolimérica, com ganho de coesão, embora ainda associado a uma inclinação inferior à do coproduto bruto, indicando que o processo de estabilização se encontrava em estágio inicial.

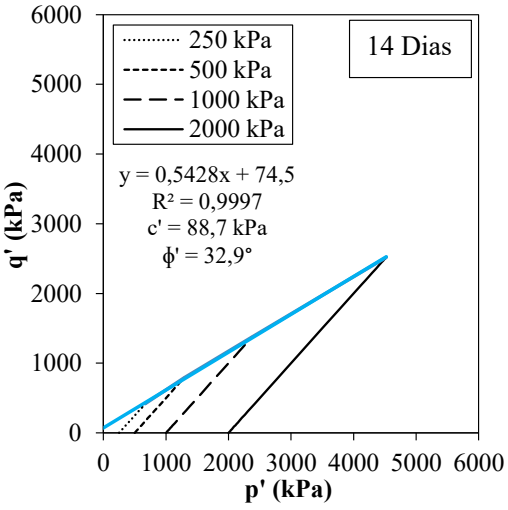
Com 14 e 28 dias de cura (Fig. 4.13b e Fig. 4.13c, respectivamente), a envoltória apresentou aumento simultâneo do intercepto coesivo e da inclinação, indicando maior contribuição conjunta da coesão e do atrito, o que reflete um avanço mais consistente das reações de geopolimerização e da integração estrutural entre os grãos do coproduto.

No compósito com 56 dias de cura (Fig. 4.13d), a envoltória manteve intercepto coesivo elevado, porém com inclinação ligeiramente inferior à observada aos 28 dias. Esse resultado sugere que, embora a coesão permaneça significativa, ocorrem ajustes microestruturais na matriz geopolimérica ao longo do tempo, que podem levar a uma redistribuição das contribuições entre os mecanismos coesivos e friccionais.

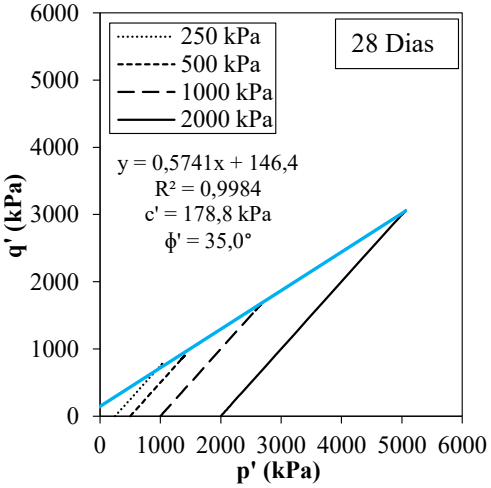
Nos tempos de cura mais avançados (14, 28 e 56 dias), o intercepto coesivo permaneceu elevado e crescente (entre 89 e 228 kPa), indicando a consolidação e maturação da matriz geopolimérica. Paralelamente, o ângulo de atrito manteve-se em valores moderados (entre 28 e 35°), caracterizando um comportamento híbrido coesivo-friccional, no qual a resistência ao cisalhamento resulta da combinação entre a matriz ligante geopolimérica e o esqueleto granular.



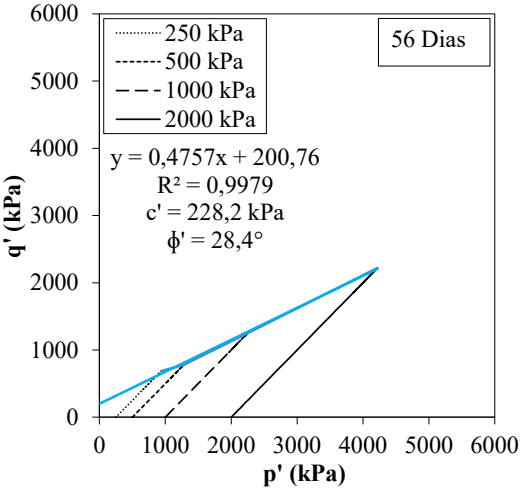
a)



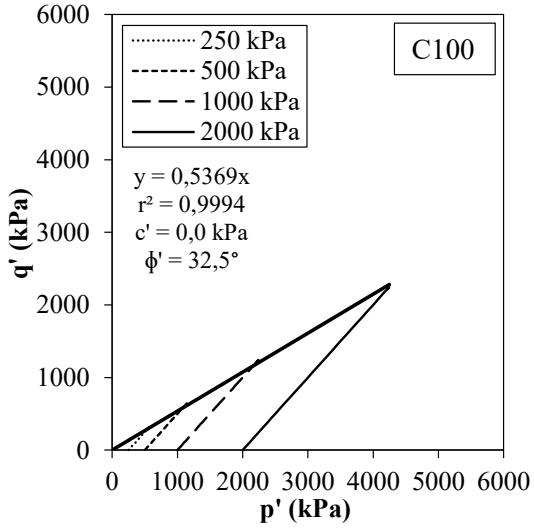
b)



c)



d)



e)

Figura 4.13 – Gráfico Trajetórias de Tensão dos Ensaios Triaxiais CID: a) C70G30-14-1,8 - 7 dias; b) C70G30-14-1,8 - 14 dias; c) C70G30-14,18 - 28 dias d) C70G30-14-1,8 - 56 dias e e) C100-14-1,8 – 0 dias.

Esse comportamento é coerente com os resultados de Hayder et al. (2025), que observaram, em solos arenosos estabilizados com geopolímero à base de PSA (cinzas de resíduos de papel), que o aumento do teor do geopolímero e o avanço da geopolimerização promovem um aumento expressivo do intercepto coesivo, ao mesmo tempo em que o ângulo de atrito tende a reduzir-se ou estabilizar, em função do revestimento dos grãos (menor rugosidade) e da ligação entre os grãos gerada pela matriz geopolimérica (efeito cola, onde há redução do contato grão a grão pela camada de gel) que limita a mobilização do atrito intergranular puro. Esse conjunto de resultados confirmou que a geopolimerização promove uma transição progressiva do comportamento puramente friccional do solo arenoso para um comportamento dominado pela coesão estrutural, com consequente aumento da rigidez, da resistência ao cisalhamento e da estabilidade mecânica do compósito ao longo do tempo de cura.

De forma global, as trajetórias de tensão confirmaram que a estabilização com geopolímero promoveu um deslocamento progressivo das envoltórias de ruptura para valores mais elevados de q', quando comparadas ao coproduto bruto, com elevados coeficientes de determinação (R^2 de 0,99), evidenciando a consistência dos resultados. Observou-se que o ganho de resistência ocorreu tanto pelo aumento do intercepto coesivo quanto pela modificação da inclinação das envoltórias, sendo mais pronunciado em 28 dias de cura. Esses resultados corroboram as análises de deformação e de tensão desviadora, confirmando que o tempo de cura exerce papel fundamental no desenvolvimento da resistência e na evolução do comportamento mecânico dos compósitos geopoliméricos.

A dilatância representa a relação entre as variações de deformação volumétrica e deformação distorcional do material, sendo expressa por ($\delta\varepsilon v/\delta\varepsilon s$). A deformação distorcional foi calculada por meio da Eq. 4.1:

$$\varepsilon_s = \frac{2}{3}(\varepsilon_a - \varepsilon_r) \qquad 4.1$$

Onde:

ε_a = Deformação axial;

ε_r = Deformação radial.

Conforme a teoria proposta por Atkinson (1993), a análise da razão de tensões q/p' em função da taxa de dilatância permite identificar a condição de estado crítico do material. Nessa condição, a taxa de dilatância é nula ($\delta\varepsilon v/\delta\varepsilon s=0$), e a razão q/p' assume o valor M, parâmetro

associado à Linha de Estado Crítico. Valores positivos da taxa de dilatância indicam comportamento contrátil, enquanto valores negativos caracterizam comportamento dilatante.

A reta teórica correspondente ao modelo de Atkinson (1993), definida por $q/p' = M - \delta\varepsilon v/\delta\varepsilon s$, para o coproduto bruto, foi traçada considerando M=1,38, correspondente a um ângulo de atrito crítico de 34,13°.

A Fig. 4.14 exibe os gráficos da Taxa de Dilatância *versus* q/p' obtidos dos resultados dos ensaios CID.

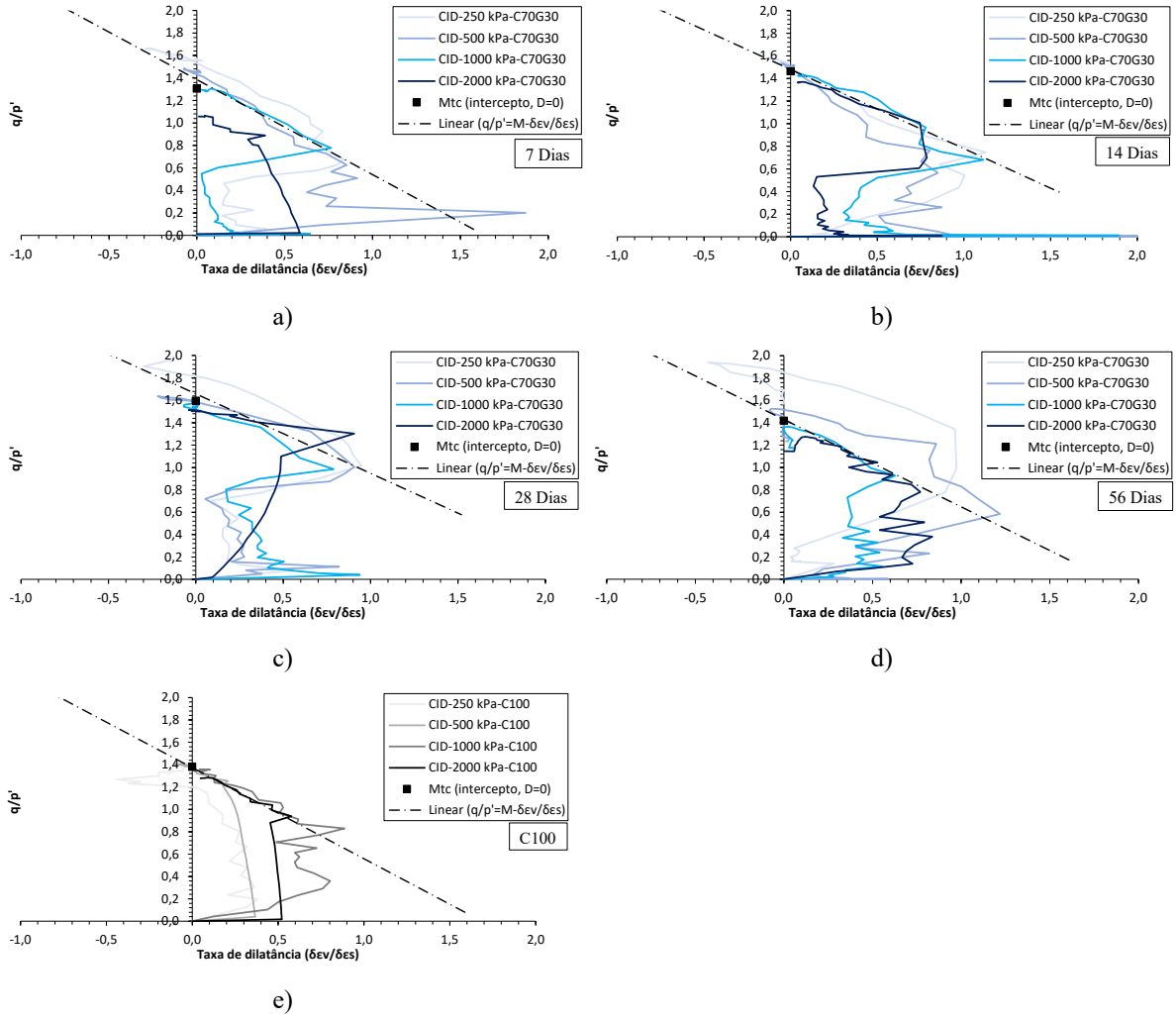


Figura 4.14 – Gráfico Taxa de Dilatância *versus* q/p': a) C70G30-14-1,8 - 7 dias; b) C70G30-14-1,8 - 14 dias; c) C70G30-14,18 - 28 dias d) C70G30-14-1,8 - 56 dias e e) C100-14-1,8 – 0 dias.

Observa-se que as trajetórias dos ensaios do coproduto bruto e dos compósitos estabilizados apresentam tendência de convergência para a reta $q/p' = M - D$, aproximando-se do intercepto correspondente ao parâmetro Mtc. Esse comportamento indica que a resposta dos materiais é compatível com os conceitos da Mecânica dos Solos em Estado Crítico,

evidenciando que a geopolimerização não altera o estado crítico intrínseco do material, mas modifica a forma como a resistência é mobilizada durante o cisalhamento.

Em relação aos diferentes tempos de cura, verifica-se que os compósitos estabilizados apresentam mudanças na evolução da taxa de dilatância, com trajetórias distintas em função da tensão confinante aplicada. De modo geral, os maiores tempos de cura, especialmente aos 28 e 56 dias, apresentam trajetórias mais próximas da reta $q/p' = M - D$ na região de maiores valores de q/p', indicando maior estabilidade da resposta mecânica à medida que se desenvolvem as ligações cimentantes promovidas pela geopolimerização. Por outro lado, as diferenças observadas entre as curvas evidenciam que a resposta dilatante permanece dependente tanto do nível de confinamento quanto do estágio de cura, refletindo a interação entre o atrito granular do coproduto e o efeito cimentante da matriz geopolimérica.

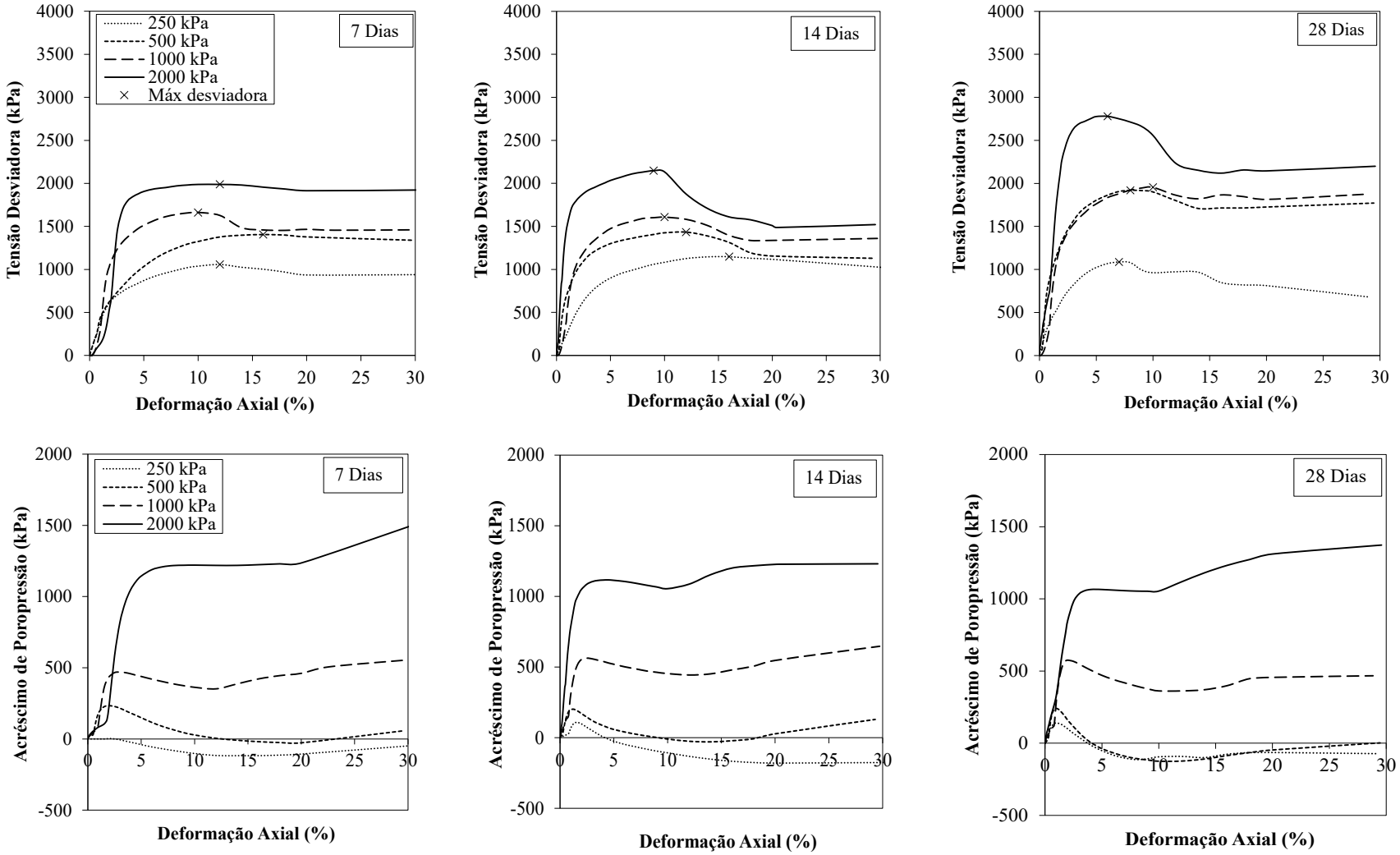
Na Fig. 4.15 é possível observar os gráficos de Tensões Desviadoras *versus* Deformação Axial e o Acréscimo de Poropressão *versus* Deformação Axial das amostras de coproduto bruto e tratadas com geopolímero sob o ensaio CIU nos tempos de cura ao ar de 7, 14 28 e 56 dias.

Nos ensaios CIU (Fig. 4.15), o coproduto bruto (Fig. 4.15e) apresentou tensões desviadoras relativamente limitadas, as quais foram mobilizadas com deformações axiais moderadas (entre 5 e 14%). Esse comportamento reflete um material predominantemente friccional, sensível à geração de poropressão positiva sob carregamento não drenado, o que restringe o desenvolvimento da resistência efetiva. Eloi (2021) explica que no caso de carregamentos não drenados, podem ocorrer excessos de poropressão positivas nos materiais soltos ou pouco densos, levando a uma redução das tensões efetivas do rejeito e assim a uma maior susceptibilidade à liquefação.

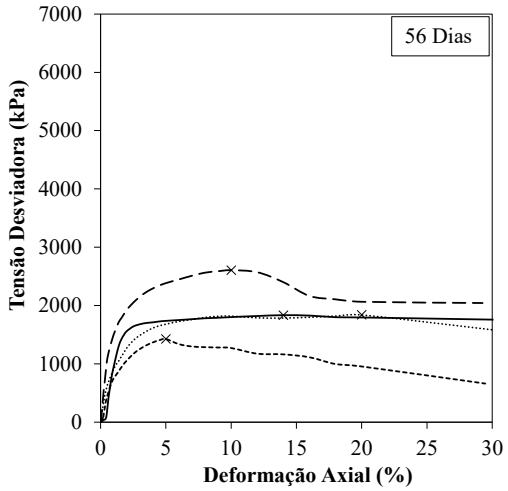
Com a estabilização por geopolímero, observou-se aumento geral da tensão desviadora, ainda que menos pronunciado do que nos ensaios CID, em razão da condição não drenada. Aos 7 dias (Fig. 4.15a), os compósitos atingiram tensões desviadoras entre 1057 kPa (250 kPa) e 1988 kPa (2000 kPa), indicando ganhos iniciais de resistência, porém com deformações relativamente elevadas (até 16%), coerentes com uma matriz ainda em consolidação. Aos 14 dias (Fig. 4.15b), os valores foram da ordem de 1148 e 2147 kPa, mostrando evolução moderada da resistência, mas ainda limitada pela dissipação parcial da rigidez devido à poropressão.

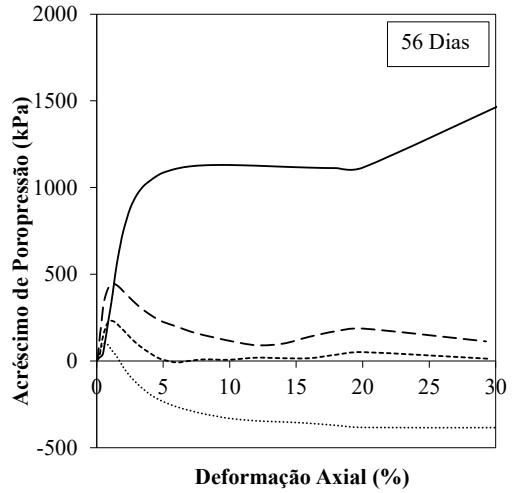
O desempenho mais satisfatório no CIU foi observado aos 28 dias (Fig. 4.15c), quando as tensões desviadoras alcançaram entre 1087 kPa (250 kPa) e 2779 kPa (2000 kPa), associadas a deformações axiais mais baixas (6 a 10%). Esse resultado indica um estado de maior estruturação interna, no qual a matriz geopolimérica já contribui de forma significativa para a resistência, mesmo sob condição não drenada. Aos 56 dias (Fig. 4.15d), embora alguns ensaios

tenham apresentado tensões desviadoras elevadas, como 1839 kPa (250 kPa) e 2605 kPa (1000 kPa), observou-se maior dispersão dos resultados e deformações axiais mais variáveis (até 20%), sugerindo maior sensibilidade à geração de poropressão e possível microfissuração da matriz cimentada.

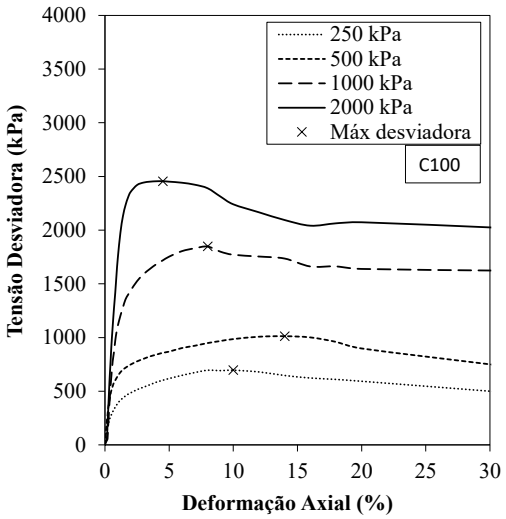

250 kPa
500 kPa
1000 kPa
2000 kPa
Máx desviadora
7 Dias
14 Dias
28 Dias
Tensão Desviadora (kPa)
Acréscimo de Poropressão (kPa)
Deformação Axial (%)

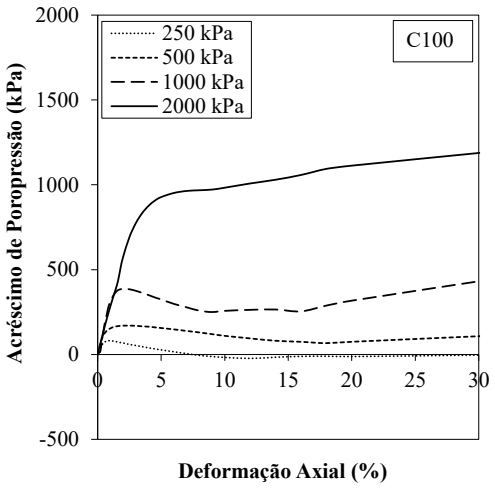
a) b) c)





d)





e)

Figura 4.15 – Gráfico Tensão Desviadora *versus* Deformação Axial dos Ensaios Triaxiais CIU: a) C70G30 - 7 dias; b) C70G30 - 14 dias; c) C70G30 - 28 dias d) C70G30 - 56 dias e e) Coproduto bruto.

Quando comparados aos ensaios CID, os resultados CIU apresentaram tensões desviadoras inferiores para um mesmo nível de confinamento e tempo de cura. Por exemplo, aos 28 dias e 2000 kPa, o CID atingiu aproximadamente 6122 kPa, enquanto o CIU alcançou cerca de 2779 kPa, ou seja, menos da metade. Essa diferença evidencia o papel determinante da drenagem: nos ensaios CID, a dissipação de poropressão permite plena mobilização das tensões efetivas e da coesão induzida pela geopolimerização, resultando em respostas mais rígidas e resistentes.

No coproduto bruto, o acréscimo de poropressão (Δu) aumentou com o confinamento e foi claramente mais intenso sob 2000 kPa, atingindo Δu de 1189 kPa ao final do ensaio (ε_a = 30,18%), enquanto sob 1000 kPa esse parâmetro chegou a 435 kPa (εa = 30,37%) e sob 500 kPa permaneceu bem menor (Δu = 109 kPa em εa = 30,38%). Já em 250 kPa, a resposta foi praticamente neutra e terminou com leve queda (Δu = −3 kPa em εa = 30,27%), indicando tendência mais dilatante em baixo confinamento.

Em relação aos compósitos, em termos gerais, observou-se que em baixos confinamentos (250 a 500 kPa), a cura favoreceu uma resposta menos contráctil e, em vários casos, dilatante (Δu próximo de zero ou negativo, como −177 kPa aos 14 dias e −385 kPa aos 56 dias em 250 kPa). Por outro lado, em confinamento elevado (2000 kPa), predominou a geração de poropressão positiva expressiva, com máximos e patamares altos (por exemplo, 1189 kPa no bruto, aproximadamente 1518 kPa aos 14 dias, 2199 kPa aos 28 dias e 1472 kPa aos 56 dias), coerente com um comportamento mais contráctil e com maior redução de tensões efetivas em condição não drenada. Dessa forma, quando comparada à amostra bruta, a estabilização com geopolímero promoveu uma atenuação da resposta contráctil em baixos confinamentos e uma reorganização do mecanismo de geração de poropressão em altos confinamentos, refletindo a evolução da estrutura interna do material, o aumento da rigidez e a consolidação progressiva da matriz geopolimérica com o tempo de cura.

A Fig. 4.16 apresenta as trajetórias de tensão efetivas obtidas nos ensaios triaxiais CIU, realizadas com o coproduto de rejeito de minério de ferro em condição bruta e com os compósitos estabilizados com geopolímero C70G30 submetidos a 7, 14, 28 e 56 dias de cura ao ar.

A Fig.4.16 evidenciou, a partir das trajetórias q'–p' dos ensaios CIU, que a estabilização com geopolímero e o tempo de cura ao ar modificaram tanto a inclinação quanto o posicionamento das retas ajustadas aos pontos de máxima obliquidade, refletindo alterações nos parâmetros efetivos de resistência. O coproduto bruto (Fig. 4.16e) apresentou ajuste praticamente passando pela origem, com y = 0,5496x (R^2 = 0,9994), caracterizando um

comportamento essencialmente friccional, coerente com a ausência de cimentação e com elevada consistência do ajuste.

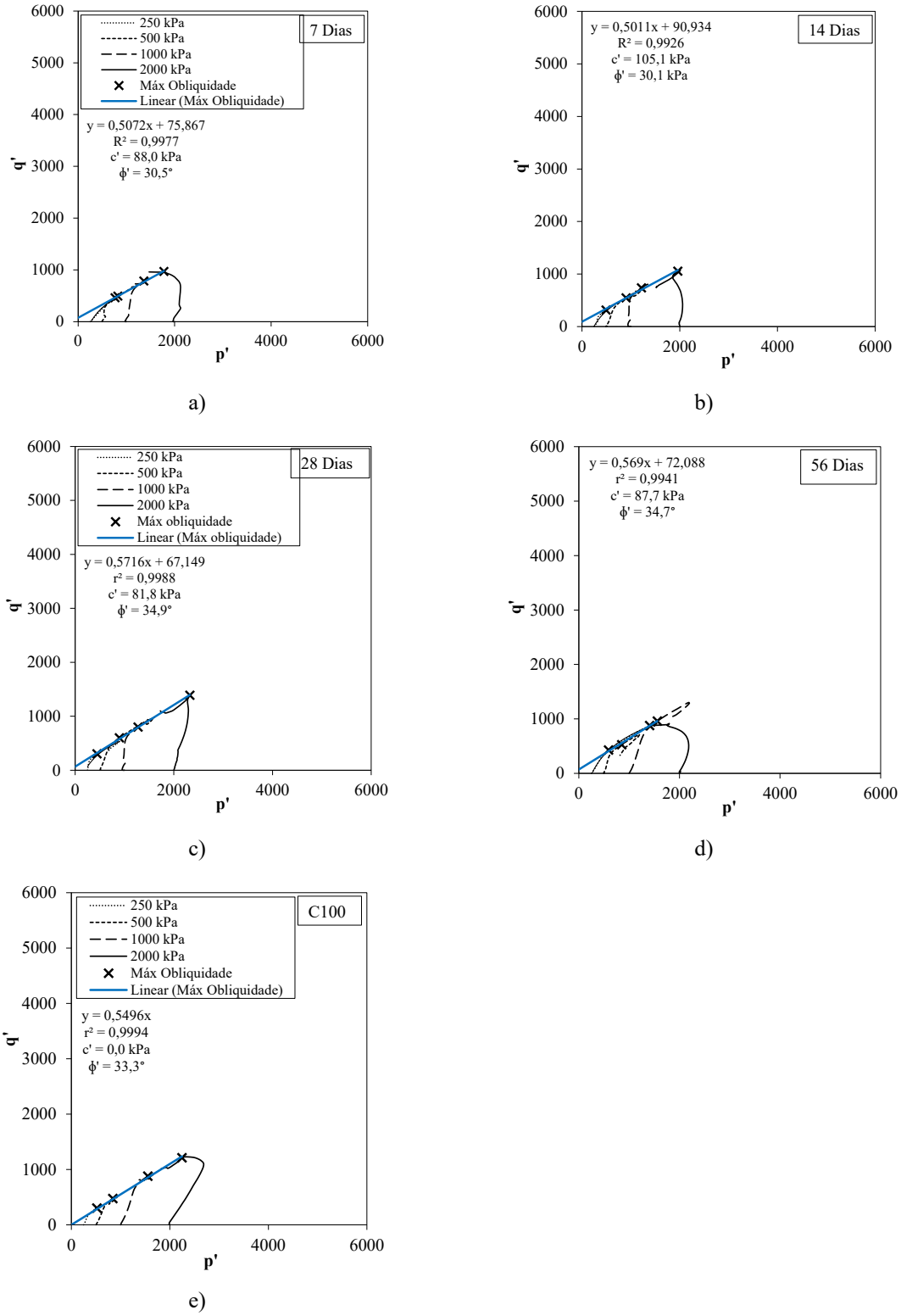


Figura 4.16 – Gráfico Trajetórias de Tensão dos Ensaios Triaxiais CIU: a) C70G30 - 7 dias; b) C70G30 - 14 dias; c) C70G30 - 28 dias d) C70G30 - 56 dias e e) C100-14-1,8 – 0 dias.

Com a estabilização, os compósitos passaram a apresentar interceptos positivos já aos 7 dias de cura (Fig. 4.16a), evidenciando o início da atuação da matriz geopolimérica e a introdução de uma parcela coesiva efetiva. Aos 14 dias (Fig. 4.16b), o indicou incremento adicional dessa contribuição coesiva, associado à evolução das reações de geopolimerização. Já aos 28 dias (Fig. 4.16c), observou-se o maior ganho na inclinação da reta, indicando aumento mais expressivo do ângulo de atrito efetivo nessa idade. Aos 56 dias (Fig. 4.16d), manteve-se uma inclinação elevada, sugerindo a consolidação da resistência friccional, acompanhada de um intercepto positivo estável.

Em conjunto, esses resultados confirmaram que o tempo de cura não apenas introduziu uma componente coesiva efetiva, decorrente da formação da matriz geopolimérica, mas também promoveu a evolução da parcela friccional, especialmente nas idades mais avançadas. O deslocamento das trajetórias para condições de resistência mais favoráveis e o aumento das inclinações em 28 e 56 dias refletiram o aprimoramento da estrutura interna e das interações intergranulares sob condições saturadas, com regressões muito bem definidas ($R^2 \gtrsim 0{,}99$).

Em comparação aos resultados obtidos nos ensaios CID, observou-se que as tendências identificadas nas trajetórias q'–p' dos ensaios CIU foram coerentes, sobretudo quanto à evolução dos parâmetros efetivos de resistência com o tempo de cura. Em ambos os casos, a estabilização com geopolímero promoveu o surgimento de interceptos, inexistentes no coproduto bruto, e o aumento progressivo da inclinação das retas, associada ao ângulo de atrito efetivo. Contudo, nos ensaios CIU, a geração de poropressão durante o cisalhamento resultou em trajetórias deslocadas para menores valores de tensão média efetiva, o que tornou mais evidente a influência da estrutura cimentada na mobilização da resistência. Ainda assim, as idades mais avançadas (28 e 56 dias) mantiveram inclinações elevadas também no regime saturado, indicando que a matriz geopolimérica conferiu estabilidade ao comportamento resistente mesmo sob condições mais críticas de carregamento.

A análise dos parâmetros de resistência efetivos obtidos nos ensaios CIU evidencia que a estabilização com geopolímero promoveu a introdução de uma parcela coesiva significativa, inexistente no coproduto bruto, cujo intercepto foi nulo. Já aos 7 dias de cura, a coesão efetiva atingiu cerca de 88 kPa, aumentando para 105 kPa aos 14 dias, o que confirma o rápido desenvolvimento inicial da matriz geopolimérica. Nas idades mais avançadas (28 e 56 dias), os valores de coesão mantiveram-se da ordem de 82-88 kPa, indicando uma estabilização desse parâmetro em regime saturado. Em termos do ângulo de atrito efetivo, observou-se que o coproduto bruto apresentou valor de 33,3°, enquanto os compósitos jovens exibiram leve redução (≈30° aos 7 e 14 dias), seguida de aumento nas idades mais avançadas, alcançando

34,9° aos 28 dias e 34,7° aos 56 dias. Esses resultados sugerem que, após a fase inicial de ganho coesivo, ocorre uma reorganização microestrutural que favorece o incremento da parcela friccional, refletida no aumento da inclinação das envoltórias. Os elevados coeficientes de determinação ($R^2 \geq 0,99$) reforçam a confiabilidade dos ajustes obtidos.

Observa-se ainda que os ganhos de rigidez decorrentes da cura foram mais evidentes nos ensaios não drenados do que nos drenados, principalmente para pequenas deformações. Esse comportamento sugere que a matriz geopolimérica contribuiu não apenas para o aumento da resistência estrutural do material, mas também para uma maior capacidade de suportar a geração de poropressões sem perda imediata de rigidez.

De maneira semelhante ao observado nos ensaios CID, os compósitos apresentaram maior rigidez inicial e menor degradação relativa do módulo cisalhante quando comparados ao coproduto bruto. Entretanto, a dispersão dos resultados foi mais pronunciada nos ensaios CIU, especialmente sob maiores tensões confinantes, refletindo a influência da evolução das poropressões e das tensões efetivas durante o carregamento.

De modo geral, os resultados drenados e não drenados apresentaram tendências semelhantes, com aumento progressivo do módulo cisalhante em função da cura e da estabilização geopolimérica. Entretanto, os ensaios CIU mostraram maior dispersão dos resultados, evidenciando a influência adicional das poropressões na resposta mecânica do material.

Com o objetivo de avaliar de forma comparativa o comportamento drenado e não drenado dos materiais, as trajetórias de tensões efetivas foram apresentadas em um mesmo gráfico, conforme ilustrado na Fig. 4.17. A representação dos pontos por uma única reta para cada condição experimental permitiu sintetizar o comportamento global dos materiais e comparar a evolução das envoltórias de resistência. Embora essa simplificação não represente toda a trajetória tensão-deformação, ela evidencia claramente que a estabilização com geopolímero modificou o comportamento do coproduto, transformando um material essencialmente friccional em um compósito com resistência dependente tanto do atrito quanto da cimentação.

Conforme mencionado anteriormente, aos 7 dias de cura os compósitos ainda se encontram em um estágio inicial de endurecimento, apresentando maior umidade residual e uma matriz geopolimérica ainda em processo de consolidação. Nessa fase, embora já existam produtos de reação capazes de promover a ligação entre as partículas, a rede geopolimérica ainda não está completamente desenvolvida, resultando em uma estrutura menos rígida e menos integrada do que nas idades mais avançadas. Como consequência, a resistência tende a ser

governada predominantemente pelas ligações cimentantes iniciais, refletidas nos maiores valores de intercepto coesivo observados nessa idade.

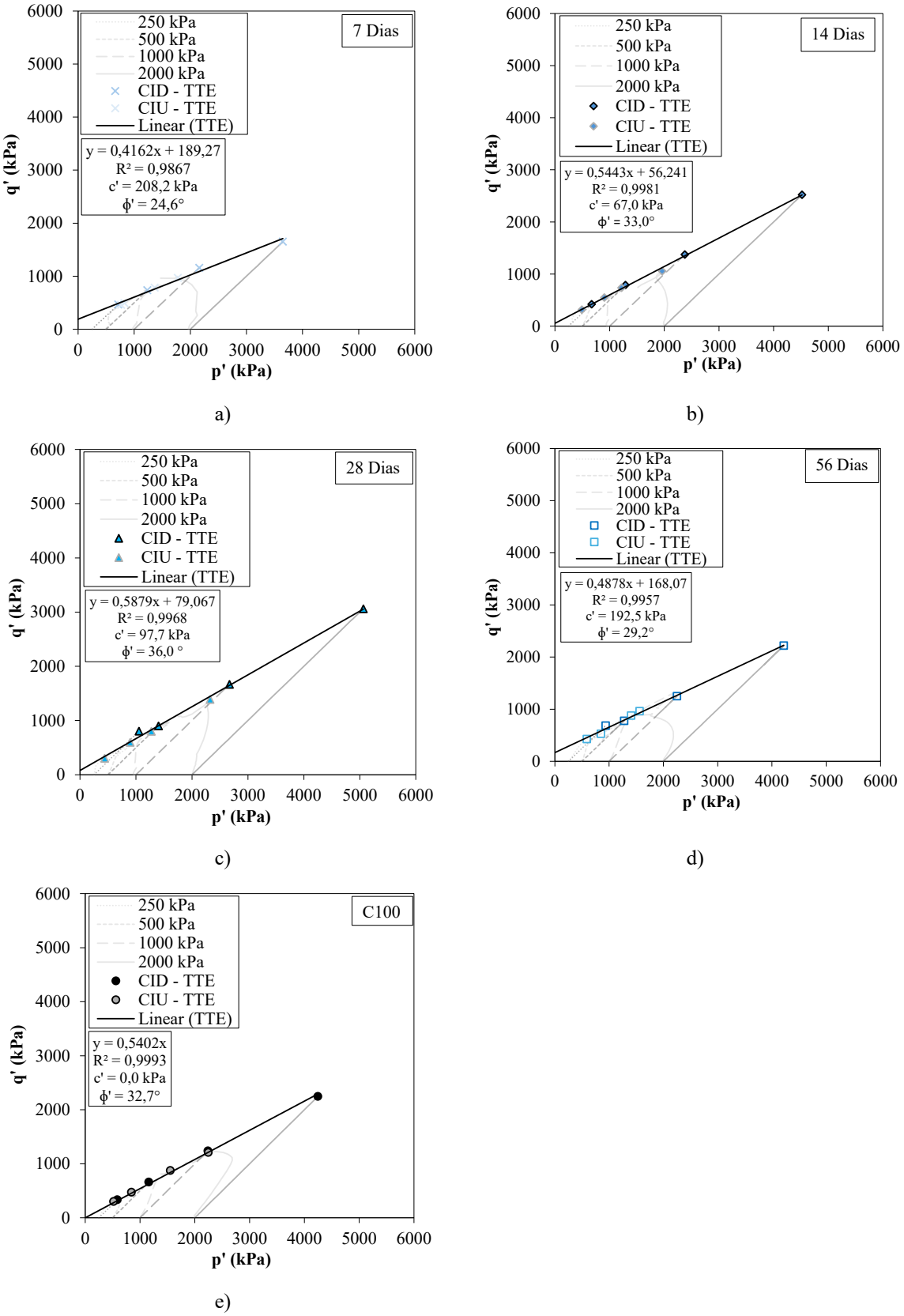


Figura 4.17 – Gráfico Trajetórias de Tensão Efetivas: a) C70G30 - 7 dias; b) C70G30 - 14 dias; c) C70G30 - 28 dias d) C70G30 - 56 dias e e) C100-14-1,8 – 0 dias.

Por outro lado, a presença de maior quantidade de água remanescente e o menor grau de consolidação da matriz reduzem a eficiência do intertravamento entre partículas e a mobilização dos mecanismos de atrito, justificando os menores ângulos de atrito obtidos aos 7 dias. Com o avanço da cura, a continuidade das reações de geopolimerização promove o fortalecimento da estrutura interna do compósito, aumentando a integração entre a matriz geopolimérica e as partículas do coproduto e favorecendo uma participação mais expressiva da componente friccional da resistência.

As idades intermediárias de cura evidenciam a evolução gradual da estrutura geopolimérica e a consequente redistribuição dos mecanismos resistentes. Aos 14 dias, observa-se uma redução da contribuição coesiva em relação aos 7 dias, acompanhada por um aumento do ângulo de atrito efetivo, indicando uma maior participação dos mecanismos de intertravamento e atrito entre partículas. Aos 28 dias, verifica-se a condição mais favorável em termos de resistência efetiva, caracterizada pela combinação de elevados valores de coesão e dos maiores ângulos de atrito observados entre os compósitos. Esse comportamento sugere que, nessa idade, a matriz geopolimérica apresenta um grau de desenvolvimento suficiente para promover simultaneamente a cimentação das partículas e a mobilização eficiente da resistência friccional.

A comparação entre o coproduto bruto e o compósito curado por 56 dias evidencia que a estabilização geopolimérica promoveu alterações importantes nos parâmetros de resistência. Observou-se um aumento significativo do intercepto coesivo, indicando o desenvolvimento de uma estrutura cimentada capaz de fornecer resistência adicional ao material. Em contrapartida, verificou-se uma redução do ângulo de atrito efetivo em relação ao coproduto bruto. Apesar dessa diminuição (de 32,7° para 29,2°), os valores obtidos permaneceram dentro da faixa normalmente reportada para materiais granulares, indicando que a estabilização não comprometeu a contribuição friccional do compósito, mas passou a redistribuir a resistência entre as parcelas coesiva e friccional.

Cabe ressaltar que as trajetórias de tensão efetiva dos ensaios CIU indicaram maior geração de poropressões para a tensão confinante de 2000 kPa, enquanto para as tensões de 250, 500 e 1000 kPa esse efeito foi menos pronunciado. Esse comportamento sugere que o aumento da tensão confinante exerce influência significativa na geração de poropressões durante o cisalhamento. Dessa forma, caso fossem aplicadas tensões confinantes superiores, maiores que 2000 kPa, é possível que fossem observadas trajetórias efetivas com maiores deslocamentos para a esquerda e, consequentemente, uma geração mais expressiva de poropressões. A Tab. 4.8 resume os resultados obtidos dos ensaios triaxiais monotônicos.

Tabela 4.8– Resumo dos resultados dos ensaios triaxiais monotômicos.

Condição Experimental	Ensaio	Pressão Confinante (kN/m²)	Tensão Desviadora na Ruptura, qf (kN/m²)	Def. Axial na Ruptura, %	Índice de Fragilidade, IB	Absorção de Energia, ED (30%) (kJ/m³)	Ângulo de Atrito, Φ'	Interc. Coesivo, c'
C100-14-1,8	CID	250	667	12	0,1	183	33	0
		500	1323	12	0,0	357		
		1000	2480	12	0,0	685		
		2000	4495	16	0.0	1213		
	CIU	250	696	10	0,3	346		
		500	1011	14	0,3	271		
		1000	1848	8	0,1	487		
		2000	2455	5	0,2	634		
C70G30-14-1,8 (7 Dias)	CID	250	932	5	0,1	235	25	208
		500	1471	7	0,0	401		
		1000	2313	12	0,0	576		
		2000	3301	14	0,0	856		
	CIU	250	1057	12	0,1	236		
		500	1405	16	0,0	320		
		1000	1661	10	0,1	364		
		2000	1988	12	0,0	465		
C70G30-14-1,8 (14 Dias)	CID	250	839	6	0,2	218	33	67
		500	1578	7	0,0	430		
		1000	2751	12	0,0	754		
		2000	5041	14	0,0	1332		
	CIU	250	1148	16	0,1	409		
		500	1434	12	0,2	521		
		1000	1608	10	0,2	560		
		2000	2147	9	0,3	712		
C70G30-14-1,8 (28 Dias)	CID	250	1605	5	0,1	441	36	98
		500	1804	4	0,0	507		
		1000	3338	6	0,0	919		
		2000	6122	7	0,0	1719		
	CIU	250	1087	7	0,4	405		
		500	1920	8	0,1	503		
		1000	1955	10	0,0	515		
		2000	2779	6	0,2	663		

Condição Experimental	Ensaio	Pressão Confinante (kN/m²)	Tensão Desviadora na Ruptura, qf (kN/m²)	Def. Axial na Ruptura, %	Índice de Fragilidade, IB	Absorção de Energia, ED (30%) (kJ/m³)	Ângulo de Atrito, Φ'	Interc. Coesivo, c'
C70G30-14-1,8 (56 Dias)	CID	250	1373	4	0,4	303	29	193
		500	1555	5	0,3	403		
		1000	2503	6	0,2	670		
		2000	4439	9	0,2	1287		
	CIU	250	1839	20	0,1	500		
		500	1427	5	0,5	395		
		1000	2605	10	0,2	610		
		2000	1833	14	0,0	525		

Por meio da Tab. 4.8 é possível observar outros pontos. Em relação aos parâmetros de deformabilidade e resistência, observa-se que a adição do geopolímero promoveu alterações significativas no comportamento mecânico do material. As deformações axiais na ruptura foram reduzidas nos ensaios CID, passando de valores entre 12% e 16% no coproduto bruto para aproximadamente 4% a 7% nos compósitos com 28 e 56 dias de cura, evidenciando o aumento da rigidez e o desenvolvimento de uma estrutura mais cimentada, conforme anterior comentado. Nos ensaios CIU, entretanto, as deformações apresentaram maior variabilidade devido à influência das poropressões, atingindo valores de até 20% para o compósito aos 56 dias sob confinamento de 250 kPa.

O IB permaneceu baixo para a maior parte das condições avaliadas, indicando comportamento predominantemente dúctil. Contudo, nos compósitos com maior tempo de cura observou-se tendência de aumento desse parâmetro, especialmente nos ensaios CID aos 56 dias (IB entre 0,2 e 0,4), refletindo a maior rigidez da matriz geopolimérica e a ocorrência de rupturas mais abruptas após a tensão de pico. Tendência semelhante foi observada nos ensaios CIU, nos quais valores de IB de até 0,5 foram registrados.

A absorção de energia apresentou aumento expressivo após a estabilização. Nos ensaios CID, os maiores valores foram observados aos 28 dias, alcançando até 1719 kJ/m³ sob confinamento de 2000 kPa, valor aproximadamente 42% superior ao do coproduto bruto (1213 kJ/m³). Esse comportamento demonstra que, apesar da redução das deformações de ruptura, os compósitos desenvolveram maior capacidade de armazenar e dissipar energia antes da falha, resultado associado ao aumento simultâneo da resistência e da coesão. Nos ensaios CIU, embora os valores absolutos tenham sido menores, também foi observada tendência de aumento da absorção de energia em relação ao material não tratado.

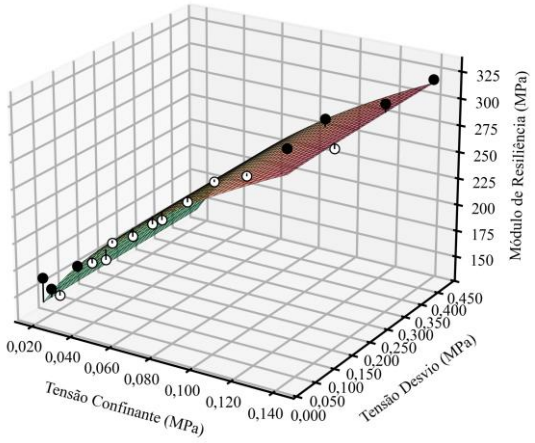
Quanto aos parâmetros de resistência, foram utilizados os resultados obtidos nos ensaios CID e CIU, apresentados na Fig. 4.17. De modo geral, observa-se aumento progressivo da resistência com o avanço da cura dos compósitos, evidenciado principalmente pelo incremento da coesão. Esse comportamento indica que o principal mecanismo responsável pelos ganhos de resistência foi o desenvolvimento de ligações cimentantes promovidas pela matriz geopolimérica, que conferiram coesão ao material sem alterações expressivas no ângulo de atrito efetivo.

4.3.4 - MÓDULO DE RESILIÊNCIA

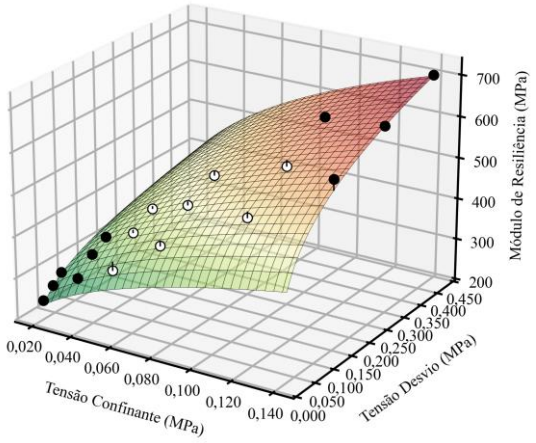
Na Fig.4.18 são apresentados os resultados de MR obtidos a partir dos ensaios triaxiais cíclicos de cargas repetidas, realizados conforme a norma DNIT 134/2018 – ME, com a medição dos deslocamentos no topo das amostras. Os resultados referem-se ao coproduto de rejeito de minério de ferro bruto e ao compósito estabilizado com geopolímero C70G30 submetidos a diferentes tempos de cura ao ar (7, 14, 28 e 56 dias). Ressalta-se que, para todas as amostras analisadas, o modelo combinado apresentou o coeficiente de correlação mais significativo, indicando maior adequação na representação do comportamento resiliente dos materiais. Por esta razão, a Fig. 4.18 apresenta apenas os resultados de MR ajustados para este modelo. Destaca-se que as escalas adotadas nos gráficos são distintas, o que deve ser levado em consideração durante a análise dos resultados.

A partir dos resultados, observou-se que as superfícies de resposta indicaram um aumento sistemático do MR com o acréscimo da tensão confinante, comportamento típico de materiais granulares e/ou cimentados, nos quais o confinamento promove maior contato e intertravamento entre as partículas, restringindo as deformações elásticas recuperáveis. Para o coproduto bruto (C100-12-1,8), os valores de MR variaram aproximadamente entre 95 e 210 MPa, dependendo do par de tensões aplicado, evidenciando uma rigidez resiliente mais limitada e maior sensibilidade às variações de carregamento.

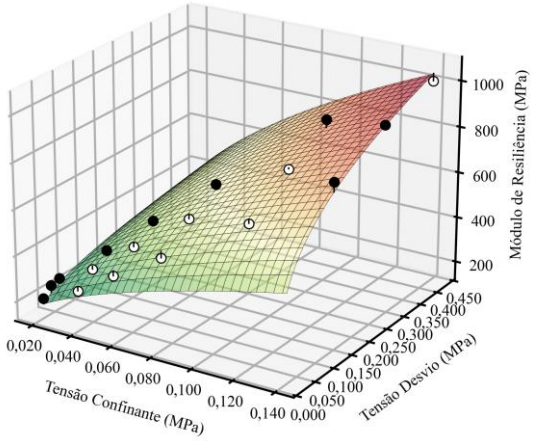
De forma complementar, verificou-se que a tensão desviadora também exerceu influência significativa sobre o MR, porém com comportamento não linear, evidenciado pela curvatura das superfícies ajustadas. Em baixos níveis de tensão desviadora (aproximadamente de 0,02 a 0,06 MPa), os valores de MR apresentaram incrementos moderados; por exemplo, para tensão confinante da ordem de 0,02 MPa, o MR do compósito C70G30 evoluiu de 151 MPa (7 dias) para 269 MPa (14 dias) e 377 MPa (56 dias). Já em níveis mais elevados de carregamento desviador (aproximadamente de 0,28 a 0,42 MPa), observou-se aumento expressivo do MR, indicando maior sensibilidade do material à amplitude do cisalhamento cíclico, com valores atingindo até 1206 MPa no compósito com 56 dias de cura, sob tensão confinante de 0,141 MPa.



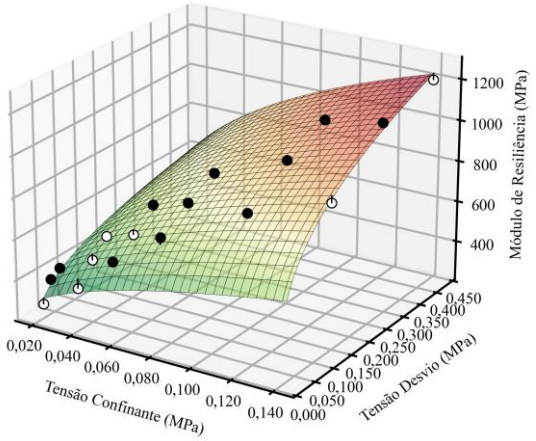
a)



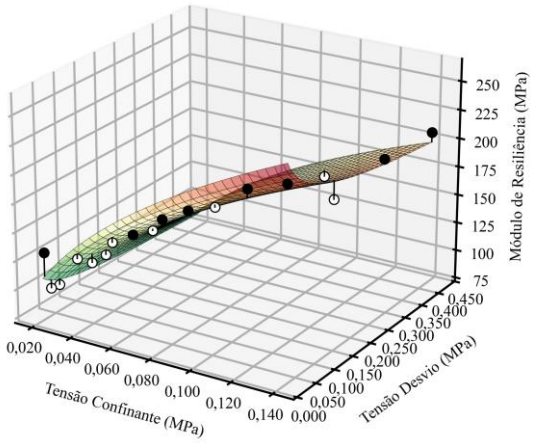
b)



c)



d)



e)

Figura 4.18 – Gráfico dos resultados de Módulo de Resiliência pela norma DNIT 134 no topo da amostra: a) C70G30 - 7 dias; b) C70G30 - 14 dias; c) C70G30 - 28 dias d) C70G30 - 56 dias e e) C100-12-1,8 – 0 dias.

Ao comparar as condições de cura, verificou-se que o coproduto bruto (Fig. 4.18a) apresentou superfície posicionada em patamar inferior e maior dispersão relativa dos pontos experimentais, refletindo menor rigidez e maior variabilidade do comportamento elástico sob carregamento cíclico. Em contraste, o compósito C70G30 (Fig. 4.18b a 4.18e) exibiu deslocamento progressivo das superfícies para valores mais elevados de MR com o aumento do tempo de cura ao ar. Esse ganho tornou-se particularmente evidente a partir de 14 dias, quando os valores de MR passaram a superar 400 MPa em grande parte dos pares de tensões, alcançando faixas entre 600 e 1050 MPa para os compósitos com 28 e 56 dias, respectivamente.

Esses resultados evidenciaram que o avanço do tempo de cura promoveu aumento significativo da rigidez resiliente, associado ao desenvolvimento e à consolidação da matriz geopolimérica, que passou a atuar de forma mais efetiva na transferência de tensões e na restrição das deformações recuperáveis. Além disso, nas idades mais avançadas, as superfícies apresentaram comportamento mais estável e coerente, indicando redução da variabilidade experimental e maior homogeneidade mecânica do material estabilizado.

Já na Fig. 4.19 tem-se os resultados obtidos pela norma DNIT 134/2018 – ME, com medição dos deslocamentos no terço médio das amostras. Como o ensaio no coproduto bruto foi de difícil execução, só foi possível aferir utilizando uma umidade de moldagem de 12%. Por causa dessa limitação experimental, os ensaios comparativos com outras normas foram conduzidos exclusivamente nas amostras de coproduto estabilizadas, que apresentaram maior estabilidade e reprodutibilidade durante a execução dos ensaios.

A Fig. 4.19 apresenta as superfícies de MR obtidas com a instrumentação posicionada no terço médio das amostras estabilizadas, permitindo avaliar de forma mais direta a resposta interna do material e reduzir possíveis influências de efeitos de extremidade observados nas medições no topo. De modo geral, os resultados no terço médio confirmaram as tendências já identificadas no topo, com aumento do MR em função da tensão confinante e resposta dependente da tensão desviadora, porém com diferenças relevantes quanto à magnitude e à regularidade das superfícies.

Para os compósitos com 7 e 14 dias de cura (Figs. 4.19a e 4.19b), observou-se maior dispersão dos pontos experimentais e superfícies menos regulares quando comparadas às obtidas no topo. Esse comportamento indica que, em idades iniciais, a matriz geopolimérica ainda não se encontrava suficientemente homogênea ao longo da altura da amostra, resultando em maior sensibilidade local às condições de carregamento cíclico. Ainda assim, manteve-se a tendência de incremento do MR com o aumento da tensão confinante, coerente com a resposta granular/cimentada do material.

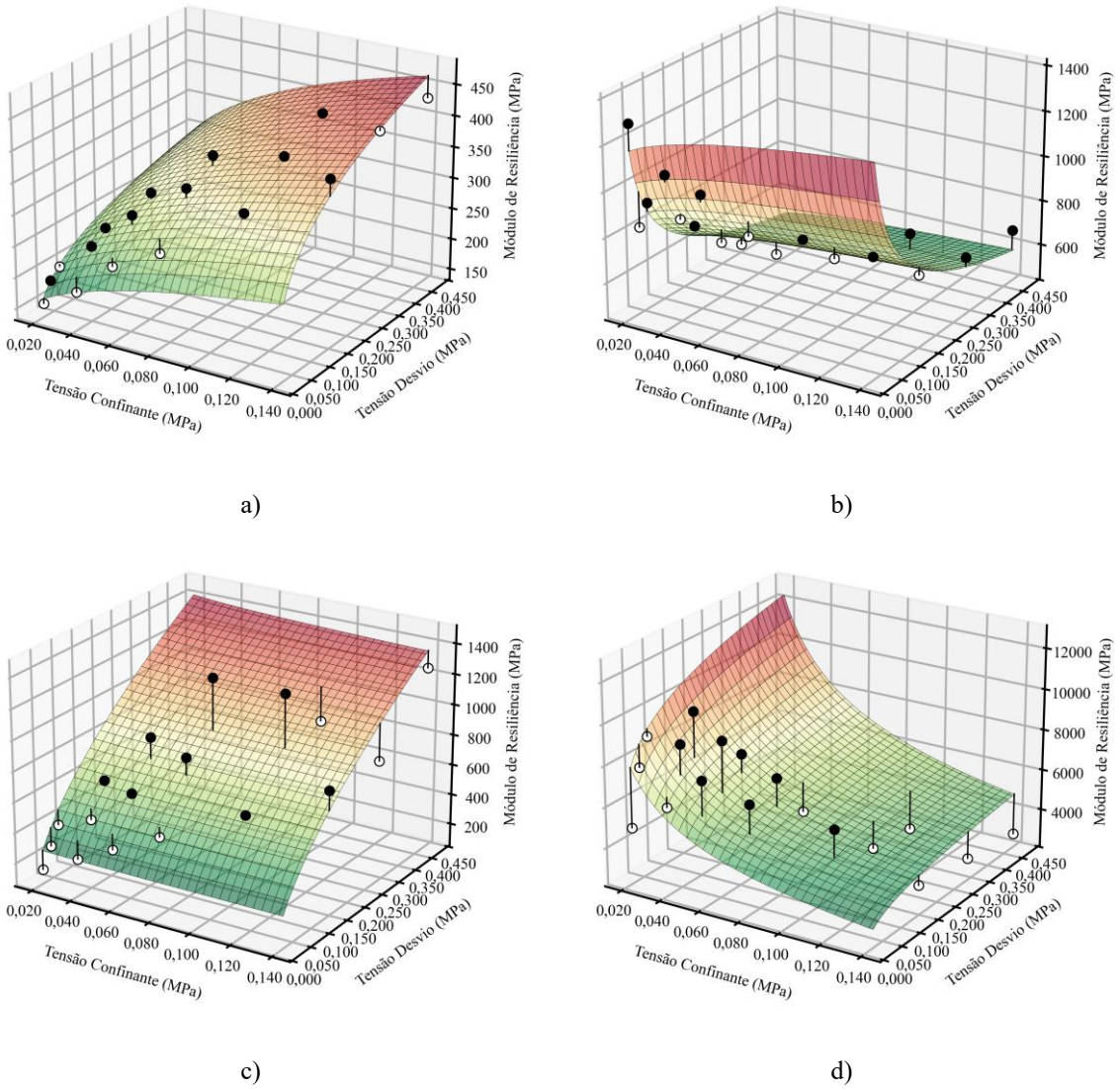


Figura 4.19 – Gráfico dos resultados de Módulo de Resiliência pela norma DNIT 134 no terço médio da amostra: a) C70G30 - 7 dias; b) C70G30 - 14 dias; c) C70G30 - 28 dias e d) C70G30 - 56 dias.

Nos compósitos com 28 e 56 dias de cura (Figs. 4.19c e 4.19d), as superfícies no terço médio tornaram-se mais suaves e bem definidas, com menor dispersão em relação aos pontos experimentais. Esse resultado sugere maior uniformidade estrutural e melhor distribuição das ligações geopoliméricas ao longo da amostra, refletindo um material mais rígido e estável sob carregamentos repetidos. Na Fig. 4.20 tem-se os resultados de MR das amostras de coproduto bruto e dos compósitos coproduto-geopolímero realizadas pela norma DNIT 134/2018 – ME no terço médio com imersão.

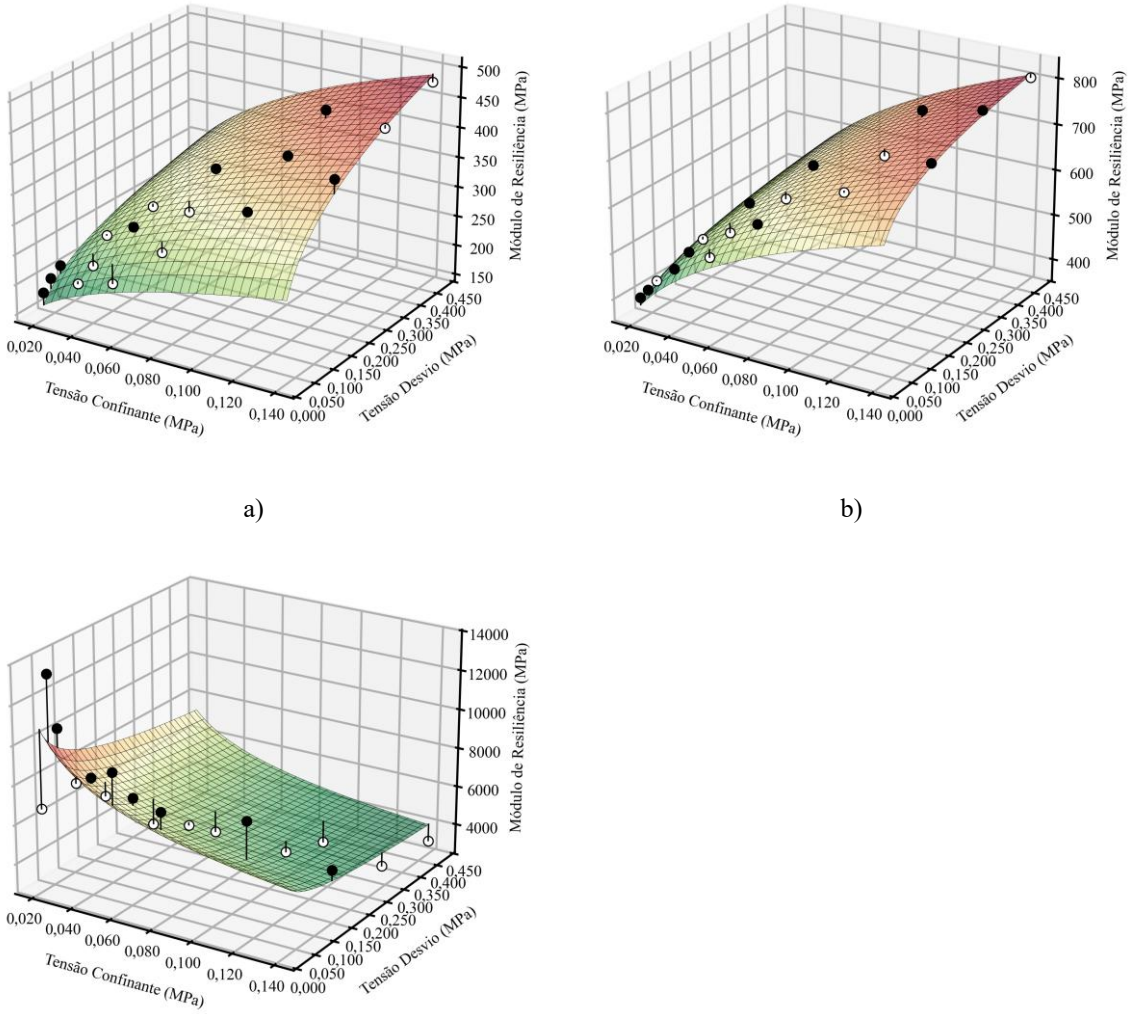


Figura 4.20 – Gráfico dos resultados de Módulo de Resiliência pela norma DNIT 134 no terço médio da amostra com imersão: a) C70G30 - 14 dias; b) C70G30 - 28 dias e c) C70G30 - 56 dias.

Os resultados apresentados na Fig. 4.20, referentes ao MR determinado no terço médio da amostra sob condição de imersão, evidenciaram alterações importantes no comportamento resiliente dos compósitos quando comparados aos ensaios realizados sem imersão. De forma geral, as superfícies de resposta mantiveram a tendência de aumento do MR com o acréscimo da tensão confinante, confirmando que o confinamento continua sendo o principal mecanismo de controle da rigidez resiliente, mesmo na presença de água.

Entretanto, em comparação com os resultados obtidos no topo e no terço médio sem imersão (Figs. 4.18 e 4.19), observou-se uma redução global dos valores de MR nas amostras imersas, particularmente para os compósitos com menores tempos de cura.

Em síntese, a comparação entre os ensaios triaxiais cíclicos mostrou que a imersão promove redução do MR, sobretudo em idades iniciais de cura, devido à interferência da água na rigidez da matriz geopolimérica e nas ligações intergranulares. Contudo, com o avanço do tempo de cura, os compósitos passaram a apresentar comportamento resiliente mais estável e menos sensível à umidade, evidenciando que o processo de geopolimerização contribui significativamente para a durabilidade mecânica e para a manutenção da rigidez sob condições adversas de saturação.

A Fig. 4.21 revela os resultados obtidos de MR pela norma DNIT 181/2018 – ME. Os ensaios foram realizados para o compósito C70G30 com 14% de umidade, 1,8 g/cm³ de densidade e 14, 28 e 56 dias de cura ao ar.

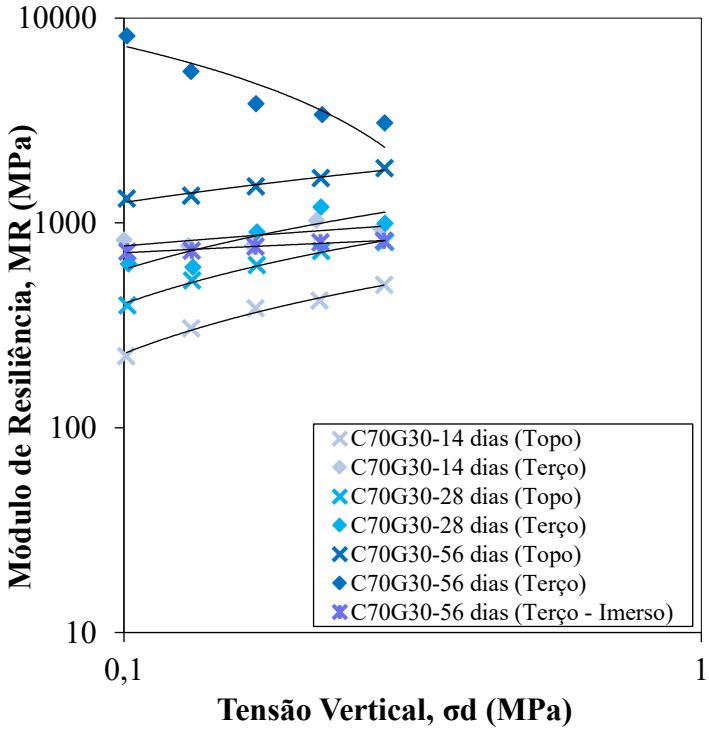


Figura 4.21 – Gráfico dos resultados de Módulo de Resiliência pela norma 181 (modelo combinado).

Observou-se, com o gráfico da Fig. 4.21, que uma tendência de aumento do MR com o acréscimo da tensão vertical, comportamento coerente com materiais mais rígidos e estruturados, nos quais o carregamento promoveu maior contato e intertravamento entre as partículas. Esse resultado mostrou-se compatível com as observações dos ensaios de RCNC, nos quais se verificaram rupturas com baixas deformações em todos os compósitos, em função do ganho de rigidez proporcionado pela matriz geopolimérica. Assim, a elevada rigidez desenvolvida ao longo da cura refletiu-se diretamente em uma resposta resiliente mais elevada e menos deformável nos ensaios cíclicos.

Ao comparar os tempos de cura, verificou-se que os compósitos com 28 e 56 dias apresentaram, em geral, valores mais elevados de MR em relação aos corpos de prova com 14 dias, indicando que o avanço do tempo de cura contribuiu para a consolidação da matriz geopolimérica e para o aumento da rigidez elástica recuperável. Esse comportamento mostrou-se coerente com o aumento progressivo da resistência mecânica observado nos ensaios monotônicos. Observou-se ainda que, embora as amostras moldadas com 14% de umidade tenham apresentado desempenho inferior em idades iniciais quando comparados com os resultados de RCNC, os resultados aos 14 dias de cura já indicaram uma resposta resiliente mais favorável, após o período de secagem e maturação do material.

Embora a medição dos deslocamentos no terço médio dos corpos de prova tenda a fornecer resultados mais representativos do comportamento real do material, por minimizar os efeitos de extremidade e as interferências decorrentes do contato entre a amostra e os platôs do equipamento, os resultados obtidos nesta pesquisa apresentaram elevada dispersão e variabilidade entre as diferentes condições analisadas. Em diversos casos, foram observados valores de módulo de resiliência significativamente superiores aos normalmente reportados para materiais estabilizados destinados à pavimentação, alcançando valores de até 9.983 MPa, além de tendências que nem sempre foram compatíveis com o comportamento esperado em função das variações das tensões confinante e desvio. Em contraste, os resultados obtidos com medição dos deslocamentos no topo das amostras apresentaram comportamento mais consistente, com valores máximos da ordem de 1.845 MPa.

A comparação com a literatura reforça essa interpretação. Sun et al. (2011), avaliando rejeitos de minério de ferro estabilizados com 4,5% a 6% de cimento Portland, reportaram valores de MR variando entre 912 e 1120 MPa. De forma semelhante, Jahanshahi e Ghanizadeh (2024), em estudo envolvendo rejeitos magnetíticos e hematíticos estabilizados com cimento Portland, obtiveram módulos de resiliência compreendidos entre aproximadamente 200 e 1100 MPa. Adicionalmente, a revisão bibliográfica realizada por Chao et al. (2024), reunindo diversos estudos sobre bases rodoviárias contendo rejeitos de minério de ferro estabilizados com cimento, indicou que os maiores valores de módulo de resiliência encontram-se tipicamente entre 1107 e 2010 MPa.

Considerando a possibilidade de limitações operacionais associadas ao sistema de instrumentação local, bem como a elevada dispersão dos resultados, as mudanças inconsistentes nas tendências observadas em função do estado de tensões e os valores de MR significativamente superiores aos normalmente reportados na literatura para materiais estabilizados destinados à pavimentação, entende-se que os resultados obtidos no terço médio

podem ter sido influenciados por fatores externos ao comportamento intrínseco dos compósitos. Dessa forma, para as análises e conclusões desta tese, optou-se por considerar os resultados obtidos com medição dos deslocamentos no topo das amostras como os mais representativos e confiáveis, uma vez que apresentaram maior consistência experimental, comportamento mais coerente com os mecanismos esperados de resposta resiliente e magnitudes compatíveis com aquelas observadas em estudos prévios.

Por fim, ao comparar as metodologias de ensaio, verificou-se que a condição com confinamento representa de forma mais adequada o comportamento dos compósitos, uma vez que o material apresentou resposta claramente dependente do estado de tensões aplicado. O aumento do MR com a elevação das tensões evidencia que a matriz geopolimérica e o esqueleto granular atuam conjuntamente, tornando a rigidez sensível ao confinamento. Assim, a utilização de ensaios sem confinamento tenderia a subestimar a resposta resiliente do material em condições reais de aplicação geotécnica.

Os resultados de MR dos ensaios triaxiais cíclicos são apresentados no Apêndice C (Tab. C.1), contendo os valores calculados pelas normas DNIT 134/2018 – ME e DNIT 181/2018 – ME. Os dados completos referentes à DNIT 181/2018 – ME encontram-se no Apêndice D (Tab. D.1). Os parâmetros obtidos do MR pela norma 181 podem ser observados por meio da Tab. 4.9.

Tabela 4.9 – Parâmetros obtidos do Módulo de Resiliência pela norma 181 (modelo combinado).

Amostra	Parâmetro k1	Parâmetro k2	R^2
C70G30-14 dias (Topo)	675,24	0,49	0,99
C70G30-14 dias (Terço)	1002,15	0,11	0,33
C70G30-28 dias (Topo)	1084,90	0,45	1,00
C70G30-28 dias (Terço)	1425,84	0,41	0,72
C70G30-56 dias (Topo)	2006,02	0,21	0,86
C70G30-56 dias (Terço)	1912,32	-0,64	0,99
C70G30-28 dias (Terço - Imerso)	566,32	0,08	0,88

A Tab. 4.9 mostra que, de forma geral, os compósitos apresentaram aumento do MR com o avanço do tempo de cura, evidenciando a consolidação da matriz geopolimérica e o aumento da rigidez do material. As medições realizadas no topo apresentaram comportamento mais consistente, com elevados coeficientes de determinação (R^2 entre 0,86 e 1,00), indicando boa representatividade dos ajustes e maior confiabilidade dos resultados obtidos. Em contrapartida, as medições realizadas no terço médio apresentaram maior dispersão, incluindo menores coeficientes de ajuste, como observado na amostra de 14 dias (R^2=0,33), além de tendências menos uniformes. Esse comportamento pode estar associado à maior dificuldade de medição das deformações em materiais mais rígidos e cimentados, nos quais pequenas

variações locais ao longo da altura do corpo de prova podem influenciar significativamente a resposta elástica registrada. Ainda assim, observou-se tendência geral de aumento da rigidez com a evolução da cura, enquanto as amostras imersas apresentaram redução do MR em relação às amostras secas, embora mantendo desempenho superior ao do material bruto.

4.3.5 - DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Na Fig. 4.22, tem-se os resultados obtidos de Deformação Permanente para amostras do compósito C70G30 com 14% de umidade, 1,8 g/cm³ de densidade e 7, 14, 28 e 56 dias de cura ao ar pela norma DNIT 179/2018-IE, modelo de Monismith.

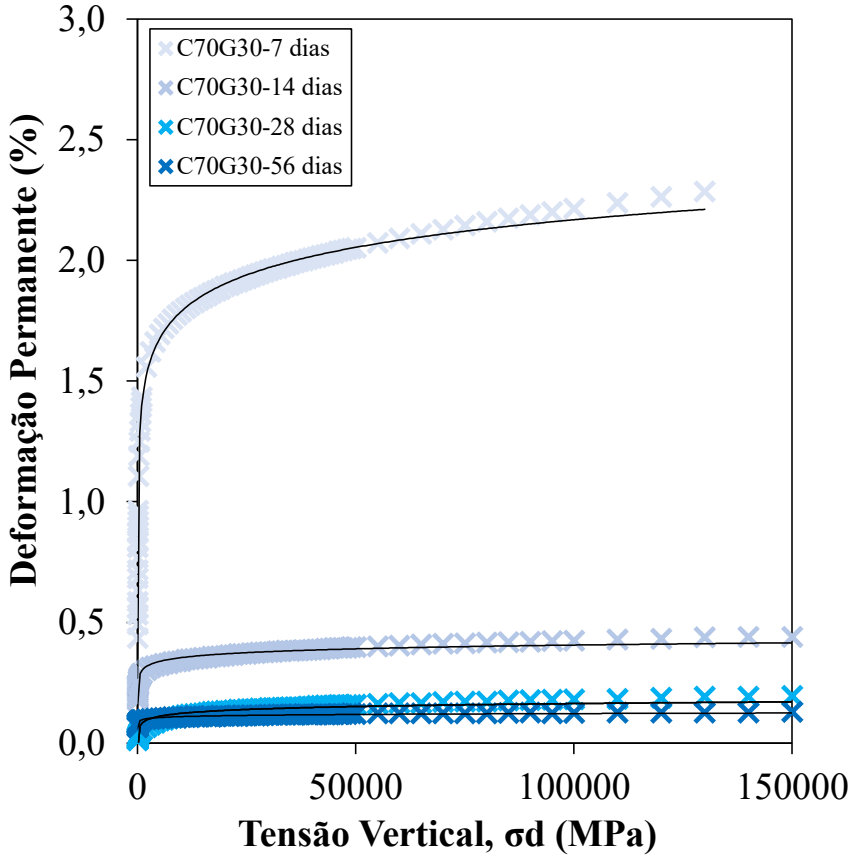


Figura 4.22 – Gráfico dos resultados de Deformação Permanente nos compósitos C70G30.

Na Fig. 4.22, a curva referente a 7 dias de cura apresentou os maiores valores de deformação permanente ao longo de todo o intervalo de tensões verticais, indicando menor capacidade de acomodação plástica e maior suscetibilidade ao acúmulo de deformações irreversíveis. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que, nessa idade, os corpos de prova ainda apresentavam maior teor de umidade residual e uma matriz geopolimérica em estágio inicial de desenvolvimento. Embora as reações de geopolimerização já tenham sido

iniciadas, a formação dos produtos cimentantes e o estabelecimento de uma estrutura mais rígida e contínua ainda não estavam completamente consolidados, resultando em menor resistência à deformação sob carregamentos repetidos.

A curva de 14 dias mostrou redução perceptível dos valores de deformação permanente, evidenciando que a evolução das reações geopoliméricas promoveu ganho significativo de rigidez já nas primeiras semanas de cura. Esse resultado indica que grande parte da estrutura ligante responsável pelo travamento das partículas do coproduto foi desenvolvida entre 7 e 14 dias, proporcionando uma resposta mais estável frente às solicitações cíclicas. Para 28 dias, observou-se comportamento ainda mais favorável, com menor inclinação da curva e tendência mais clara à estabilização da deformação acumulada. Já a curva de 56 dias apresentou os menores valores de deformação permanente, caracterizando o melhor desempenho mecânico sob carregamento cíclico entre todas as idades analisadas, em razão do maior grau de consolidação da matriz geopolimérica e do consequente aumento da rigidez do compósito.

Jiang et al. (2023) avaliaram o comportamento de rejeitos de minério de ferro estabilizados com 10% de cimento, por 7 dias de cura, sob carregamentos cíclicos de diferentes intensidades, representados por razões de carregamento (Rcr) de 0,1, 0,2 e 0,3. Os resultados mostraram aumento progressivo da deformação permanente acumulada com o incremento da solicitação cíclica. Para a condição de menor carregamento (Rcr = 0,1), o material apresentou deformações próximas a 0,25%, caracterizando comportamento próximo à estabilidade plástica. Sob carregamento intermediário (Rcr = 0,2), as deformações acumuladas atingiram valores próximos de 1,4%, indicando maior mobilização da estrutura cimentada. Já para a condição mais severa (Rcr = 0,3), a deformação permanente acumulada alcançou aproximadamente 4,8%, evidenciando a ocorrência de fluência plástica e maior suscetibilidade ao acúmulo de deformações irreversíveis. Embora os procedimentos experimentais sejam distintos dos adotados nesta pesquisa, observa-se que a deformação permanente obtida para os compósitos geopoliméricos aos 7 dias de cura, em torno de 2,5%, encontra-se dentro da faixa reportada por Jiang et al. (2023) para rejeitos estabilizados com cimento.

Os parâmetros obtidos do DP podem ser observados por meio da Tab. 4.10.

Tabela 4.10 – Parâmetros obtidos de Deformação Permanente (Modelo de Monismith).

Amostra	Parâmetro A	Parâmetro B	R^2
C70G30-7 dias	0,51	0,13	0,98
C70G30-14 dias	0,01	0,26	1,00
C70G30-28 dias	0,17	0,08	1,00
C70G30-56 dias	0,06	0,06	0,99

4.4 - CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA

Os resultados dos ensaios para caracterização hidráulica são apresentados a seguir, contemplando os ensaios de sucção, perda de massa por imersão e permeabilidade realizados nas amostras de coproduto bruto e nos compósitos estabilizados com geopolímero em diferentes condições de moldagem e tempos de cura.

4.4.1 - SUCÇÃO

A Fig. 4.23 mostra o gráfico com os resultados obtidos dos ensaios de sucção total com o equipamento WP4C. A análise dos valores evidencia um comportamento não linear, marcado por um rápido desenvolvimento da sucção nos estágios iniciais, seguido por um pico bem definido e posterior redução gradual ao longo do tempo.

Logo no início do período de cura, observou-se que as amostras estabilizadas já apresentavam valores de sucção total superiores aos do coproduto bruto, mesmo antes do avanço significativo do processo de secagem. Enquanto o coproduto bruto apresentou valores iniciais de sucção próximos de 0,20 MPa, os compósitos exibiram sucções iniciais menores, variando aproximadamente entre -28 e -35 MPa, independentemente da massa específica seca ou do teor de umidade. Essa diferença inicial indica que o tratamento promoveu, desde os primeiros instantes, uma maior retenção capilar da água, associada à modificação da estrutura porosa e à presença de produtos de reação capazes de adsorver água, resultando em um estado inicial de sucção mais elevado.

Observou-se aumento acentuado da sucção até aproximadamente 14 dias de cura, seguido por redução gradual e posterior estabilização. Nos primeiros dias (3 e 7 dias), ocorreu a fase mais intensa de secagem, associada à rápida evaporação da água livre e capilar, elevando a sucção para valores entre aproximadamente -70 e -120 MPa. Aos 14 dias, todas as misturas atingiram valores máximos próximos de -145 a -150 MPa. Enquanto o coproduto bruto apresentou maior sensibilidade às condições iniciais de massa específica seca e umidade, os compósitos exibiram valores mais uniformes, indicando uma resposta hidráulica mais estável promovida pelo tratamento geopolimérico. Após esse período, verificou-se redução da sucção, mais pronunciada nos compósitos, atingindo aos 56 dias valores próximos entre todas as misturas (entre -84 a -94 MPa), sugerindo a aproximação do equilíbrio higroscópico e a estabilização da estrutura interna.

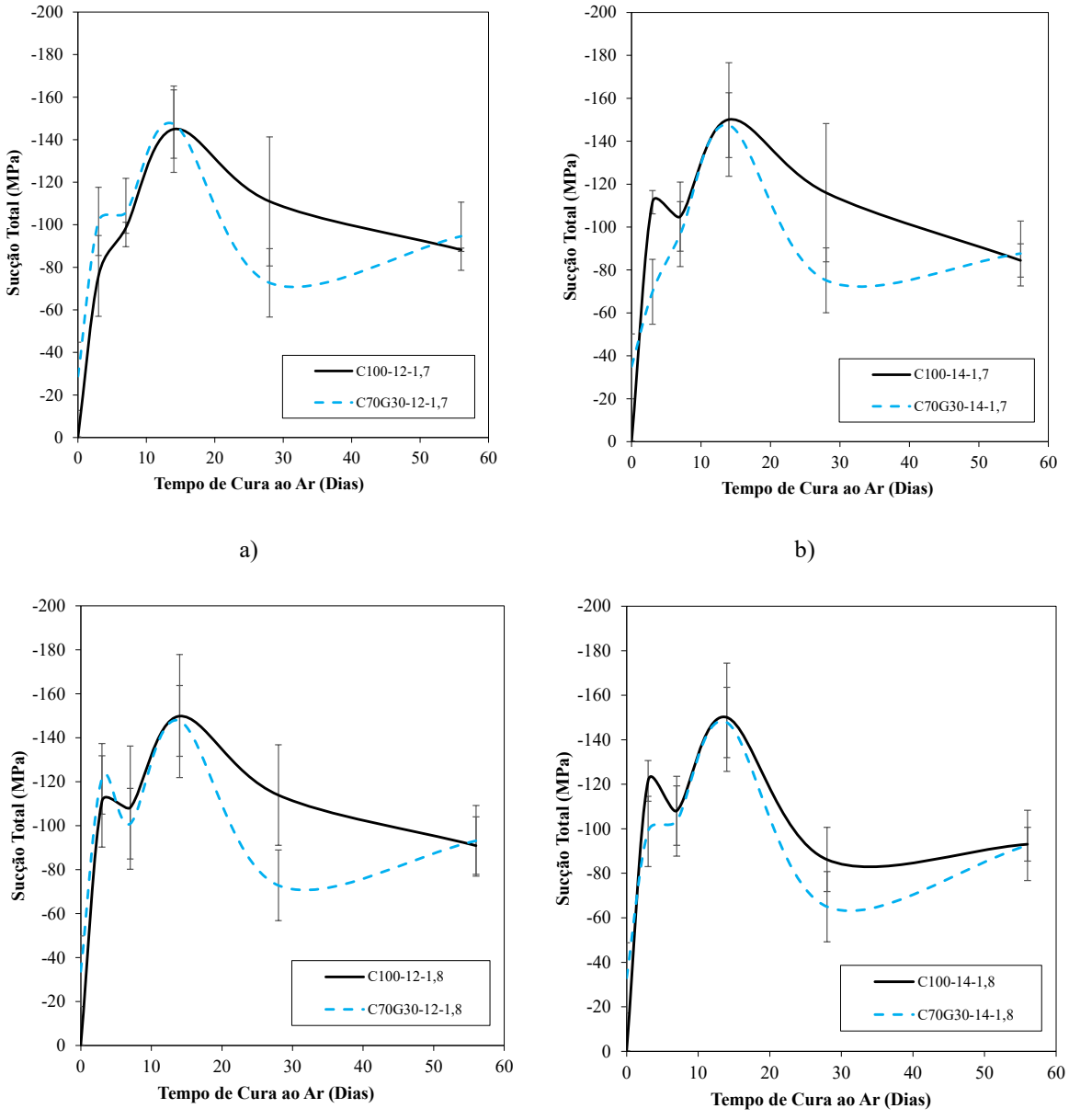


Figura 4.23 – Sucção Total *versus* Tempo de cura ao ar: a) C100-12-1,7 e C70G30-12-1,7; b) C100-14-1,7 e C70G30-14-1,7; c) C100-12-1,8 e C70G30-12-1,8 e d) C100-14-1,8 e C70G30-14-1,8.

4.4.2 - PERDA DE MASSA POR IMERSÃO

Por meio da Fig. 4.24 é possível observar o gráfico de Perda de Massa por Imersão *versus* Tempo de Cura ao Ar.

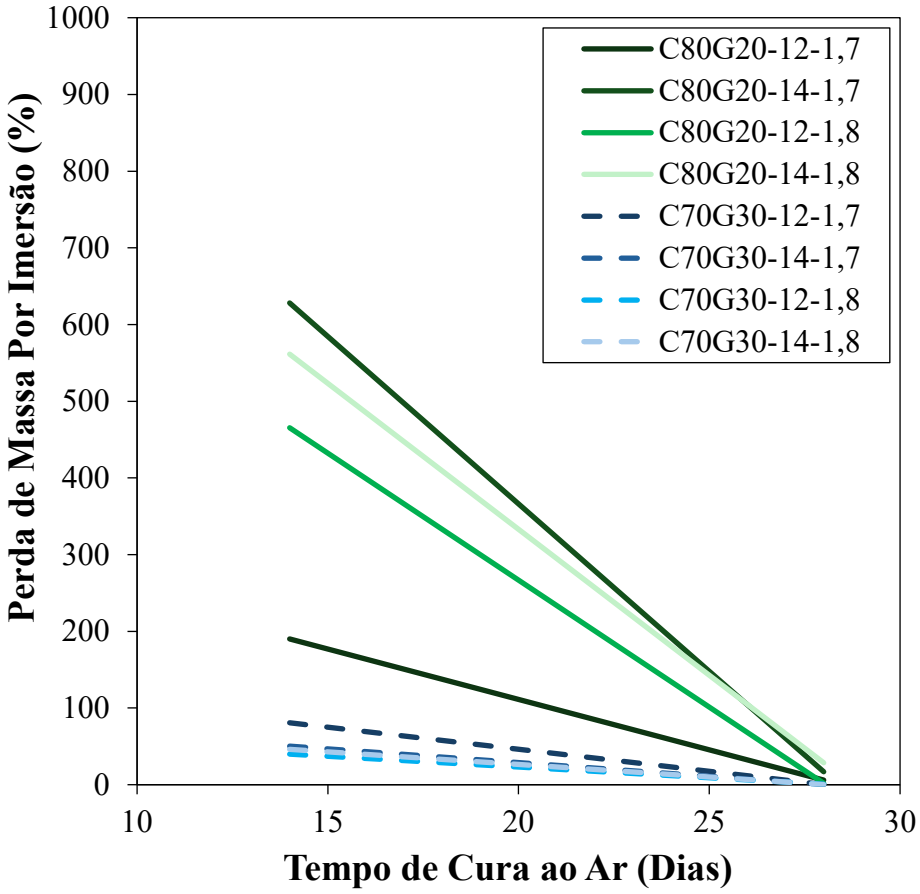


Figura 4.24 – Perda de Massa Por Imersão *versus* Tempo de Cura ao Ar.

Conforme apresentado na Fig. 4.24 e valores indicados na Tab. 4.11, aos 14 dias de cura ao ar observou-se elevada perda de massa para os compósitos C80G20, com valores variando aproximadamente entre 190% e 628%, indicando baixa resistência à imersão nessa idade. Cabe ressaltar que as amostras contendo 20% de geopolímero apresentaram perdas de massa superiores a 100%, pois a degradação não ocorreu apenas na camada superficial exposta ao ensaio (aproximadamente 1 cm), mas também em parte do material interno dos corpos de prova, que se desintegrou durante o processo. Esse resultado indica que a estrutura cimentante formada nessa condição pode não ter sido suficientemente desenvolvida para resistir integralmente aos efeitos da imersão, favorecendo a degradação do material.

As amostras moldadas com 14% de umidade apresentaram, de modo geral, perdas superiores às com 12%, com diferenças que atingiram até 230%, evidenciando forte sensibilidade às condições iniciais. A influência da massa específica seca também se manifestou, embora de forma menos significativa, refletindo a interação entre grau de compactação e suscetibilidade inicial à desagregação.

Em contraste, os compósitos C70G30 apresentaram, aos 14 dias, perdas de massa significativamente menores, variando entre 40% e 81%, o que representa reduções da ordem de 70 a 90% em relação aos compósitos C70G30. Esse comportamento evidencia o efeito positivo do maior teor de geopolímero aplicado (30%), que promove maior coesão inicial e maior resistência à desagregação sob imersão, mesmo em idades iniciais.

Tabela 4.11 - Resultados dos ensaios de Perda de Massa Por Imersão.

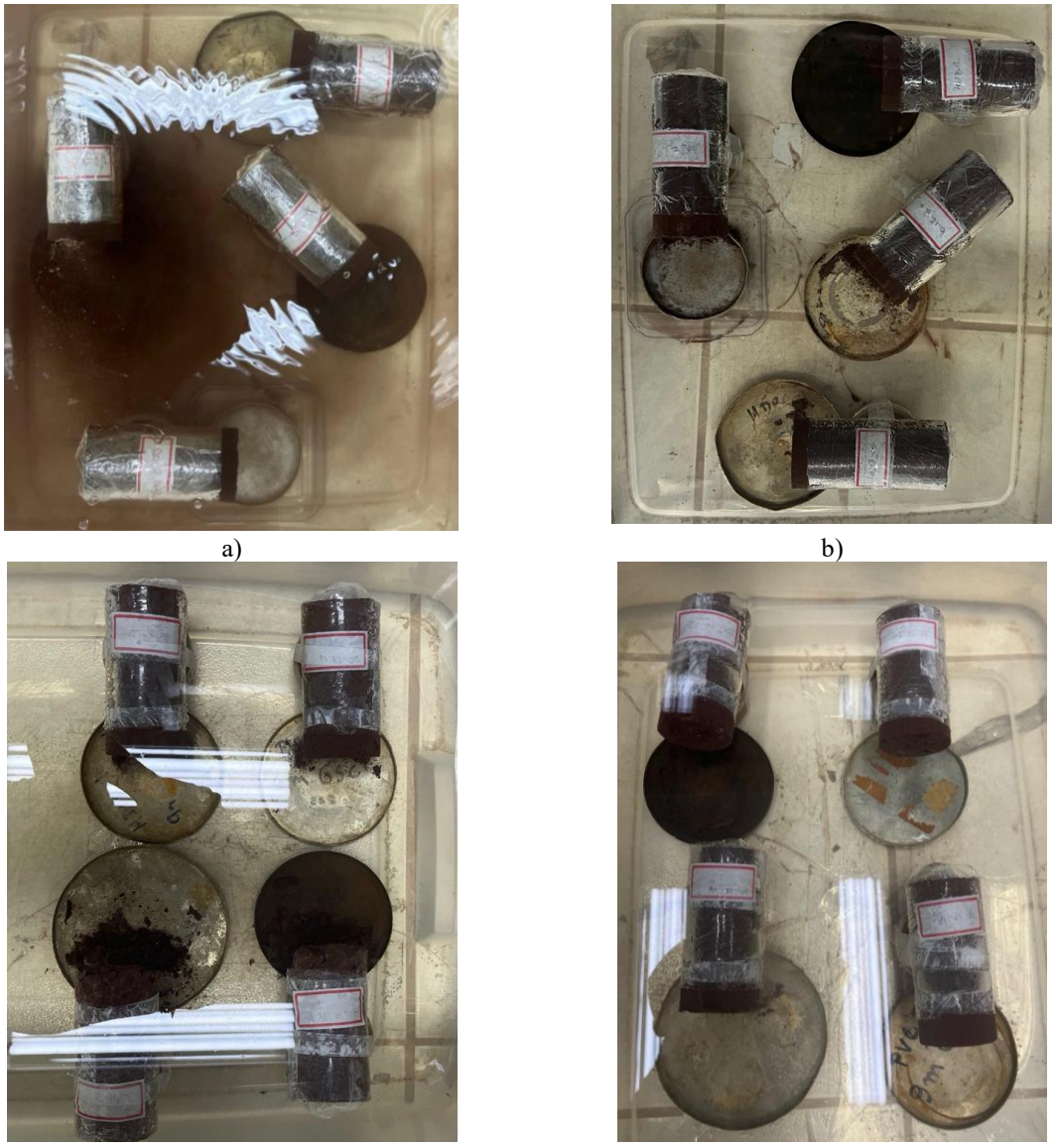
Condição Experimental	**Tempo de Cura ao Ar (Dias)**	
	14	**28**
C80G20-12-1,7	189,99	6,12
C80G20-14-1,7	628,24	16,70
C80G20-12-1,8	465,27	1,64
C80G20-14-1,7	561,45	28,30
C70G30-12-1,7	80,80	0,08
C70G30-14-1,7	50,14	0,16
C70G30-12-1,8	39,71	0,56
C70G30-14-1,7	46,16	0,01

Com o avanço do tempo de cura para 28 dias, conforme ilustrado na Fig. 4.25 e quantificado na Tab. 4.11, verifica-se uma redução drástica da perda de massa para todos os compósitos. Para os compósitos C80G20, os valores diminuíram para a faixa de 1,6 a 28,3%, correspondendo a reduções superiores a 95% em relação aos valores observados aos 14 dias. Apesar dessa melhora expressiva, observa-se maior dispersão e maior sensibilidade ao teor de umidade, especialmente nas amostras com 14%, que mantiveram os maiores valores de perda.

Nos compósitos C70G30, a redução foi ainda mais significativa. Aos 28 dias, as perdas de massa tornaram-se praticamente desprezíveis, variando entre 0,01% e 0,56%, o que representa reduções superiores a 99% em relação aos valores aos 14 dias. Esses resultados indicam que, nessa idade, os compósitos já apresentavam elevada estabilidade frente à ação da água, independentemente da massa específica seca ou do teor de umidade inicial.

De modo geral, os resultados mostraram que o tempo de cura ao ar exerceu papel determinante na resistência à imersão, sendo o intervalo entre 14 e 28 dias crítico para a consolidação da estrutura interna. Além disso, o maior teor de geopolímero (C70G30) mostrou-se decisivo para a redução da suscetibilidade à perda de massa, resultando em comportamento significativamente mais estável e robusto quando comparado aos compósitos C80G20. Esses resultados são coerentes com os ensaios mecânicos e hidráulicos apresentados anteriormente, reforçando que o avanço da cura promove não apenas ganho de rigidez, mas também melhoria substancial da durabilidade dos compósitos em ambiente saturado.

O comportamento reportado é corroborado pelas imagens apresentadas na Fig. 4.25, que mostra as amostras durante a imersão em água.



a) b) c) d)

Figura 4.25 – Amostras ensaiadas quanto à perda de massa por imersão: a) C20G80 - 14 dias de cura; b) C30G70 - 14 dias de cura; c) C20G80 - 28 dias de cura a e d) C30G70 - 28 dias de cura ao ar.

As imagens apresentadas na Fig. 4.25 evidenciaram o efeito combinado do teor de geopolímero e do tempo de cura ao ar na resistência das amostras à perda de massa por imersão. As amostras com 20% de geopolímero e 14 dias de cura (Fig. 4.25a) apresentaram maior desagregação superficial e liberação de material para o meio aquoso, indicando menor estabilidade estrutural nessa condição. Em contraste, as amostras com 30% de geopolímero aos 14 dias (Fig. 4.25b) mostraram menor degradação visível, com manutenção mais evidente da integridade geométrica. Com o aumento do tempo de cura para 28 dias, observa-se melhora significativa do comportamento em ambas as composições, sendo que as amostras com 20% de

geopolímero (Fig. 4.25c) apresentam redução da desagregação, enquanto aquelas com 30% de geopolímero (Fig. 4.25d) exibem elevada coesão e mínima perda de material, corroborando os resultados quantitativos de perda de massa e confirmando a eficácia do maior teor de geopolímero e do tempo de cura na melhoria da durabilidade em meio saturado.

4.4.3 - PERMEABILIDADE

Os resultados dos ensaios de permeabilidade estão expostos conforme a Tab. 4.12.

Tabela 4.12 – Resumo dos resultados dos ensaios de permeabilidade.

Amostra	Ensaio de Permeabilidade	$K_{20\ médio}$ (cm/s)	Velocidade Média (cm/s)
C100-14-1,8	Constante	$1{,}05\ 10^{-3}$	$1{,}07\ 10^{-3}$
C70G30-14-1,8-7 dias	Constante (Triaxial)	$4{,}71\ 10^{-4}$	$4{,}24\ 10^{-3}$
C70G30-14-1,8-14 dias	Constante (Triaxial)	$1{,}52\ 10^{-4}$	$3{,}04\ 10^{-4}$
C70G30-14-1,8-28 dias	Constante (Triaxial)	$9{,}66\ 10^{-5}$	$1{,}93\ 10^{-4}$
C70G30-14-1,8-56 dias	Constante (Triaxial)	$1{,}56\ 10^{-4}$	$1{,}56\ 10^{-3}$
C100-14-1,8	Variável	$2{,}78\ 10^{-4}$	-
C70G30-14-1,8-7 dias	Variável	$6{,}20\ 10^{-4}$	-
C70G30-14-1,8-14 dias	Variável	$5{,}14\ 10^{-4}$	-
C70G30-14-1,8-28 dias	Variável	$2{,}99\ 10^{-4}$	-
C70G30-14-1,8-56 dias	Variável	$3{,}95\ 10^{-4}$	-

Diante de todos os ensaios realizados foi possível observar que os valores de permeabilidade se mantiveram todos próximos, dentro da faixa de 10^{-4} cm/s. Resultado semelhante, de 6,7 x 10^{-4} cm/s, foi obtido por Vizcarra et al. (2025) para o coproduto de rejeito.

Os ensaios de permeabilidade no coproduto de rejeito e no compósito C70G30, de forma geral, indicaram que os valores de coeficiente de permeabilidade médios tiveram ligeira tendência de redução ao longo dos tempos de cura ao ar, contudo, se mantiveram na ordem de grandeza de 10^{-4} cm/s. Dessa forma, entendeu-se que a atuação do geopolímero na massa do coproduto, embora tenha promovido ganhos em termos de resistência mecânica, não alterou significativamente na permeabilidade do material, mesmo em maiores tempos de cura. Esse comportamento pode ser atribuído a propriedades como densidade, distribuição granulométrica, índice de vazios e textura e estrutura do material arenoso (War & Sachar, 2019), bem como à relação sólido-líquido e a razão molar utilizada na pasta geopolimérica. No caso da

granulometria, tanto o coproduto como o resíduo de perlita foram classificados como areias uniformes, mal graduadas, essa estrutura proporciona um arranjo de partículas com tamanho semelhante, em que há uma quantidade insuficiente de partículas menores para preencher os vazios entre as maiores, resultando assim em material mais poroso e mais permeável, pois a água consegue escoar por esses vazios. Nesse caso, a adição do geopolímero não corroborou com uma selagem dos poros capilares, portanto, não alterando a permeabilidade do sistema.

Resultado semelhante foi reportado por Lopes et al. (2025), que investigou o uso de polímeros em um rejeito ultrafino de minério de ferro e constatou que a adição do agente estabilizante não provocou mudanças expressivas na condutividade hidráulica do material, mantendo valores da ordem de 10^{-6} cm/s.

4.5 - ANÁLISES MICROESTRUTURAIS

Os resultados das análises microestruturais obtidos por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microtomografia Computadorizada (micro-CT) são apresentados a seguir, permitindo correlacionar as características da microestrutura com o comportamento observado nos ensaios realizados.

4.5.1 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

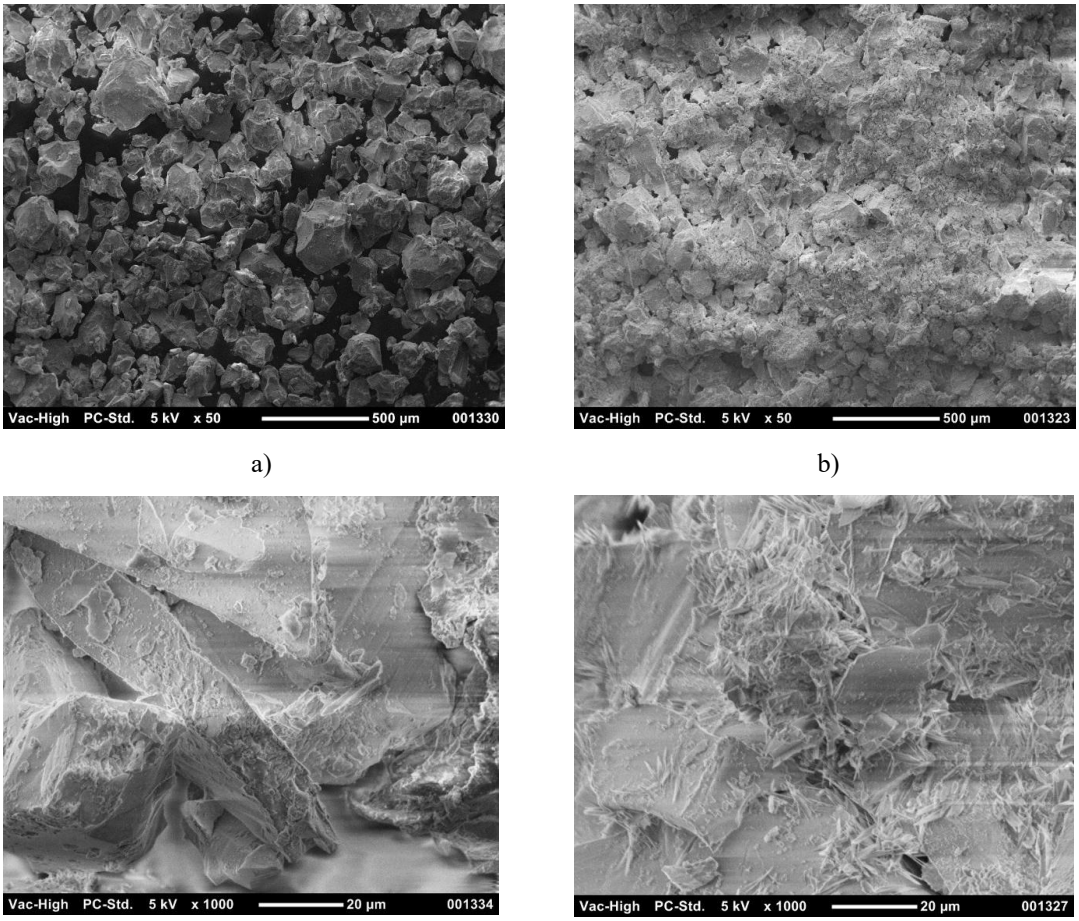
A Fig. 4.26 apresenta imagens de MEV das amostras de coproduto compactado e do compósito geopolimérico compactado após 28 dias de cura, em diferentes ampliações (50 e 1000 vezes).

A Fig. 4.26 evidencia de forma clara as diferenças microestruturais entre o coproduto de rejeito de minério de ferro e o compósito C70G30-14-1,8 após 28 dias de cura, permitindo correlacionar diretamente a microestrutura com o comportamento mecânico e hidráulico observado nos ensaios.

O coproduto bruto apresenta grãos de forma angular e superfície relativamente lisa (Figs. 4.26a e 4.26c), com contatos predominantemente pontuais e presença expressiva de vazios intergranulares. Essa morfologia explica o comportamento essencialmente friccional do material, refletido nos ensaios triaxiais, nos quais se obteve ângulo de atrito interno elevado, porém sem intercepto coesivo, característico de materiais granulares pouco estruturados. Nas ampliações mais elevadas (Figs. 4.26c e 4.26d), observam-se superfícies fraturadas e planos cristalinos bem definidos, reforçando a ausência de uma matriz ligante contínua.

Por outro lado, no compósito estabilizado com geopolímero, observa-se uma alteração significativa da microestrutura. Nas ampliações de 1000 vezes a superfície passa a apresentar aspecto mais contínuo e homogêneo, com redução da individualização dos grãos, assim já não

é possível distinguir claramente as partículas individuais, em razão do efeito adesivo do geopolímero, que recobre e interliga os grãos. Esse comportamento torna-se ainda mais evidente na ampliação de 1.000x (Fig. 4.26d), na qual se observa a adesão matriz–partícula nos pontos de contato, formando pontes sólidas entre os grãos.



a) b)

c) d)

Figura 4.26 – Imagens obtidas por MEV: a) Coproduto bruto (50×); b) Compósito C30G70-14-1,8 (50× - 28 dias); c) Coproduto bruto (1.000×) e d) Compósito C30G70-14-1,8 (1000× - 28 dias).

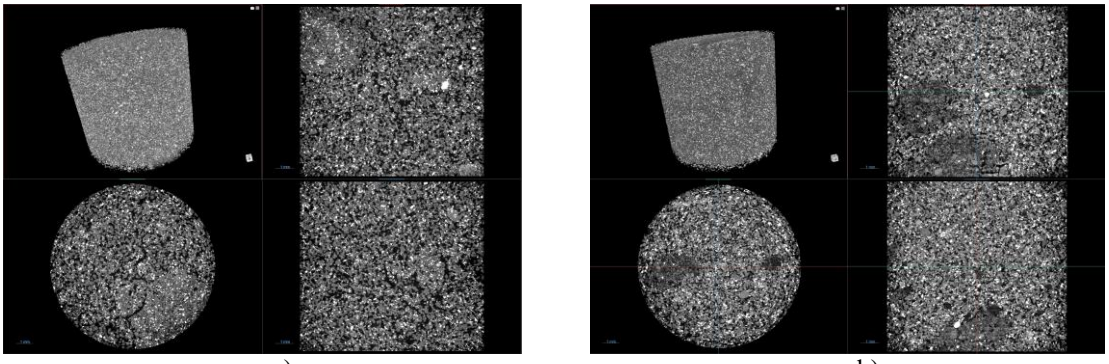
Apesar dessa maior coesão, as imagens também revelam a presença de vazios residuais no compósito, indicando que o geopolímero não atua predominantemente como um preenchedor de poros, mas sim como um agente cimentante, promovendo a aproximação das partículas, a densificação da matriz e a redução da porosidade efetiva. Essa interpretação é coerente com os resultados de permeabilidade, que indicaram manutenção da mesma ordem de grandeza, e com os ganhos observados em resistência e rigidez.

De forma integrada, as imagens de MEV confirmam que a estabilização com geopolímero promoveu uma transição microestrutural de um material granular, pouco coeso, para um compósito com matriz contínua e maior interação matriz–partícula, explicando de

maneira consistente o desenvolvimento de comportamento coesivo, maior resistência mecânica e maior durabilidade, sem a eliminação completa da rede de vazios.

4.5.2 - MICROTOMOGRAFIA

A Fig. 4.27 retrata as imagens obtidas por microtomografia (recomposições tridimensionais e seções ortogonais) do coproduto bruto (C100-14-1,8) e do compósito coproduto-geopolímero (C70G30-14-1,8) submetido a 28 dias de cura ao ar.



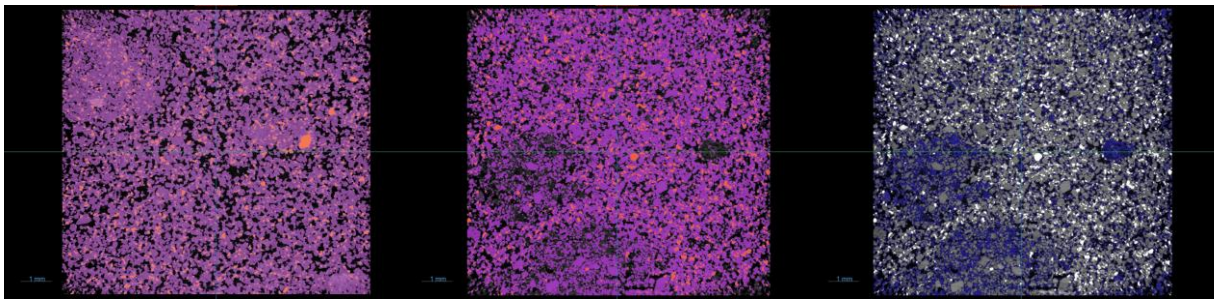
a) b)

Figura 4.27 – Imagens de microtomografia: a) C100-14-1,8 e b) Compósito C70G30-14-1,8 – 28 dias.

Na Fig. 4.27, a fase cinza representa a matriz sólida predominante das amostras, composta majoritariamente por quartzo, conforme evidenciado pelas análises químicas e mineralógicas, correspondendo a mais de 80% da composição do coproduto bruto e a mais de 70% nos compósitos C70G30. A fase em cinza claro está associada à hematita, mineral rico em óxido de ferro, cuja presença também foi confirmada pelas análises anteriores, com teores superiores a 10% tanto no coproduto quanto nos compósitos.

Na Fig. 4.27b, observa-se ainda uma fase em cinza escuro, atribuída à matriz geopolimérica formada durante o processo de estabilização, cuja distribuição pode ser visualizada com maior clareza na seção ortogonal apresentada na Fig. 4.27c. Por sua vez, a fase escura corresponde aos poros e vazios presentes na estrutura interna dos materiais. Observa-se visualmente que o compósito apresenta menor quantidade e distribuição mais descontínua de vazios em comparação ao coproduto bruto, indicando uma microestrutura mais densa e compatível com os ganhos de resistência mecânica observados nos ensaios realizados.

Enquanto as Fig. 4.28a e 4.28b destacam as fases associadas ao quartzo e à hematita presentes no coproduto bruto e no compósito, respectivamente, a Fig. 4.28c evidencia de forma mais nítida a matriz geopolimérica desenvolvida no compósito, permitindo visualizar sua distribuição no interior da amostra.



a) b) c)

Figura 4.28 – Imagens da porosimetria: a) coproduto bruto (Identificação do rejeito + hematita); b) Compósito C70G30-14-1,8 – 28 dias (Identificação do rejeito + hematita) e c) Compósito C70G30-14-1,8 – 28 dias (Identificação do geopolímero).

Já a Tab. 4.13 apresenta os valores de porosidade determinados por microtomografia para os materiais analisados, expressos em porcentagem.

Tabela 4.13 – Resultados das análises de microtomografia.

Amostra	Minerais Densos (%)	Coproduto (%)	Geopolímero (%)	Vazios (%)
C100-14-1,8	4,0	72,8	0,0	23,2
C70G30-14-1,8-28d	6,0	55,0	20,5	18,5

Na Fig. 4.28a, o coproduto bruto apresentou uma estrutura com maior presença e continuidade de vazios, aspecto confirmado pela fração de 23,2% de poros/vazios indicada na Tab. 4.13. A Fig. 4.32a reforça esse comportamento ao mostrar a matriz sólida majoritariamente composta pela fase do rejeito (72,8%) e com participação menor de hematita (4%). Essa configuração é coerente com o desempenho do coproduto nos ensaios mecânicos: um material com resposta predominantemente friccional (sem intercepto coesivo), além de compatível com a tendência de maior permeabilidade e de maior suscetibilidade à desagregação quando imerso, em comparação aos compósitos.

No compósito C30G70 (Fig. 4.28b), observa-se uma microestrutura mais densa e integrada, com redução da fração de vazios para 18,5% (Tab. 4.13), correspondendo a uma diminuição relativa de aproximadamente 20% em relação ao coproduto bruto. A Fig. 4.28b (identificação do rejeito + hematita) evidencia que a matriz sólida do compósito ainda é dominada pela fase do rejeito, porém com redistribuição volumétrica: a fração de rejeito diminuiu de 72,8% para 55%, enquanto a fração clara atribuída à hematita aumentou de 4% para 6%, efeito compatível com o maior contraste e com o rearranjo interno promovido pela presença do ligante. Complementarmente, a Fig. 4.32c destaca especificamente a fase do geopolímero, que ocupou 20,5% do volume, indicando que o agente cimentante se distribuiu

de forma ampla no interior do corpo de prova, promovendo maior continuidade da matriz e maior integração entre partículas.

Esses resultados confirmam que o geopolímero atuou predominantemente como uma agente cimentante e um ponto de contato entre as partículas, promovendo aproximação e conexão entre partículas e reduzindo a porosidade total. Essa leitura está diretamente alinhada às observações por MEV, nas quais se verificou o efeito adesivo e a formação de pontes matriz-partícula, com presença de vazios residuais. Ao mesmo tempo, a microtomografia ajuda a explicar por que, apesar da redução de porosidade, os ensaios de permeabilidade permaneceram na mesma ordem de grandeza: a porosidade diminuiu, mas a rede de vazios não foi completamente interrompida, preservando caminhos de fluxo. Em contrapartida, a redução de vazios e a introdução de uma fase cimentante contínua justificam os ganhos observados em rigidez e resistência (por exemplo, de compressão e MR) e a melhora marcada da durabilidade frente à imersão (redução da perda de massa), uma vez que a matriz mais integrada reduz a desagregação e a mobilização de partículas.

Os *QR Codes* apresentados no Apêndice E permitem acessar os vídeos dos ensaios de microtomografia, contendo a reconstrução tridimensional e os cortes ortogonais do coproduto de rejeito bruto e do compósito coproduto-geopolímero C70G30.

De forma integrada, a microtomografia demonstrou que o compósito apresentou uma estrutura híbrida, composta por fases sólidas provenientes dos minerais da rocha e por uma fase cimentante geopolimérica distribuída no volume, resultando em menor fração de vazios, maior continuidade da matriz e desempenho superior nos ensaios mecânicos e de durabilidade, sem, contudo, eliminar totalmente a conectividade dos poros, em concordância com o comportamento hidráulico observado.

5 - CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como objetivo de avaliar experimentalmente o desenvolvimento de um geopolímero à base de resíduo de perlita aplicado à estabilização de um coproduto de rejeito de minério de ferro, buscando simultaneamente reduzir passivos ambientais, valorizar resíduos industriais e melhorar o desempenho hidromecânico do material, visando seu potencial de aplicação em obras geotécnicas e de infraestrutura. Os resultados demonstraram que a estabilização geopolimérica promoveu ganhos expressivos de resistência, rigidez, durabilidade e integração microestrutural, confirmando a viabilidade técnica da solução proposta. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

- Caracterização física, química, mineralógica e ambiental: As análises evidenciaram que o coproduto apresenta composição predominantemente de sílica (84%) e óxido de ferro (13%), comportamento não plástico e granulometria majoritariamente arenosa, características favoráveis à sua aplicação geotécnica. O resíduo de perlita mostrou-se adequado como precursor aluminossilicato devido aos seus elevados teores de sílica e alumina. Mineralogicamente, o compósito apresentou albita, ausente no coproduto bruto, indicando modificações decorrentes da ativação alcalina (conforme grau de dureza). A predominância de uma matriz amorfa ou semicristalina confirmou que a estabilização ocorreu por mecanismos geopoliméricos. Os ensaios de lixiviação demonstraram que a evolução da geopolimerização influenciou diretamente a mobilidade dos elementos químicos. Enquanto as concentrações de sódio, potássio e silício aumentaram em decorrência da presença dos ativadores alcalinos e da dissolução das fases reativas, observou-se redução das concentrações de alumínio, ferro e magnésio com o avanço da cura, indicando sua incorporação à matriz geopolimérica. Esses resultados evidenciam o potencial do geopolímero em promover a estabilização química e o encapsulamento de constituintes potencialmente móveis do coproduto;
- Resistência à compressão não confinada: Os resultados evidenciaram aumento expressivo da resistência com o incremento do teor de geopolímero e do tempo de cura, especialmente para os compósitos com 30% de geopolímero, atingindo valores superiores a 5 MPa aos 56 dias. Observou-se comportamento típico de material cimentado, com elevada rigidez inicial e ruptura em baixas deformações. A ANOVA confirmou que o teor de geopolímero e o tempo de cura foram os fatores de maior influência sobre a resistência, enquanto a massa específica seca e o teor de umidade atuaram de forma secundária. Adicionalmente, o parâmetro η/Biv mostrou-se adequado

para representar a evolução da resistência dos compósitos, evidenciando a influência conjunta da porosidade e do teor volumétrico de agente cimentante;

- Comportamento drenado e não drenado: Os ensaios triaxiais monotônicos CID e CIU evidenciaram que a estabilização geopolimérica promoveu mudanças significativas no comportamento resistente do material. Enquanto o coproduto bruto apresentou comportamento predominantemente friccional ($c' = 0$ kPa e $\varphi' = 32,7°$), os compósitos estabilizados desenvolveram resistência coesiva associada à formação da matriz geopolimérica. A análise conjunta dos resultados drenados e não drenados permitiu definir uma única envoltória de resistência para cada tempo de cura, evidenciando a consistência do comportamento mecânico dos compósitos. Os maiores ganhos foram observados aos 56 dias de cura, com $c' = 192,5$ kPa e $\varphi' = 29,2°$. Nos ensaios não drenados, observou-se menor geração de poropressões para tensões confinantes de até 1000 kPa, indicando uma estrutura mais rígida e cimentada. Entretanto, para a tensão confinante de 2000 kPa, verificou-se aumento das poropressões, sugerindo uma possível mudança de comportamento sob elevados níveis de confinamento e a necessidade de investigações complementares com tensões confinantes mais elevadas. Em conjunto, os resultados demonstraram a transição de um material essencialmente friccional para um compósito cimentado, com maior resistência, rigidez e estabilidade mecânica.
- Ensaios triaxiais cíclicos de cargas repetidas (MR e DP): Verificou-se aumento significativo da rigidez com o avanço da cura, refletido pelos elevados valores de MR obtidos para os compósitos estabilizados. De modo geral, observou-se tendência de aumento do MR com a elevação tanto da tensão confinante quanto da tensão desvio. As medições realizadas no topo dos corpos de prova apresentaram valores de MR da ordem de 1.300 a 1.800 MPa aos 56 dias de cura, enquanto as medições no terço médio atingiram valores próximos de 10.000 MPa. Embora os resultados do terço médio tenham apresentado tendência semelhante de aumento da rigidez, os valores significativamente mais elevados e algumas inconsistências na resposta aos estados de tensão sugerem possível influência da instrumentação. Assim, as medições realizadas no topo foram consideradas mais representativas do comportamento mecânico dos compósitos. Paralelamente, observou-se redução da suscetibilidade às deformações permanentes, evidenciando o efeito da cimentação geopolimérica na restrição dos deslocamentos plásticos acumulados. Em conjunto, os resultados demonstraram que a estabilização permitiu enquadrar o material em faixas de rigidez compatíveis com aplicações em camadas estruturais de pavimentos;

- Caracterização hidráulica: Com relação ao comportamento hidráulico, os ensaios de sucção indicaram aumento dos valores nas primeiras idades de cura, atingindo aproximadamente 150 MPa. De modo geral, a estabilização promoveu menor variabilidade da sucção em comparação ao coproduto bruto. Entretanto, os ganhos mecânicos observados não podem ser atribuídos exclusivamente à sucção, estando principalmente relacionados à formação da matriz geopolimérica e ao desenvolvimento de ligações intergranulares mais resistentes. Os ensaios de permeabilidade mostraram redução da porosidade efetiva e tendência de diminuição da condutividade hidráulica com a cura; contudo, os coeficientes de permeabilidade permaneceram da ordem de 10^{-4} cm/s devido à manutenção de uma rede de vazios interconectados, posteriormente confirmada pelas análises de microtomografia. Por sua vez, os ensaios de perda de massa por imersão demonstraram aumento significativo da durabilidade dos compósitos com o avanço da cura e o incremento do teor de geopolímero, atingindo reduções superiores a 99% após 28 dias de cura para algumas condições avaliadas, confirmando a consolidação progressiva da matriz geopolimérica e sua capacidade de reduzir a desagregação do material em presença de água;
- Análises microestruturais: As análises microestruturais por MEV e microtomografia confirmaram os mecanismos responsáveis pelos ganhos observados nos ensaios mecânicos e hidráulicos. Verificou-se a formação de uma matriz geopolimérica aderida às partículas do coproduto, atuando como ponte de ligação entre os grãos, reduzindo a porosidade total e promovendo maior integração estrutural do compósito. Embora vazios conectados ainda permaneçam presentes, a redução dos espaços vazios e o desenvolvimento de uma rede cimentante contínua explicam os aumentos observados de resistência, rigidez e durabilidade.

De modo geral, os resultados obtidos demonstraram que a estabilização por geopolímero promoveu melhorias significativas nas propriedades mecânicas e hidráulicas do material, evidenciando o potencial dessa técnica como alternativa sustentável aos métodos tradicionais de estabilização. Sob uma perspectiva mais ampla, esta pesquisa contribui para a transformação de passivos ambientais em materiais com potencial aplicação na engenharia geotécnica, promovendo o reaproveitamento de resíduos industriais, a redução do consumo de recursos naturais e o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis para infraestrutura, em consonância com os princípios da economia circular e do desenvolvimento sustentável.

Destaca-se ainda que, até onde foi possível verificar na literatura consultada, não foram identificados estudos que investigassem a estabilização de coprodutos de rejeito de minério de ferro utilizando geopolímeros à base de resíduo de perlita, associados à avaliação conjunta de resistência à compressão não confinada, resistência ao cisalhamento, comportamento resiliente, sucção, permeabilidade, durabilidade frente à imersão, potencial de lixiviação e caracterização microestrutural. Dessa forma, os resultados obtidos fornecem uma base experimental original para o desenvolvimento de materiais geotécnicos alternativos destinados a aplicações em obras de infraestrutura, especialmente em camadas de pavimentos, aterros e estruturas geotécnicas construídas com materiais provenientes da mineração.

Além disso, a solução proposta apresenta potencial aplicação na compactação e estabilização de pilhas de rejeitos em áreas mineradoras, bem como na execução de camadas de vias não pavimentadas utilizadas na própria operação das minas. Nesses casos, a camada estabilizada com geopolímero poderia atuar simultaneamente como camada de base e de revestimento, dispensando, em determinadas condições de tráfego e solicitação, a execução de um revestimento pavimentado convencional sobrejacente.

5.1 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como indicação de pesquisas futuras, sugere-se:

- Avaliar o comportamento dos compósitos em escala de campo, incluindo monitoramento geotécnico e validação em estruturas reais (aterros, pavimentos e contenções);
- Investigar a influência da temperatura de cura e condições ambientais nas reações de geopolimerização e no desempenho hidromecânico;
- Realizar estudos de durabilidade a longo prazo, incluindo ciclos de umedecimento/secagem, ataque químico e envelhecimento do material;
- Avaliar diferentes ativadores alcalinos e proporções molares (Si/Al e Na/Al) visando otimização do desempenho e redução de impactos ambientais;
- Investigar o uso de outros resíduos industriais como precursores, ampliando o conceito de economia circular;
- Desenvolver estudos de viabilidade econômica e análise de ciclo de vida (ACV) comparando com soluções convencionais à base de cimento Portland.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, A.; ABDULLAH, M.M.A.B.; HUSSIN, K.; YAHYA, Z.; AHMAD, R. & RAZAK, R.A. (2020). Aggregate Impact Value (AIV) of Fly Ash Geopolymer Artificial Aggregate at Different Sodium Hydroxide (NaOH) Concentration. AIP Conference Proceedings, 2291: 020043.

ABDULLAH, A.; HUSSIN, K.; ABDULLAH, M.M.A.B.; YAHYA, Z.; SOCHACKI, W.; RAZAK, R.A.; BLOCH, K. & FANSURI, H. (2021). The Effects of Various Concentrations of NaOH on the Inter-Particle Gelation of a Fly Ash Geopolymer Aggregate. Materials, 14(5): 1111. DOI: 10.3390/ma14051111.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2020). NBR 16843: Solo — Determinação do Índice de Vazios Mínimo de Solos Não Coesivos. Rio de Janeiro, RJ, 20 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2021). NBR 13292: Solo – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Granulares à Carga Constante. Rio de Janeiro, RJ, 13 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2021). NBR 14545: Solo – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos à Carga Variável. Rio de Janeiro, RJ, 16 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2021). NBR 16840: Solo – Determinação do Índice de Vazios Máximo de Solos Não Coesivos. Rio de Janeiro, RJ, 8 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2022). NBR 12770: Solo Coesivo — Determinação da Massa Específica dos Grãos e da Massa Específica Aparente dos Grãos. Rio de Janeiro, RJ, 6 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2024). NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, RJ, 71 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025). NBR 7181: Solo — Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 14 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025). NBR 7182: Solo — Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, RJ, 13 p.

AGERA (2025). Areia Sustentável A1. Nova Lima, MG. Disponível em: <https://agera.co/areia-sustentavel-a1/>. Acesso em: 09 out. 2025.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (2022). Relatório de Gestão 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/relatorio-gestao/relatoriodegestao2022>. Acesso em: 28 de nov. 2023.

ALELVAN, G. M. (2022). Análise Mecânica e Microestrutural de Rejeito de Minério de Ouro Estabilizado com Solução Polimérica. Tese (Doutorado em Geotecnia), Publicação G.DM-343/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 171 p.

ALMEIDA, G.B.O.; CASAGRANDE, M.D.T. & CAVALCANTE, E.H. (2016). Avaliação da Resistência à Compressão Simples de Misturas de Solo e Escória de Cobre Aditivadas com Cimento Portland Aplicadas à Pavimentação. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos

Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), ABMS, Belo Horizonte, MG, Brasil, 8 p. DOI: 10.20906/CPS/CB-01-0016.

AMEEN, S. K.; ABDULKAREEM, A. H. & MAHMOOD, N. S. (2023). Shear Strength Behavior of Organic Soils Treated with Fly Ash and Fly Ash-Based Geopolymer. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 32, 20220264. DOI: 10.1515/jmbm-2022-0264.

ARAÚJO, L.B.R.; BEZERRA, A.K.L.; SILVA, L.A.; CHAVES, A.C.B.; COSTA, H.N. & BABADOPULOS, L.F.A.L. (2023). Estudo das Propriedades Reológicas e Microestruturais De Ligante Geopolimérico À Base De Cinza Volante. Ambiente Construído, 23(2): 181-194. DOI: 10.1590/S1678-86212023000200670.

ARAÚJO, M. T.; FERRAZZO, S. T.; BRUSCHI, G. J.J. & CONSOLI, N. C. (2021). Mechanical and Environmental Performance of Eggshell Lime for Expansive Soils Improvement, Transportation Geotechnics, 31: 100681, ISSN 2214-3912. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100681.

ARCANJO, D. M. O. (2019). Estudo da Aplicação de Aglomerante Álcali-ativado na Estabilização de Solos para Pavimentações. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, BA,159 p.

ASTM INTERNATIONAL – American Society for Testing and Materials (2020). ASTM D4767-11(2020): Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. West Conshohocken, PA, USA, 14 p. DOI: 10.1520/D4767-11R20.

ASTM – American Society for Testing and Materials (2020). ASTM D7181-20: Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. West Conshohocken, PA, USA, 12 p. DOI: 10.1520/D7181-20.

ASTM – American Society for Testing and Materials (2023). ASTM D5550-23: Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer. West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 7 p. DOI: 10.1520/D5550-23.

ASTM – American Society for Testing and Materials (2025). ASTM D6836-25: Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, Centrifuge and Other Methods. West Conshohocken, PA, USA, 27 p. DOI: 10.1520/D6836-25.

ATKINSON, J.H. (1993). An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations. London: McGraw-Hill, 337 p.

ATKINSON, J.H. & BRANSBY, P.L. (1978). The Mechanics of Soils: An Introduction to Critical State Soil Mechanics. London: McGraw-Hill, 375 p.

AVERSA, S.; EVANGELISTA, A.; LEROUEIL, S. & PICARELLI, L. (1993). Some Aspects of the Mechanical Behaviour of "Structured" Soils and Soft Rocks. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GEOTECHNICAL ENGINEERING OF HARD SOILS–SOFT ROCKS, Athens, Greece, 20–23 Sept. 1993. Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Engineering of Hard Soils–Soft Rocks. Rotterdam: A.A. Balkema, pp. 359–366.

AZEVEDO, A. G. S.; STRECKER, K.; ARAÚJO JR., A. G. & SILVA, C. A. (2017). Produção de Geopolímeros à Base de Cinza Volante Usando Soluções Ativadoras com Diferentes Composições de Na_2O e Na_2SiO_3. Cerâmica, 63(366), 143–151. DOI: 10.1590/0366-69132017633662078.

AZEVEDO, A. G.; STRECKER, K. & LOMBARDI, C. T. (2018). Produção de Geopolímeros à Base de Metacaulim e Cerâmica Vermelha. Cerâmica, 64: 388-396. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132018643712420.

BARATI, S.; SHOURIJEH, P. T.; SAMANI, N. & ASADI, S. (2020). Stabilization of Iron Ore Tailings with Cement and Bentonite: A Case Study on Golgohar Mine. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79, 4151–4166. DOI: 10.1007/s10064-020-01843-6.

BARBOSA, R. C. (2021). Estabilização de Um Solo Com Geopolímero Para Aplicação Em Camadas de Pavimentos Semirrígidos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 141 p.

BARDEN, L.; ISMAIL, H. & TONG, P. (1969). Plane Strain Deformation of Granular Material at Low and High Pressures. Géotechnique, 19(4): 441–452. DOI: 10.1680/geot.1969.19.4.441.

BONG, S.H.; NEMATOLLAHI, B.; NAZARI, A.; XIA, M. & SANJAYAN, J. (2019). Method of Optimisation for Ambient Temperature Cured Sustainable Geopolymers for 3D Printing Construction Applications. Materials, 12(6): 902. DOI: 10.3390/ma12060902.

BRAGA, F. Y. A. (2021). Utilização de Tecnologias de Filtragem de Rejeitos Para Empilhamento a Seco. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 74 p.

BRASIL. (2020). Lei nº 14.006, de 28 de maio de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração).

BUNTECH (2026). Filtrantes e Clarificantes. Buntech Tecnologia em Insumos, Indaiatuba, SP. Disponível em: <https://buntech.com.br/areanegocio.jsp?id=4DO2L596PCOP718LF1IC1J>. Acesso em: 02 mar. 2026.

BURGOS, L. R. (2019). Influencia de Finos de Perlita Para la Fabricación de Ladrilhos y Bloques. Uso em Viviendas Sociales. IV Jornada de Intercambio y Difusión de los Resultados de Investigaciones de los Doctoradis en Ingenieria, Buenos Aires, Argentina, 6 p.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; ANGELIM, R. R & PEREIRA, C. H. F. (2016). Parâmetros da Areia que Influenciam a Consistência e a Densidade de Massa das Argamassas de Revestimento. Matéria (Rio de Janeiro), v. 21, n. 3, pp. 714–729. DOI: 10.1590/S1517-707620160003.0068.

CASTRO, J. F. A. (2015). Melhoramento de Um Solo Arenoso Por Ativação Alcalina. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 91 p.

CELIK, A. G.; KILIC, A. M. & CAKAL, G. O. (2013). Expanded Perlite Aggregate Characterization for Use as a Lightweight Construction Raw Material. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 49(2), 689–700. DOI: 10.5277/ppmp130227.

CHANTA, S. & PALAZZI, S. B. (2017). Estudio Del Comportamiento Del Residuo de la Perlita Expandida (RPE) En la Estabilización de Suelos. XVII Congreso Argentino de Vialidady Tránsito, Buenos Aires, Argentina, 21 p.

CHAO, X.; HAN, C.; SHAO, C.; WANG, C.; WEN, P. & WANG, C. (2024). Recent Advances in Properties and Application Progress of Cement-Based Materials with Iron Tailing. Sustainability, 16(23): 10631. DOI: 10.3390/su162310631.

CHEN, S.; RUAN, S.; ZENG, Q.; LIU, Y.; ZHANG, M.; TIAN, Y. & YAN, D. (2022). Pore Structure of Geopolymer Materials and Its Correlations to Engineering Properties: A Review. Construction and Building Materials, 328, 127064. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127064.

COELHO, P.H.N.; SONCIM, S.P.; OLIVEIRA, C.A.S.; ALMEIDA, M.O.; CAMPOS, R.J.; PEREIRA, L.R.; MEDEIROS, K.P.M.; CUNHA, P.M.P.; SILVA NETO, J.C.A. & BENTO, L.R. (2024). Areia de Minério de Ferro: Um Material Alternativo e Sustentável Para Utilização em Camadas de Pavimentos. 38º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Florianópolis, SC, Brasil, 5 p.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (2005). Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005: Dispõe sobre a Classificação dos Corpos de Água e Diretrizes Ambientais para o seu Enquadramento, bem como Estabelece as Condições e Padrões de Lançamento de Efluentes. Brasília, DF, 27 p.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (2009). Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009: Dispõe sobre Critérios e Valores Orientadores de Qualidade do Solo quanto à Presença de Substâncias Químicas e Estabelece Diretrizes para o Gerenciamento Ambiental de Áreas Contaminadas por essas Substâncias em Decorrência de Atividades Antrópicas. Brasília, DF, 16 p.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (2011). Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011: Dispõe sobre as Condições e Padrões de Lançamento de Efluentes, Complementa e Altera a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Brasília, DF, 8 p.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L. & HEINECK, K. S. (2007). Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133 (2): 197-205.

CONSOLI, N.C., DA FONSECA, A.V., CRUZ, R.C., SILVA, S.R. & FONINI, A. (2012). Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. Géotechnique, 62(2): 177-183.

CONSOLI, N.C., FESTUGATO, L., ROCHA, C.G. & CRUZ, R.C. (2013). Key parameters for strength control of rammed sand-cement mixtures: influence of types of portland cement. Construction and Building Materials, 49: 591-597.

CONSOLI, N. C.; MARQUES, S. F. V.; FLOSS, M. F. & FESTUGATO, L (2017a). Broad-spectrum empirical correlation determining tensile and compressive strength of cement-bonded clean granular soils. Journal of Materials in Civil Engineering, 29(6): 1–7.

CONSOLI, N.C.; SALDANHA, R.B.; MALLMANN, J.E.C.; PAULA, T.M. & HOCH, B.Z. (2017b). Enhancement of Strength of Coal Fly Ash-Carbide Lime Blends through Chemical and Mechanical Activation. Construction and Building Materials, 157: 65-74. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.091.

CONSOLI, N. C.; WINTER, D.; LEON, H. B. & SCHEUERMANN FILHO, H. C (2018). Durability, strength, and stiffness of green stabilized sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 144 (9): 1-10.

CONSOLI, N. C.; LEON, H. B.; CARRETTA, M. S.; DARONCO, J. V. L. & LOURENÇO, D. E. (2019). The Effects of Curing Time and Temperature on Stiffness, Strength and Durability of Sand-Environment Friendly Binder Blends. Soils and Foundations, 59(5): 1428–1439. DOI: 10.1016/j.sandf.2019.06.007.

CONSOLI, N.C., JASKULSKI, F.M., FRACARO, T.P., BRUSCHI, G.J., FERRAZZO, S.T., ARAÚJO, M.T., LOTERO CAICEDO, A.M. & SILVA, J.P.S. (2025). Performance and microstructural evolution of one-part alkali-activated cement in tailings stabilization. Minerals, 15(7): 745. DOI: 10.3390/min15070745.

COOP, M. R. & ATKINSON, J. H. (1994). Discussion: The Mechanics of Cemented Carbonate Sands. Géotechnique, 44(3): 533–537. DOI: 10.1680/geot.1994.44.3.533.

COSTA, H. N.; CABRAL, A. E. B. & NOGUEIRA, R. E. F. (2022). Cimento álcali-ativado. Ciência e Engenharia de Materiais: Princípios e Fundamentos em Pesquisa. Editora Científica, 2(1): 11-29. DOI: 10.37885/221110900.

CRUZ, N.; MATEUS, C.; RIOS, S.; VIANA DA FONSECA, A. & RODRIGUES, C. (2016). Solos Estabilizados com Geopolímeros Para Estradas de Baixo Custo. 8º Congresso Rodoviário Português, Portugal, 10 p.

CUCCOVILLO, T. & COOP, M. R. (1999). On the Mechanics of Structured Sands. Géotechnique, 49(6): 741–760. DOI: 10.1680/geot.1999.49.6.741.

CUNHA, J.T.; FERREIRA, I.C.; CAMPOS, L.J.F.; GALERY, R. & MAZZINGHY, D.B. (2025). Geopolymer As An Alternative Stabilizer of Waste and Tailings From Iron Mining. Tecnol. Metal. Mater. Min., São Paulo, 22: e3201, 8 p. DOI: 10.4322/2176-1523.2025.3201.

DAVIDOVITS, J. (1982). Patente 4.349.386: Mineral Polymers and Methods of Making Them, 6 p.

DAVIDOVITS, J. (1989). Geopolymers and Geopolymeric Materials. Journal of Thermal Analysis, Vol. 35, 429-441.

DAVIDOVITS, J. (1991). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials, Journal of Thermal Analysis, 37: 1633-1656.

DAVIDOVITS, J. (2013). Geopolymer Cement: A Review. Geopolymer Science and Technics, Technical Paper #21, Geopolymer Institute Library, Saint-Quentin, France, 11 p.

DAVIDOVITS, J. (2014). Alkali Activated Materials are NOT Geopolymers - Part 1 (vídeo). Disponível em: < https://www.youtube.com/watch?v=3QGUCHt0tDs>. Acesso em 30 nov. 2023.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A. & ZUSSMAN, J. (2013). An Introduction to the Rock-Forming Minerals. 3. ed. London: The Mineralogical Society. ISBN 978-0-903056-33-5.

DIAMBRA, A., IBRAIM, E., PECCIN, A., CONSOLI, N.C. & FESTUGATO, L. (2017). Theoretical derivation of artificially cemented granular soil strength. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 143(5): 04017003.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2018). DNIT 134/2018-ME: Pavimentação – Solos – Determinação do Módulo de

Resiliência – Método de Ensaio. Brasília, DF, 18 p. Versão corrigida publicada em 20 abr. 2023.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2018). DNIT 179/2018-IE: Pavimentação – Solos – Determinação da Deformação Permanente – Instrução de Ensaio. Brasília, DF, 20 p. Versão corrigida em 20 abr. 2023.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2018). DNIT 181/2018-ME: Pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio. Brasília, DF, 16 p. Versão corrigida em 20 abr. 2023.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2023). DNIT 228/2023-ME: Solos – Ensaio de Compactação em Equipamento Miniatura – Método de Ensaio. Brasília, DF, 17 p.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2023). DNIT 258/2023-ME: Solos – Compactação em Equipamento Miniatura – Ensaios Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão – Método de Ensaio. Brasília, DF, 22 p.

DUAN, J.; WU, J.; SU, Y.; LIN, Y.; LI, Y. & LIU, L. (2024). Shear Behaviors of Expansive Soils Over a Wide Confining Pressures Range and Their Impacts on Strength Parameters. Transportation Geotechnics, 48, 101328. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101328.

DUARTE, G.M.C.; SILVA, F.G.P.A.; PEREIRA, Y.S.; LAMEIRAS, F.S. (2019). Desenvolvimento de Argamassa Geopolimérica Incorporando o Sedimento de Candonga. XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa – ENTMME, Belo Horizonte, MG, Brasil, 4–8 nov. 2019, 1–8.

DUXSON, P.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; MALLICOAT, S. W.; KRIVEN, W. M. & VAN DEVENTER, J. S. J. (2005). Understanding the Relationship Between Geopolymer Composition, Microstructure and Mechanical Properties. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 269(1–3), 47–58. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2005.06.060.

EL-MIR, A.; HWALLA, J.; EL-HASSAN, H.; ASSAAD, J.J.; EL-DIEB, A. & SHEHAB, E. (2023). Valorization of Waste Perlite Powder in Geopolymer Composites. Construction and Building Materials, 368: 130491. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130491.

ELOI, D. M. (2021). Ensaios triaxiais com procedimentos convencionais e avançados para avaliação de estados críticos em rejeitos de ferro. Dissertação (Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 122 p.

FASSEL, V. A & KNISELEY, R. N. (1974). Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectroscopy. Analytical Chemistry, 46 (13), 1110 A, 11 p.

FATTAHI, S. M.; ZAMANI, S.; IMANI, M. & HEYDARI, A. (2025). Sustainable Stabilization of Sandy Soil Using Alkali-Activated Construction Waste Binders. Research Square (Preprint), 62 p. DOI: a definir/publicação em preprint.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. & PALOMO, A. (2005). Mid-infrared spectroscopic studies of alkali- -activated fly ash structure. Microporous and Mesoporous Materials, 86(1–3): 207–214.

FIGUEIREDO, R. A. M., BRANDÃO, P. R. G., SOUTSOS, M., HENRIQUES, A. B., FOURIE, A., & MAZZINGHY, D. B. (2021). Producing Sodium Silicate Powder From Iron Ore Tailings For Use As An Activator In One-Part Geopolymer Binders. Materials Letters, 288: 129333.

FONSECA, H. G. A; ALEXANDRINO, J. S. & FERREIRA, T. E. D. (2019). Metodologias de Disposição de Rejeitos de Minério de Ferro Para Substituir as Barragens de Rejeito. Profiscientia (Periódico Multidisciplinar do Instituto Federal do Mato Grosso), Cuiabá, Mato Grosso, n° 12, 54-72.

FONTES, M. M. M.; CORRÊA, M. D. O.; SANTOS, A. M.; PAIVA, A. B. S. P. & VIEIRA, G. M. D. (2024). Use of a Natural Inorganic Binder to Improve the Mechanical Properties of Mining Tailings. In: Proceedings of the XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE 2024), Lisboa, Portugal. p. 2288–2291. DOI: 10.1201/9781003431749-436.

FOPPA, D. (2005). Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, RS, 144 p.

GAMA, E.M., CORDEIRO, R.A.C. & SEERIG, T. (2015). Metakflex - o cimento de argilas: novo produto e nova receita para a eliminação de barragens de estéreis na mineração. Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG, 24(1-2).

GANESAN, S.; KUO, M. & BOLTON, M. (2014). Influences on Pipeline Interface Friction Measured in Direct Shear Tests. Geotechnical Testing Journal, 37(1): 94–106. DOI: 10.1520/GTJ20130008.

GHADIR, P., ZAMANIAN, M., MAHBUBI-MOTLAGH, N., SABERIAN, M., LI, J., & RANJBAR, N. (2021). Shear Strength And Life Cycle Assessment Of Volcanic Ash-Based Geopolymer And Cement Stabilized Soil: A Comparative Study. Transportation Geotechnics, 31, 100639.

GHORBANIPOUR, A.; HAMIDI, A.; FINI, E.H. (2026). Stabilization and Solidification of Iron Ore Tailings Using Alkali-Activated Geopolymer. Scientific Reports, 16: 57124. DOI: 10.1038/s41598-026-57124-x.

GOLEV, A.; GALLAGHER, L.; VANDER VELPEN, A.; LYNGGAARD, J. R.; FRIOT, D.; EKUBATSION, L. H.; FRANKS, D. M.; SEGURA-SALAZAR, J.; LAKE, N.; HOBBS, G.; HILL, A. & MACFARLANE, A. (2022). Ore-Sand: A Potential New Solution to the Mine Tailings and Global Sand Sustainability Crises. Final Report. Version 1.4 (March 2022). Brisbane: The University of Queensland; Geneva: University of Geneva. DOI: 10.14264/503a3fd.

GOMES, M.F.M. (2009). Metodologia de Análise Hierárquica Aplicada para Escolha do Sistema de Disposição de Subproduto da Mineração com Ênfase nos Rejeitos de Minério de Ferro. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia, Ouro Preto, MG, 193 p.

GRZESZCZYK, S. & JANUS, G. (2021). Lightweight Reactive Powder Concrete Containing Expanded Perlite. Materials, 14(12): 3341. DOI: 10.3390/ma14123341.

GUIMARÃES, A.C.R. (2009). Um Método Mecanístico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos. Tese de

Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 363 p.

HARDJITO, D. & RANGAN, B. V. (2005). Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Research Report GC 1. Perth: Faculty of Engineering, Curtin University of Technology. 103 p.

HAYDER, M. R.; ZIARI, H.; SHABAN, A. M. (2025). Strength and Microstructural Characteristics of Sand Soils Stabilized with Paper Sludge Ash-Based Geopolymer. Scientific Reports, 15: 8752. DOI: 10.1038/s41598-025-92813-z.

HUANG, M.; QIU, Z.; BAO, S.; ZHANG, Y.; ZHOU, Z.; YANG, S. & KE, X. (2025). Green Low-Carbon Approach for the Preparation of Solid Waste-Based Geopolymer: One-Part Geopolymer vs. Two-Part Geopolymer. Journal of Environmental Chemical Engineering, 13(3): 116270. DOI: 10.1016/j.jece.2025.116270.

IBRAM (2026). Mineração Aumenta Faturamento na Balança Comercial em 2025. Instituto Brasileiro de Mineração, Brasília, DF. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/mineracao-faturamento-balanca-comercial-2025/>. Acesso em: 06 abr. 2026.

JAHANSHAHI, F.S. & GHANIZADEH, A.R. (2024). Compressive Strength, Durability, and Resilient Modulus of Cement-Treated Magnetite and Hematite Iron Ore Tailings as Pavement Material. Construction and Building Materials, 447: 138076. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138076.

JIA, R. & CHU, Z. (2025). Triaxial Mechanical Properties and Microstructure of Tianjin Clay Stabilized with Fly Ash-Based Geopolymer. Soils and Foundations, 65: 101687. DOI: 10.1016/j.sandf.2025.101687.

JIANG, P.; LIU, Y.; ZHANG, Y.; WANG, J. & ZHAO, G. (2023). Cumulative Deformation and Damage Evolution of Fiber-Cement Improved Iron Tailings under Cyclic Load. International Journal of Geomechanics, 23(4): 04023004. DOI: 10.1061/IJGNAI.GMENG-8103.

KAN, L.; CHEN, H. & GAN, Y. (2025). Synergistic Activation of High Ductility Slag-Based Geopolymer Composite Using Red Mud and NaOH-Na_2SiO_3 Mixture. Construction and Building Materials, 491: 142739. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142739.

KASAMA, K.; OCHIAI, H. & YASUFUKU, N. (2000). On the Stress-Strain Behaviour of Lightly Cemented Clay Based on an Extended Critical State Concept. Soils and Foundations, 40(5): 37–47. DOI: 10.3208/sandf.40.5_37.

KIM, Y. & PARK, H. (2020). A Value-Added Synthetic Process Utilizing Mining Wastes and Industrial Byproducts For Wear-Resistant Glass Ceramics. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 8(5): 2196-2204. DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b05884.

KLEIN, C. & DUTROW, B. (2012). Manual de Ciência dos Minerais. 23. ed. Porto Alegre: Bookman. 716 p. ISBN 978-85-7780-963-9.

LEROUEIL, S. & VAUGHAN, P. R. (1990). The General and Congruent Effects of Structure in Natural Soils and Weak Rocks. Géotechnique, 40(3): 467–488. DOI: 10.1680/geot.1990.40.3.467.

LEWICKA, E. D. (2020). Rational Use of Selected Mining By-Products In The Ceramic Industry In Poland. Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management, 36(1), pp.59–76. https://doi.org/10.24425/gsm.2020.132547.

LOPES, M.M.; FERREIRA, J.W.S. & CASAGRANDE, M.D.T. (2025). Stabilization of Ultrafine Iron Tailings with Acrylic–Styrene Copolymer for Sustainable Geotechnical Applications. Polymers, 17(19): 2624. DOI: 10.3390/polym17192624.

LU, Y.; ABUEL-NAGA, H.; LEONG, E.-C. & SHANG, Z. (2023). Reliability of Chilled-Mirror Hygrometer (WP4C) for Soil Total Suction Measurement. Geotechnical Testing Journal, ASTM International, 47(2). DOI: 10.1520/GTJ20230387.

LUUKKONEN, T.; ABDOLLAHNEJAD, Z.; YLINIEMI, J.; KINNUNEN, P. & ILLIKAINEN, M. (2018). One-Part Alkali-Activated Materials: A Review. Cement and Concrete Research, v. 103, p. 21–34. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.10.001.

MARKOSKA, V.; LISICHKOV, K.; BOEV, B. & GULABOSKI, R. (2018). The Influence of the Perlite as a Substrate for Improving on Some Water Properties on the Fluvial Soil with an Application of Retentional Curves. Journal of Agriculture and Plant Sciences, 16(1): 73-82.

MASHAAN, N. & YOGI, B. (2025). Mining Waste materials in Road Construction. Encyclopedia, 5(2): 83. DOI: 10.3390/encyclopedia5020083.

MESAVILLA, D.T.; FESTUGATO, L.; SILVA, J.P.S.; DALLA ROSA, F. & CONSOLI, N.C. (2026). Multiaxial Behavior of Cemented Iron Ore Tailings: Influence of Curing Time and Cementation. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 12: 26. DOI: 10.1007/s40891-026-00710-w.

METER GROUP. (2025). WP4C – Soil Water Potential Instrument. Pullman, WA, USA. Disponível em: < https://metergroup.com/br/products/wp4c/?srsltid=AfmBOoqb7OI1zIcvfEgq_k-mu_EZWD2KbAnK5tOm-LOFOEZC8mP40L6B>. Acesso em: 08 jun. 2025.

MITCHELL, J. K. & SOGA, K. (2005). Fundamentals of Soil Behavior. 3. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 577 p. ISBN 0-471-46302-7.

MOHAMMADINIA, A.; ARULRAJAH, A.; SANJAYAN, J.; DISFANI, M.M.; BO, M.W.; DARMAWAN, S. (2016). Stabilization of Demolition Materials for Pavement Base/Subbase Applications Using Fly Ash and Slag Geopolymers: Laboratory Investigation. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(11): 04016033. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001526.

MONISMITH, C.L.; OGAWA, N. & FREEME, C.R. (1975). Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils Due to Repeated Loading. In: 54th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, USA, 13–17 Jan. 1975. Transportation Research Record, 537: 1-17.

MONTGOMERY, D. C. (2019). Design and Analysis of Experiments. 10th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 752 p. ISBN: 9781119492443.

MORALES, D.P.; ORELLANA, J.E.; LOTERO, A.; MONCALEANO, C.J. & CONSOLI, N.C. (2024). Potencial de Reutilização de Rejeitos de Estanho dos Andes em Obras Geotécnicas Por Meio da Estabilização com Ligante Geopolimérico. Engenharia Geotécnica e Geológica, 42(7): 6071-6093. DOI: 10.1007/s10706-024-02876-4.

NEGAHDAR, H. & TOHIDI, A. (2025). Assessment of Geopolymer and Cement Stabilizers on Geotechnical Properties of Heavy Metal-Contaminated Clay. Scientific Reports, 15: 25527. DOI: 10.1038/s41598-025-04514-2.

OKUYUCU, D.; TURANLI, L.; UZAL, B. & TANKUT, T. (2011). Some Characteristics of Fibre-Reinforced Semi-Lightweight Concrete with Unexpanded Perlite. Magazine of Concrete Research, 63(11): 837-846. DOI: 10.1680/macr.2011.63.11.837.

OLIVEIRA, T. M.; GENEROSO, F. J.; SILVA, T. O.; SANT'ANNA, G. L.; SILVA, C. H. C. & PITANGA, H. N. (2019). Geomechanical Properties of Mixtures of Iron Ore Tailings Improved with Portland Cement. Acta Scientiarum. Technology, 41, e38038. DOI: 10.4025/actascitechnol.v41i1.38038.

OLIVEIRA, T.G.; MENDES, G.C.; PEREIRA, E.L.P. & FERREIRA, L.D. (2016). Análise Comparativa entre o Granulômetro a Laser e o Método Convencional de Granulometria por Sedimentação. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), ABMS, Belo Horizonte, MG, Brasil, 6 p. DOI: 10.20906/CPS/CB-01-0042.

OMURO, H.; SATOMI, T. & TAKAHASHI, H. (2022). Effect of the Additive Amount of Perlite By-Products on Compressive Characteristics and Durability of Fiber-Cement-Stabilized Soil. Advanced Experimental Mechanics, 7: 143-148. DOI: 10.11395/aem.7.0_143.

OYEBISI, S.; EDE, A.; OLUTOGE, F.; OFUYATAN, O. & OLUWAFEMI, J. (2018). Influence of Alkali Concentrations on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete. International Journal of Civil Engineering and Technology, 9(8): 734-743.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W. & BLANCO-VARELA, M. T. (1999). Alkali-Activated Fly Ashes – A Cement For The Future. Cement and Concrete Research, 29(8):13231329.

PINTO, A. T. (2006). Introdução ao Estudo dos Geopolímeros. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, 88 p.

PROVIS, J. L. & VAN DEVENTER, J. S. J. (Eds.). (2009). Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 464 p. DOI: 10.1533/9781845696382.

PYEON, S.; KIM, G.; LEE, S. & NAM, J. (2022). Internal Curing Effect of Waste Glass Beads on High-Strength Cement Composites. Applied Sciences, 12(16): 8385. DOI: 10.3390/app12168385.

QUANTACHROME INSTRUMENTS. (2013). Pentapyc 5200e and Ultrapyc 1200e: Automatic Pycnometers for the Density Analysis of Powders, Foams and Bulk Solids. Boynton Beach, FL, USA: Quantachrome Instruments, Publication No. 07120, Rev. B, 4 p.

RAOOF, B.Z.; ABDULKAREEM, A.H. & RAJAB, A.R. (2025). Implementation of Geopolymer For Stabilizing Granular Soil. Magazine of Civil Engineering, 18(7): Article No. 13910. DOI: 10.34910/MCE.139.10.

REZENDE, V. A. (2013). Estudo do Comportamento de Barragem de Rejeito Arenoso Alteada por Montante. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 181 f.

RYU, G.S.; LEE, Y.B.; KOH, K.T. & CHUNG, Y.S. (2013). The Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete with Alkaline Activators. Construction and Building Materials, 47: 409-418. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.069.

SALDANHA, R. B.; MENEZES, M. F. L.; BITTAR, R. J. & CONSOLI, N. C. (2024). Performance of Ore Sand as Aggregate for Interlocking Blocks. Applied Sciences, v. 14, n. 1, p. 48. DOI: 10.3390/app14010048.

SALZMANN, A. (2003). Damping Characteristics of Reinforced and Prestressed Normal- and High-Strength Concrete Beams. Thesis (Doctor of Philosophy), School of Engineering, Faculty of Engineering and Information Technology, Griffith University, Gold Coast, Australia, 280 p. DOI: 10.25904/1912/2687.

SANTOS, A. L.; PITANGA, H. N.; SILVA, A. C. B & SILVA, T. O. (2018). Caracterização do Comportamento Mecânico de Misturas de Solo-Escória de Aciaria-Cinza Volante Visando a Aplicação Em Pavimentação. Revista Brasileira de Energias Renováveis, 7(1): 16-29.

SANTOS, A.; ANDREJKOVIČOVÁ, S.; PERNÁ, I.; ALMEIDA, F. & ROCHA, F. (2024). Mechanical and Thermal Properties of Geopolymers Derived From Metakaolin With Iron Mine Waste. Applied Clay Science, 258: 107452. DOI: 10.1016/j.clay.2024.107452.

SATHONSAOWAPHAK, A.; CHINDAPRASIRT, P. & PIMRAKSA, K. (2009). Workability and Strength of Lignite Bottom Ash Geopolymer Mortar. Journal of Hazardous Materials, 168(1): 44-50. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.01.120.

SEGURA, I. P.; LUUKKONEN, T.; YLINIEMI, J.; SAASTAMOINEN, H.; RUNTTI, H. & ILLIKAINEN, M. (2022). Comparison of One-Part and Two-Part Alkali-Activated Metakaolin and Blast Furnace Slag. Journal of Sustainable Metallurgy, v. 8, p. 1816–1830. DOI: 10.1007/s40831-022-00606-9.

SEGURA-SALAZAR, J.; EKUBATSION, L. H.; SERATI, M.; DAO, V.; GRAVINA, R.; ANTONIO, C.; ZHU, X. & FRANKS, D. M. (2026). Evaluating Ore-Sand By-Products at Cadia's Porphyry Copper-Gold Mine for Construction Applications. Minerals Engineering, v. 237, p. 111001. DOI: 10.1016/j.mineng.2025.111001.

SHARIATMADARI, N.; HASANZADEHSHOOIILI, H.; GHADIR, P.; NAGHIZADEH ROKNI, S. & FAKHER, A. 2021. Compressive Strength of Sandy Soils Stabilized with Alkali-Activated Volcanic Ash and Slag. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 33, n. 11, p. 04021295. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003845.

SILVA, C. G. C. (2017). Estudo da Influência do Teor de Finos no Comportamento de um Rejeito de Minério de Ferro a Partir de Ensaios Edométricos. Projeto de Graduação (Engenharia Civil), Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 69 f.

SILVA, J. P. S.; CARVALHO, J. V. A.; WAGNER, A. C.; CACCIARI, P. P. & CONSOLI, N. C. (2024). On the Mechanics of Filtered Compacted Consolidated and Overconsolidated Iron Ore Tailings at High Pressures. Canadian Geotechnical Journal, 61: 575–581. DOI: 10.1139/cgj-2023-0180.

SILVA, J. P. S.; RISSOLI, A. L. C.; CACCIARI, P. P.; VIANA DA FONSECA, A. J. P.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; WAGNER, A. C.; CARVALHO, J. V. D. A.; FESTUGATO, L. & CONSOLI, N. C. (2024). Triaxial Testing Response of Compacted Iron

Ore Tailings Considering a Broad Spectrum of Confining Pressures. Soils and Foundations, 64, 101438. DOI: 10.1016/j.sandf.2024.101438.

SILVA, N. A. B. S. (2020). Desempenho de um Compósito Solo-Polímero para Aplicabilidade em Obras Geotécnicas e de Pavimentação. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111 p.

SINGH, M. & GARG, M. (1991). Perlite-Based Building Materials – A Review of Current Applications. Construction and Building Materials, 5(2): 75-81. DOI: 10.1016/0950-0618(91)90004-5.

SNELLINGS, R. (2016). Assessing, Understanding and Unlocking Supplementary Cementitious Materials. RILEM Technical Letters, 1: 50–55. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2016.12.

SORE, S.O.; MESSAN, A.; PRUD'HOMME, E.; ESCADEILLAS, G. & TSOBNANG, F. (2020). Comparative Study on Geopolymer Binders Based on Two Alkaline Solutions (NaOH and KOH). Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 8: 407-420. DOI: 10.4236/jmmce.2020.86026.

SUN, J.S.; DOU, Y.M.; CHEN, Z.X. & YANG, C.F. (2011). Experimental Study on the Performances of Cement Stabilized Iron Ore Tailing Gravel in Highway Application. Applied Mechanics and Materials, 97-98: 425-428. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.97-98.425.

TORGAL, F.P.; JALALI, S. & CASTRO-GOMES, J.P. (2005). Cimento Portland Versus Ligantes Geopoliméricos: Considerações Económicas Sobre as Implicações do Mercado do Carbono no Custo dos Betões. Conferência Engenharia 2005 – Inovação e Desenvolvimento: actas. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 4 p.

TURAN, C.; JAVADI, A. A.; VINAI, R. & RUSSO, G. (2022). Effects of Fly Ash Inclusion and Alkali Activation on Physical, Mechanical, and Chemical Properties of Clay. Materials, 15(13), 4628. DOI: 10.3390/ma15134628.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). (2026). Mineral Commodity Summaries 2026. Reston, VA, USA: U.S. Geological Survey, 222 p. DOI: 10.3133/mcs2026.

UMAR, I. H.; LIN, H. & IBRAHIM, A. S. (2023). Laboratory Testing and Analysis of Clay Soil Stabilization Using Waste Marble Powder. Applied Sciences, 13(16): 9274. DOI: 10.3390/app13169274.

UNEP (2026). Sand and Sustainability: An Essential Resource for Nature and Development. GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland, 114 p. DOI: 10.59117/20.500.11822/49463.

VALE S.A. (2023). Vale Lança Empresa para Desenvolver Negócio de Areia Sustentável. Vale S.A., Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <https://www.vale.com/pt/w/vale-lanca-empresa-para-desenvolver-negocio-de-areia-sustentavel-2>. Acesso em: 14 nov. 2023.

VALE S.A. (2024). 1 Milhão de Toneladas de Areia Sustentável da Vale Vendidas. Disponível em: <https://www.vale.com/pt/w/1-milhao-de-toneladas-de-areia-sustentavel-da-vale-vendidas>. Acesso em: 6 fev. 2026.

VALE S.A. (2026). Vale Dobra Produção Circular de Minério de Ferro por Fontes Circulares. Disponível em: <https://vale.com/pt/w/vale-dobra-producao-circular-de-minerio-de-ferro-por-fontes-circulares.> Acesso em: 25 abr. 2026.

VAN DEVENTER, J. S. J.; PROVIS, J.L.; DUXSON, P. & LUKEY, G.C. (2007). Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. Journal of Hazardous Materials, 139 (3): 506–513.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J. & LUKEY, G. C. (2002). The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash- and Kaolinite-Based Geopolymers. Chemical Engineering Journal, 89(1–3), 63–73. DOI: 10.1016/S1385-8947(02)00025-6.

VANCE, E. R.; PERERA, D. S.; IMPERIA, P.; CASSIDY, D. J.; DAVIS, J.; & GOURLEY, J. T. (2009). Perlite Waste As A Precursor For Geopolymer Formation. Journal of the Australian Ceramic Society, 45(1):44-49.

VELTEN, R.Z.; SANT'ANA, A. P.; LIMA, D.C.; SILVA, C. H. C.; CARVALHO, C. A. B.; COUTO, L. G. & MACHADO, C. C. (2006). Caracterização Mecânica de Misturas Solo-Escória de Altoforno Granulada Moída Para Aplicações Em Estradas Florestais. Sociedade de Investigações Florestais, Viçosa, Minas Gerais, 2, 235-240.

VIZCARRA, G. O. C. (2010). Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano Para Base de Pavimentos. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 120 p.

VIZCARRA, G.; TEHRANI, K.; GHAMGOSAR, M.; SEGURA-SALAZAR, J. & ANDRADE, C. (2025). Utilising Iron Ore-Sand for Sustainable Mine Haul Road Construction. In: The Life of Mine | Mine Waste and Tailings Conference 2025. Brisbane, Australia, 29-30 Jul. 2025.

VU, C. T.; CHANG, I.; IM, J.; PRASIDHANTA, B.; CHO, G. C. & LEE, S. W. (2020). Influence of Initial Water, Moisture, and Geopolymer Content on Geopolymer Modified Sludge. Construction and Building Materials, 235, 117420. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117420.

WAGNER, A. C.; DE SOUSA SILVA, J. P.; DE AZAMBUJA CARVALHO, J. V.; RISSOLI, A. L. C.; CACCIARI, P. P.; CHAVES, H. M.; SCHEUERMANN FILHO, H. C. & CONSOLI, N. C. (2023). Mechanical Behavior of Iron Ore Tailings under Standard Compression and Extension Triaxial Stress Paths. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 15(7): 1883–1894. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.11.013.

WAR, M.I. & SACHAR, A. (2019). Predicting the Permeability of Sandy Soils from Grain Size Distribution Indices. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR), 6(6): 913-923.

WASSIE, T.A. & DEMIR, G. (2024). Mechanical Strength and Microstructure of Soft Soil Stabilized with Cement, Lime, and Metakaolin-Based Geopolymer Stabilizers. Advances in Civil Engineering, 2024: 6613742, 11 p. DOI: 10.1155/2024/6613742.

YAGHOUBI, M.; ARULRAJAH, A. & HORPIBULSUK, S. (2022). Engineering Behavior of High-Water-Content Soft Clay Stabilized With Geopolymer. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 8(3). DOI: 10.1007/s40891-022-00385-z.

YANG, T.; GAO, X.; CHEN, Y.; GUO, R.; LI, J.; WU, Q. & ZHANG, Z. (2025). Phase Assemblage Modification and Shrinkage Mitigation in One-Part Alkali-Activated Slag Using Solid Waste-Derived Binary Activators. Journal of Building Engineering, 116, 114704. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.114704.

YU, J.; JI, F.; PENG, Y.; et al. (2024). Mechanical Property and Microstructure of Fly Ash-Based Geopolymer by Calcium Activators. Case Studies in Construction Materials, 21: e03811. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03811.

ZHANG, N.; HEDAYAT, A.; FIGUEROA, L.; STEIRER, K. X.; LI, L. & SOSA, H. G. B. (2023). Physical, Mechanical, Cracking, and Damage Properties of Mine Tailings-Based Geopolymer: Experimental and Numerical Investigations. Journal of Building Engineering, v. 75, 107075. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107075.

ZHANG, R. & MA, D. (2020). Effects of Curing Time on the Mechanical Property and Microstructure Characteristics of Metakaolin-Based Geopolymer Cement-Stabilized Silty Clay. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, Article ID 9605941, 9 p. DOI: 10.1155/2020/9605941.

ZHAO, Q.; MA, C.; HUANG, B. & LU, X (2023). Development of alkali activated cementitious material from sewage sludge ash: Two-part and one-part geopolymer. Journal of Cleaner Production, v. 384, p. 135547. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135547.

ZHONG, X.; DEETMAN, S.; TUKKER, A. & BEHRENS, P. (2022). Increasing Material Efficiencies of Buildings to Address the Global Sand Crisis. Nature Sustainability, 5(5): 389-392. DOI: 10.1038/s41893-022-00857-0.

APÊNDICE A

Tabela A.1 – Tratamentos Estatísticos (ANOVA).

Tratamento	Teor de Geopolímero (%)	Tempo de Cura (Dias)	Massa Específica (g/cm³)	Umidade de Moldagem (%)	Média RCNC (kPa)
1	20	7	1,7	12	32,46
2	20	7	1,7	14	17,94
3	20	14	1,7	12	84,37
4	20	14	1,7	14	30,92
5	20	28	1,7	12	368,75
6	20	28	1,7	14	103,27
7	20	56	1,7	12	4274,76
8	20	56	1,7	14	2343,34
9	30	7	1,7	12	117,48
10	30	7	1,7	14	47,08
11	30	14	1,7	12	507,43
12	30	14	1,7	14	108,77
13	30	28	1,7	12	1254,10
14	30	28	1,7	14	2674,04
15	30	56	1,7	12	1390,17
16	30	56	1,7	14	2662,07
17	20	7	1,8	12	22,76
18	20	7	1,8	14	14,73
19	20	14	1,8	12	65,94
20	20	14	1,8	14	427,52
21	20	28	1,8	12	403,03
22	20	28	1,8	14	88,01
23	20	56	1,8	12	2386,70
24	20	56	1,8	14	1876,71
25	30	7	1,8	12	58,34
26	30	7	1,8	14	42,64
27	30	14	1,8	12	1536,98
28	30	14	1,8	14	226,26
29	30	28	1,8	12	1488,67
30	30	28	1,8	14	3119,95
31	30	56	1,8	12	1563,77
32	30	56	1,8	14	3126,23

APÊNDICE B

```
# Compósito Coproduto + Geopolímero

# Pacotes
library(FrF2)
library(olsrr)
library(ggpubr)

# Planejamento experimental
plan <- expand.grid(
  teor = c(20, 30),
  cura = c(7, 14, 28, 56),
  densidade = c(1.7, 1.8),
  umidade = c(12, 14)
)

# 3 repetições por combinação
plan <- plan[rep(1:nrow(plan), each = 3), ]

# Resposta: substituir pelos seus valores de RCS
plan$RCS <- c(
  # coloque aqui todos os seus valores de RCS
)

# Verificar planejamento
print(plan)
summary(plan)

# Modelo com todas as interações
lm1 <- lm(RCS ~ teor * cura * densidade * umidade, data = plan)

# Resumo do modelo
summary(lm1)

# ANOVA
anova1 <- aov(lm1)
summary(anova1)

# Intervalo de confiança dos coeficientes
confint(lm1)

# Pressuposições
shapiro.test(residuals(lm1))

par(mfrow = c(2,2))
plot(lm1)
par(mfrow = c(1,1))

# Homocedasticidade
ols_test_breusch_pagan(lm1, rhs = TRUE, multiple = TRUE)

# Gráficos de efeitos principais e interações
MEPlot(lm1)
IAPlot(lm1)

# Gráficos com média, erro padrão e pontos
p1 <- ggline(data = plan, x = "teor", y = "RCS",
             add = c("mean_se", "jitter"),
             color = "blue") + theme_bw()
```

```
plot(p1)

p2 <- ggline(data = plan, x = "cura", y = "RCS",
             add = c("mean_se", "jitter"),
             color = "green2") + theme_bw()
plot(p2)

p3 <- ggline(data = plan, x = "densidade", y = "RCS",
             add = c("mean_se", "jitter"),
             color = "red") + theme_bw()
plot(p3)

p4 <- ggline(data = plan, x = "umidade", y = "RCS",
             add = c("mean_se", "jitter"),
             color = "purple") + theme_bw()
plot(p4)

# Interações
p12 <- ggline(data = plan, x = "cura", y = "RCS",
              add = c("mean_se", "jitter"),
              color = "teor") + theme_bw()
plot(p12)

p13 <- ggline(data = plan, x = "densidade", y = "RCS",
              add = c("mean_se", "jitter"),
              color = "teor") + theme_bw()
plot(p13)

p14 <- ggline(data = plan, x = "umidade", y = "RCS",
              add = c("mean_se", "jitter"),
              color = "teor") + theme_bw()
plot(p14)

# Tukey para cada fator
TukeyHSD(anova1, "teor")
TukeyHSD(anova1, "cura")
TukeyHSD(anova1, "densidade")
TukeyHSD(anova1, "umidade")

# Tukey para combinações completas
plan$tratamento <- interaction(plan$teor, plan$cura, plan$densidade, plan$umidade)

anova_trat <- aov(RCS ~ tratamento, data = plan)

summary(anova_trat)

TukeyHSD(anova_trat)
```

APÊNDICE C

Tabela C.1 – Resultados de Módulo de Resiliência pelas normas 134 e 181 (modelo combinado).

Amostra	Norma	MR (MPa)	DP(%)
C100 (Topo)	134	210,0	Não foi possível executar
C70G30-7 dias (Topo)	134	324,0	2,327
C70G30-14 dias (Topo)	134	603,0	0,439
C70G30-28 dias (Topo)	134	1007,0	0,195
C70G30-56 dias (Topo)	134	1206,0	0,129
C70G30-14 dias (Topo)	181	496,3	-
C70G30-28 dias (Topo)	181	805,3	-
C70G30-56 dias (Topo)	181	1845,0	-
C70G30-7 dias (Terço Médio)	134	431,5	0,022
C70G30-14 dias (Terço Médio)	134	698,1	0,095
C70G30-28 dias (Terço Médio)	134	1274,2	0,009
C70G30-56 dias (Terço Médio)	134	3735,1	0,004
C70G30-14 dias (Terço Médio)	181	1025,7	-
C70G30-28 dias (Terço Médio)	181	1195,0	-
C70G30-56 dias (Terço Médio)	181	3809,7	-
C70G30-28 dias (Terço-Imerso)	181	802,5	-
C70G30-14 dias (Terço-Imerso)	134	478,5	1,118
C70G30-28 dias (Terço-Imerso)	134	805,9	0,147
C70G30-56 dias (Terço-Imerso)	134	3672,3	0,005

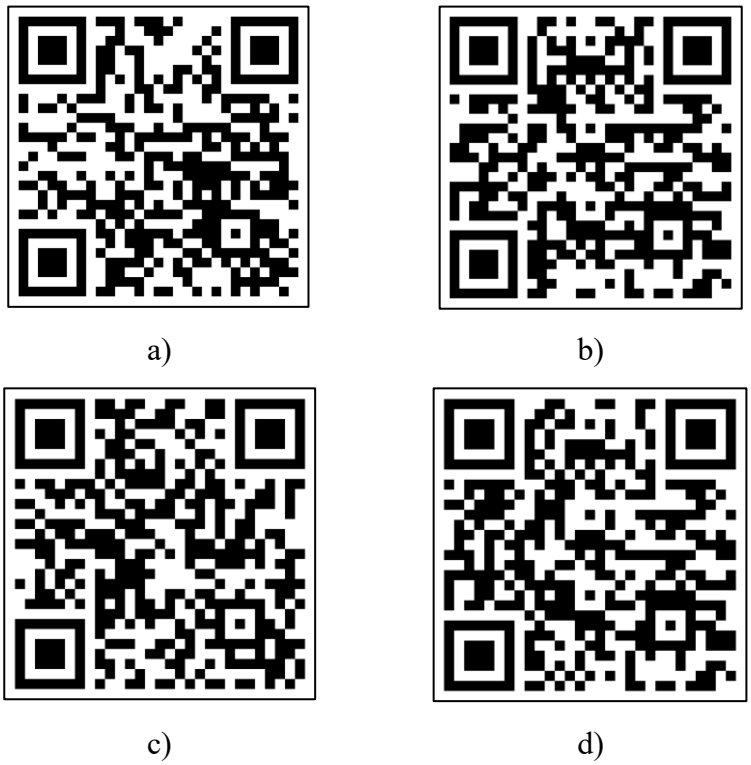
APÊNDICE D

Tabela D.1 – Resultados de Módulo de Resiliência pela norma 181 (modelo combinado).

Amostra	Tensão Vertical, σd (MPa)	Deslocamento Recuperável, δ (mm)	Deformação Resiliente, ε (%)	MR (MPa)	Parâmetros (k1, k2 e R^2)
C70G30-14 dias (Topo)	0,103	0,093	0,046	222,568	k1=675,24 k2=0,49 R^2=0,99
	0,204	0,134	0,067	304,569	
	0,305	0,159	0,080	382,665	
	0,405	0,194	0,097	416,227	
	0,505	0,227	0,114	496,276	
C70G30-14 dias (Terço)	0,100	0,093	0,046	824,456	k1=1002,15 k2=0,11 R^2=0,33
	0,200	0,134	0,067	771,819	
	0,300	0,159	0,080	772,778	
	0,400	0,194	0,097	1025,723	
	0,500	0,227	0,114	934,086	
C70G30-28 dias (Topo)	0,105	0,093	0,046	394,494	k1=1084,90 k2=0,45 R^2=1
	0,206	0,134	0,067	522,550	
	0,307	0,159	0,080	621,431	
	0,407	0,194	0,097	728,625	
	0,507	0,227	0,114	805,305	
C70G30-28 dias (Terço)	0,107	0,093	0,046	628,304	k1=1425,84 k2=0,41 R^2=0,72
	0,207	0,134	0,067	607,752	
	0,307	0,159	0,080	901,352	
	0,407	0,194	0,097	1194,952	
	0,507	0,227	0,114	992,368	
C70G30-56 dias (Topo)	0,104	0,093	0,046	1313,145	k1=2006,02 k2=0,21 R^2=0,86
	0,204	0,134	0,067	1357,451	
	0,305	0,159	0,080	1505,115	
	0,407	0,194	0,097	1653,108	
	0,506	0,227	0,114	1845,147	
C70G30-56 dias (Terço)	0,104	0,093	0,046	8164,387	k1=1912,32 k2=-0,64
	0,204	0,134	0,067	5481,173	

Amostra	Tensão Vertical, σd (MPa)	Deslocamento Recuperável, δ (mm)	Deformação Resiliente, ε (%)	MR (MPa)	Parâmetros (k1, k2 e R^2)
C70G30-28 dias (Terço - Imerso)	0,306	0,159	0,080	3809,750	R^2=0,99
	0,409	0,194	0,097	3369,285	
	0,506	0,227	0,114	3073,354	
	0,105	0,093	0,046	478,469	
	0,205	0,134	0,067	483,811	k1=566,32
	0,305	0,159	0,080	507,221	k2=0,08
	0,406	0,194	0,097	531,424	R^2=0,88
	0,505	0,227	0,114	540,804	

APÊNDICE E



a) b)

c) d)

Figura E.1 – Vídeos obtidos das análises de microtomografia: a) Reconstrução tridimensional do coproduto bruto; b) Corte da seção ortogonal do coproduto bruto; c) Reconstrução tridimensional do compósito C70G30-14-1,8-28d e d) Corte da seção ortogonal do compósito C70G30-14-1,8-28d.