



ESTUDO MICROESTRUTURAL E MECÂNICO DE GEOPOLÍMEROS OBTIDOS DO REJEITO DA EXTRAÇÃO DE FERRO

Julianna Magalhaes Garcia¹; Luiz Antônio Silveira Lopes²

¹Pós-doutoranda da Seção de Engenharia e Ciências de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ — Brasil

²Professor Titular da Seção de Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ — Brasil

RESUMO

A indústria de infraestrutura ferroviária necessita de alternativas sustentáveis e economicamente viáveis para substituir os dormentes tradicionais de concreto de cimento Portland e madeira tratada, que apresentam elevadas pegadas de carbono e problemas de degradação. Este estudo investiga a viabilidade microestrutural e mecânica de geopoliméricos formulados a partir de rejeitos da extração de minério de ferro como um novo ligante cimentício para dormentes ferroviários. Utilizando um resíduo fino de minério de ferro (74,68% em massa de Fe_2O_3 e 19,08% de SiO_2), como precursor para a produção de geopolímeros ativados com metassilicato de sódio (Na_2SiO_3), na proporção 7:2:2 (rejeito:ativador:água), este trabalho promove uma abordagem de economia circular ao reaproveitar resíduos de mineração em uma matriz estrutural de alto valor. Caracterizações térmicas e microestruturais revelaram que tratamentos de calcinação até 600 °C favorecem a formação de fases parcialmente cristalinas de aluminossilicato de sódio e ferro. Para validar sua aplicabilidade sob condições que simulam o tráfego de trens, a resistência ao choque dinâmico da pasta geopolimérica endurecida foi avaliada por meio do ensaio de impacto mecânico α -Tretón, avaliando a coesão intrínseca e a tenacidade à fratura do próprio aglomerante. Os resultados demonstraram resistência ao impacto adequada para temperaturas de calcinação de até 600 °C, após as quais a microfissuração comprometeu a integridade estrutural. Em última análise, o geopolímero rico em ferro sintetizado apresenta-se como um aglomerante cimentício viável e de baixa emissão, capaz de substituir o cimento Portland em dormentes ferroviários, convertendo um resíduo em um compósito coeso e estável.

Palavras-chave: *Rejeito de ferro, Geopolímero, Ativação alcalina, Análise térmica, Ensaio Tretón.*

1. INTRODUÇÃO

A contínua expansão e modernização das redes ferroviárias globais exigem materiais estruturais capazes de suportar severas cargas cíclicas dinâmicas, intemperismo ambiental e altas cargas operacionais. Tradicionalmente, os dormentes ferroviários são fabricados em concreto ou madeira tratada. No entanto, o cimento Portland comum usado em dormentes de concreto é responsável por emissões significativas de CO_2 globais (KAJASTE; HURME, 2016, MOHAMAD et al., 2022), enquanto a madeira tratada apresenta rápida degradação e toxicidade ambiental. Simultaneamente, o acúmulo maciço de rejeitos de minério de ferro em barragens de mineração impõe graves riscos ambientais e geotécnicos (ZHANG et al., 2022). A utilização desses rejeitos ricos em ferro para sintetizar ligantes geopoliméricos para dormentes ferroviários apresenta uma solução dupla: mitiga o passivo ambiental dos resíduos de mineração e fornece um material de



construção de baixo carbono para o setor ferroviário (POTGIETER, 2012, SILVA DEFÁVERI et al., 2019).

Simultaneamente, a indústria de mineração de ferro gera volumes massivos de rejeitos, que são tipicamente armazenados em barragens, representando graves riscos ambientais e de segurança, com rejeitos sólidos anuais de mais de 300 milhões de toneladas. Em 2009, a relação entre o volume de rejeitos e a quantidade de minério efetivamente extraída atingiu 35,5% (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2022). Os principais minerais responsáveis por essa produção são ouro, ferro, cobre, fosfato, titânio, estanho, alumínio, zircônio e nióbio, que juntos responderam por 439,6 milhões de toneladas de rejeitos, correspondendo a 85,3% do total nacional (FRIBER et al., 2023). Esses rejeitos, compostos principalmente por óxidos de ferro, sílica, alumina e impurezas residuais, são geralmente depositados em barragens ou pilhas, ocupando grandes áreas e oferecendo riscos à segurança ambiental e à saúde pública. Casos de rompimentos de barragens nos últimos anos evidenciam a urgência de soluções tecnológicas e sustentáveis para o reaproveitamento desses rejeitos.

Diante desses desafios, a busca por alternativas sustentáveis na produção de materiais de construção tem se intensificado, com destaque para a reutilização de rejeitos industriais. Nesse contexto, a produção de geopolímeros surge como uma solução única. Diferentemente do cimento Portland, os geopolímeros não requerem a calcinação de calcário, reduzindo significativamente as emissões de carbono. Esses materiais cimentícios são obtidos por meio da ativação alcalina de compostos ricos em alumínio e silício (CARREÑO-GALLARDO et al., 2018; AZAD; SAMARAKOON, 2021), permitindo o aproveitamento de subprodutos industriais, como cinzas volantes, escória de alto-forno e rejeitos de minério de ferro (NATH; SARKER, 2014; HABERT; D'ESPINOSE DE LACAILLERIE; ROUSSEL, 2011). De forma que a utilização de rejeitos ricos em ferro para sintetizar ligantes geopoliméricos para dormentes ferroviários apresenta uma solução dupla: mitiga o passivo ambiental dos resíduos da mineração e fornece um material de construção de baixo carbono e altamente durável para o setor ferroviário.

Estudos demonstram que geopolímeros elaborados com rejeitos de ferro apresentam propriedades físico-químicas e mecânicas promissoras, com boa estabilidade térmica, elevada resistência à compressão e durabilidade em ambientes agressivos (PONOMAR et al., 2022a; PONOMAR et al., 2022b; KAMSEU et al., 2020). Isso os torna candidatos potenciais para aplicações estruturais e infraestruturais, incluindo elementos não convencionais de construção, como dormentes ferroviários. Tradicionalmente, dormentes são produzidos em madeira, concreto armado ou polímeros reforçados, mas todos esses materiais apresentam limitações, seja por questões ambientais, durabilidade ou custo (KAEWUNRUEN; NGAMKHANONG, 2019; ARAFAT; IMAM, 2022).

A possibilidade de empregar geopolímeros ricos em ferro na base cimentícia da produção de dormentes representa um avanço significativo, especialmente em regiões com abundância de rejeitos minerais e carência de soluções logísticas sustentáveis para o descarte desses rejeitos. Além da vantagem ambiental, esses materiais podem apresentar desempenho superior ao concreto convencional em termos de resistência térmica e durabilidade frente a ciclos de umidade e temperatura, condições frequente na infraestrutura ferroviária brasileira (FERDOUS et al., 2015).



Nesse contexto, o presente trabalho propõe a utilização de rejeitos de minério de ferro como principal fonte de silício e ferro na formulação de geopolímeros ativados com metassilicato de sódio, como uma pasta cimentícia (ligante) para substituir inteiramente o cimento Portland comum na matriz de concreto de dormentes ferroviários. O estudo inclui a caracterização do rejeito (DRX, TGA/DSC, FT-IR) e a avaliação das fases cristalinas formadas após tratamento térmico. A resistência ao choque dinâmico do ligante foi avaliada por meio do ensaio α -Treton, simulando os impactos mecânicos severos típicos das operações ferroviárias. De forma a compreender os efeitos da composição e da temperatura de calcinação na estrutura resultante, fornecendo subsídios técnicos para aplicações estruturais em substituição à base cimentícia.

2. DESENVOLVIMENTO

Esta seção detalha os materiais precursores utilizados e os métodos analíticos específicos aplicados para a caracterização microestrutural e mecânica.

2.1. Materiais e Preparo

Para esse trabalho foram utilizados rejeito de ferro (lama vermelha) oriundos de uma mineradora brasileira e metassilicato de sódio (Na_2SiO_3), que foram preparados em soluções de água deionizada, na proporção 7:2:2. A composição química do rejeito é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química do rejeito de ferro, como recebido.

ÓXIDO	CONCENTRAÇÃO (%)
Fe_2O_3	74,68
SiO_2	19,08
Al_2O_3	4,42
P_2O_5	0,76
CaO	0,32
MgO	0,28
MnO	0,19
TiO_2	0,13

Para a fabricação do geopolímero foi realizada a diluição do metassilicato de sódio em água deionizada, nas proporções previamente estabelecidas, até a obtenção de uma solução homogênea, assegurando a completa dissolução do ativador alcalino. Em seguida, o rejeito de ferro foi incorporado à solução alcalina, promovendo a adequada dispersão dos componentes, por agitação mecânica. As pastas obtidas foram moldadas em formas de silicone no formato de colmeia e, em seguida, submetidas ao processo de cura ambiente por 14 dias.

2.2. Métodos

Esta seção descreve os tratamentos térmicos aplicados às amostras e as técnicas analíticas empregadas para avaliar a composição físico-química, a evolução microestrutural e o desempenho mecânico dinâmico da pasta geopolimérica formulada.

2.2.1. Calcinação

A estabilidade térmica e a evolução de fase da matriz geopolimérica são cruciais para garantir a integridade estrutural sob as severas condições ambientais das operações ferroviárias. Após um período de cura ambiente de 14 dias (condição para promover a consolidação parcial do gel geopoliméricos), os corpos de prova foram calcinados em um forno mufla elétrico sem tempo de calcinação (tempo de permanência de 0 min). A ausência de tempo de permanência foi estabelecida para simular condições de choque térmico rápido e avaliar a resposta microestrutural imediata das fases transitórias. Seguindo os seguintes parâmetros, Figura 1:

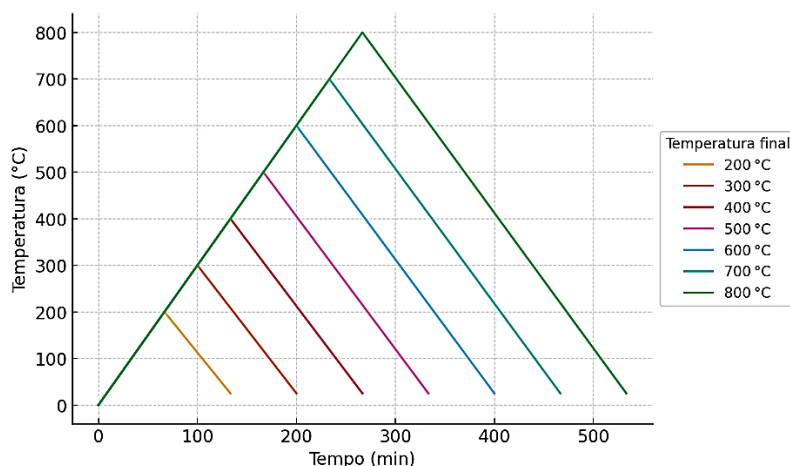


Figura 1. Rota de calcinação dos geopolímeros.

- Rampas de aquecimento: 3 °C/min até a temperatura de referência;
- Temperaturas finais de calcinação de cada grupo de amostras: 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C e 800 °C;
- Sem tempo de patamar térmico (calcinação);
- Após a calcinação, as amostras foram resfriadas ao ar até temperatura ambiente.

As temperaturas alvo finais variaram de 200 °C a 800 °C. Essa faixa de temperatura específica foi selecionada com base no comportamento térmico conhecido de geopolímeros aluminossilicatos e ricos em ferro (DUAN et al., 2016). Pesquisas indicam que tratamentos em baixa temperatura (200-400 °C) promovem a eliminação de água livre e quimicamente ligada, enquanto temperaturas mais altas (600-800 °C) promovem a reorganização microestrutural, como a desidroxilação da goethita em hematita e a precipitação de fases cristalinas estáveis (por exemplo, redes de mulita e piroxênio) (LI et al., 2022). Essas transformações cristalinas em alta temperatura são essenciais para aumentar a densidade da matriz e a resistência mecânica necessárias para componentes ferroviários de suporte de carga (LI et al., 2022). Ao mesmo tempo que levam a uma degradação microestrutural significativa, aumento da porosidade e propagação de microfissuras térmicas na matriz geopoliméricas (DUAN et al., 2016). Ao avaliar essa faixa, este estudo visa identificar o limite de estabilidade térmica do geopolímero antes que ocorra uma falha estrutural catastrófica.

2.2.2. Difração de raios X (DRX)

O DRX foi utilizado para identificar as fases cristalinas do material. Os ensaios foram conduzidos em um difratômetro PANalytical X'pert Pro, com ânodo de Co (cobalto) e



detector linear PIXcel, conforme a norma ASTM D934-22 (Determinação de Compostos Cristalinos) (ASTM, 2022). As varreduras foram realizadas entre 5° e 90° na configuração θ -2 θ , com passo de 0,03° e tempo de 200 s.

2.2.3. Análise termogravimétrica (TGA)

O TGA é uma técnica usada para avaliar a estabilidade térmica e a perda de massa de uma amostra à medida que ela é aquecida. Durante o aquecimento, a perda de massa pode ocorrer devido à evaporação de solventes, decomposição de materiais ou outras reações térmicas. A TGA fornece informações sobre a estabilidade do material sob diferentes condições de temperatura. Os ensaios seguiram a norma ASTM E1131-20 (Determinação de Propriedades Térmicas de Materiais Sólidos por TGA) (ASTM, 2020), com aquecimento controlado até 1300 °C.

2.2.4. Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

Para a análise por calorimetria diferencial de varredura (DSC) as amostras foram ensaiadas em cadinho de alumina em um calorímetro da TA Instruments modelo Q1000, operando em atmosfera de nitrogênio com taxa de aquecimento de 10 °C/min, em um intervalo de temperatura de 50 a 1000 °C, para verificar a presença de picos e intervalos de precipitação e transformação de fase, conforme a norma ASTM D3418-21 (Determinação de Transição Vítre e Eventos Térmicos por DSC) (ASTM, 2021).

2.2.5. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR-ATR)

Foi utilizada espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) para identificar os grupos funcionais e as ligações químicas presentes nas amostras, bem como avaliar a formação da rede geopolimérica. As análises foram realizadas em espectrômetro Invenio R FTIR (Bruker Optics), equipado com acessório de refletância total atenuada (ATR) com cristal de diamante. Os espectros foram adquiridos na faixa espectral de 4000 a 400 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e 32 varreduras acumuladas por amostra, visando melhorar a relação sinal/ruído. As medições foram conduzidas à temperatura ambiente, com correção automática de fundo antes de cada aquisição.

2.2.6. Resistência ao Choque - Método α -Treton

A resistência ao choque dos espécimes foi avaliada utilizando o teste α -Treton, que simula a degradação do material sob ciclos de impactos mecânicos sucessivos. Embora este ensaio seja convencionalmente padronizado para agregados naturais, neste estudo, ele foi aplicado à pasta geopolimérica endurecida e fragmentada. Essa adaptação visa estimar a coesão intrínseca da rede geopolimérica e sua capacidade de resistir à pulverização e fragmentação quando submetida a variações de choque físico, um parâmetro de fadiga para a fase ligante em dormentes ferroviários. O índice α -Treton foi calculado como a porcentagem de massa passante pela peneira após o ensaio, servindo como uma medida inversa da resistência do material ao choque dinâmico; portanto, quanto maior o índice, mais pulverulento e menos resistente (DNER, 1999, LUZ; ALMEIDA, 2012).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. DRX

A evolução das fases cristalinas nas amostras geopoliméricas submetidas a diferentes temperaturas foi monitorada por difração de raios X (DRX), permitindo identificar a

formação e transformação de estruturas ao longo do tratamento térmico, Figura 2. A formação inicial do gel geopolimérico, ativado por metassilicato de sódio, promove a incorporação de cátions Fe^{3+} e Na^+ a uma matriz de aluminossilicatos, cujas fases iniciais parcialmente cristalinas já se observam após a cura ambiente de 14 dias.

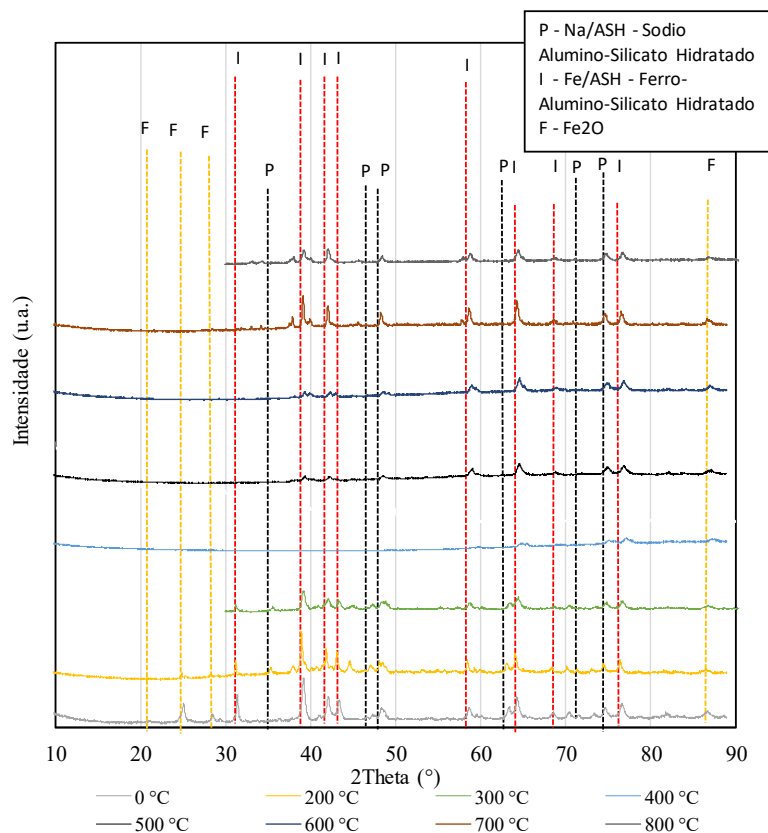


Figura 2. Difratoograma das amostras de geopolímeros após a calcinação.

Na amostra não calcinada (0 °C), observou-se a presença de um halo amorfo inicial associado a uma fase geopolimérica incipiente, juntamente com picos residuais de Fe_2O_3 (hematita), herdados do rejeito de ferro original. Segundo Kamseu et al. (2020), a presença de sílica reativa favorece a formação de ferrosilicatos polinucleares, a partir de complexos Fe-OH e Fe-O-Si, que evoluem com o aumento da temperatura.

Entre 300 °C e 600 °C, ocorre o desenvolvimento progressivo de fases geopoliméricas cristalinas, com aumento da intensidade dos picos associados a estruturas do tipo Na/ASH (Sódio Aluminosilicato Hidratado) e Fe/ASH (Ferro-Aluminosilicato Hidratado), como também discutido por Ponomar et al. (2022b), em estudos com materiais ricos em Fe submetidos à ativação alcalina. Esta faixa de temperatura é característica para o rearranjo estrutural da matriz, com condensação de unidades Fe-O-Si e possível formação de ferrisilicatos semicristalinos, que atuam como reforço estrutural.

Notavelmente, observa-se entre 300 °C e 700 °C a presença transitória de fases contendo fósforo, cujos picos desaparecem na amostra calcinada a 800 °C. Essa instabilidade térmica está associada à decomposição de fosfatos metálicos ou à volatilização de compostos contendo fósforo, como também descrito por Longa-Avello et al. (2017) no estudo da calcinação de limonitas.

A partir de 700 °C, ocorre uma redução na intensidade dos picos de Fe_2O_3 , sugerindo redistribuição ou dissolução parcial da hematita livre na matriz vítrea, com

indícios de recristalização induzida termicamente. Essa reconfiguração também é relatada por Ponomar et al. (2022b), que indicam que materiais ricos em Fe ativados alcalinamente tendem a formar estruturas cerâmicas densa a partir de 700-800 °C, com desaparecimento de fases hidratadas e formação de óxidos magnéticos ou silicatos de ferro de alta temperatura.

Além disso, Oliveira et al. (2013) mostraram que a transformação de goethita em hematita ocorre majoritariamente entre 250 °C e 350 °C, com perda das hidroxilas estruturais, o que corrobora os eventos térmicos observados no DSC e DRX do presente estudo.

3.2. FT-IR

A análise por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) evidencia a presença de grupos funcionais característicos de sistemas alumino/ferrossilicatos ativados alcalinamente, Figura 3.

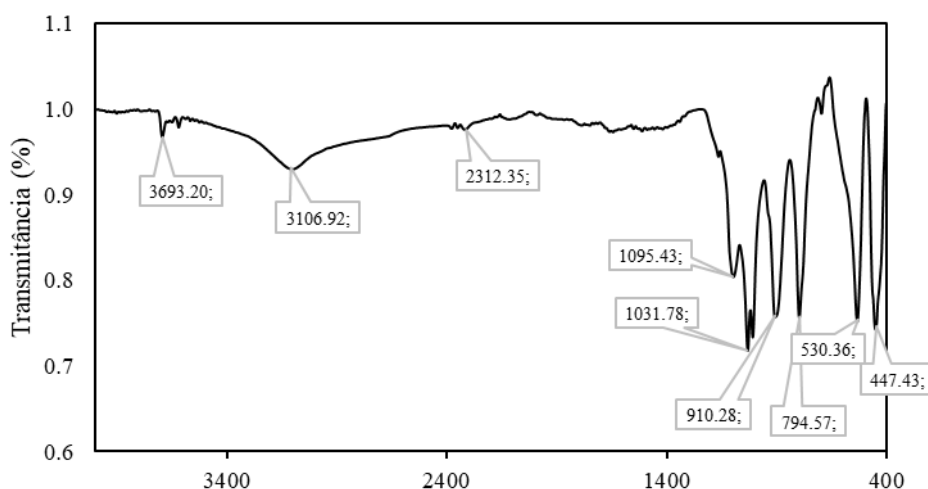


Figura 3. Espectrômetro FT-IR geopolímero após cura de 14 dias.

A banda observada em aproximadamente 3693 cm^{-1} está associada às vibrações de estiramento O-H, atribuídas a hidroxilas estruturais remanescentes e/ou água adsorvida na matriz geopolimérica. A banda em torno de 3106 cm^{-1} também está relacionada ao estiramento O-H de água ligada por pontes de hidrogênio, indicando a presença de umidade residual ou grupos hidroxilados ainda incorporados à rede. O sinal identificado próximo de 2312 cm^{-1} pode estar associado à absorção de CO_2 atmosférico ou carbonatos formados por carbonatação superficial do Na^+ presente na matriz.

Na região intermediária do espectro, destacam-se as bandas intensas em 1095 cm^{-1} e 1031 cm^{-1} , atribuídas às vibrações assimétricas de estiramento das ligações Si-O-T (T = Si, Al ou Fe), típicas da rede tridimensional geopolimérica. O deslocamento dessas bandas em relação ao quartzo puro ($\approx 1100 \text{ cm}^{-1}$) indica a substituição parcial de Si^{4+} por Al^{3+} e/ou Fe^{3+} na estrutura tetraédrica, evidenciando a formação de géis do tipo Na/ASH e possivelmente Fe/ASH. A presença da banda em 910 cm^{-1} pode ser relacionada às vibrações de Si-O-Fe ou Si-O-Al, reforçando a incorporação do ferro na rede geopolimérica. Já as bandas em 794 cm^{-1} correspondem a vibrações características do quartzo residual (Si-O-Si), indicando que parte da fase cristalina original permanece não totalmente reagida.

Na região de menor número de onda ($600\text{--}400\text{ cm}^{-1}$), as bandas em 530 cm^{-1} e 447 cm^{-1} são atribuídas às vibrações de deformação Fe-O, compatíveis com a presença de hematita ou ferrossilicatos incorporados à matriz. Essas bandas confirmam a participação ativa do ferro na estrutura final, seja como fase residual cristalina, seja como elemento estrutural substitucional na rede aluminosilicática. De modo geral, o espectro FTIR confirma a formação de uma matriz geopolimérica tridimensional, com ligações Si-O-Al e Si-O-Fe predominantes, coexistindo com fases cristalinas remanescentes do rejeito original, caracterizando um sistema semicristalino consolidado.

3.3. TGA/DSC

Complementando os resultados de DRX e FT-IR, as análises termoanalíticas por TGA e DSC (Figura 4) fornecem evidências da estabilidade térmica e evolução físico-química das amostras de geopolímero submetidas à calcinação.

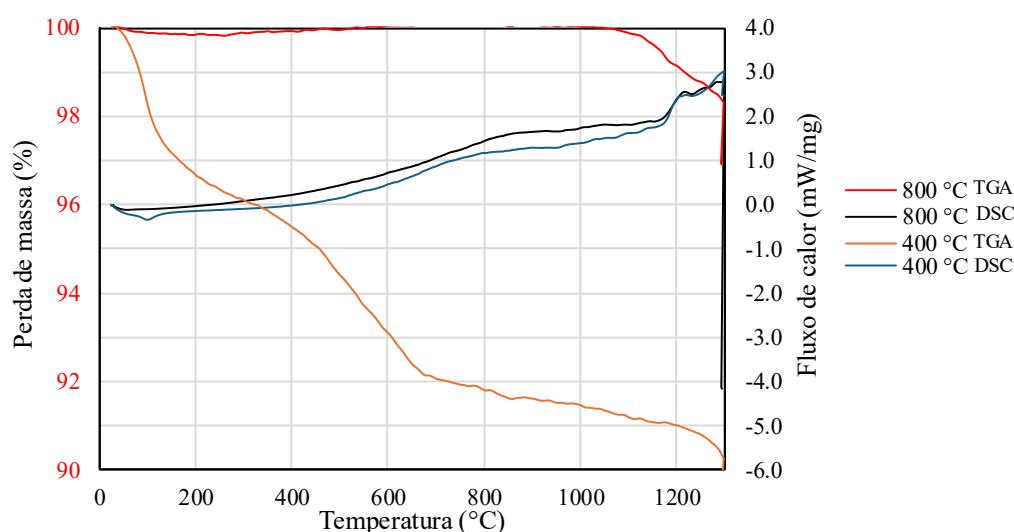


Figura 4. TGA (vermelho/laranja) e DSC (preto/azul) da amostra em pó do geopolímero calcinado em 400 e 800 °C.

A amostra calcinada a 400 °C apresenta perda de massa acumulada próxima de 10% ao longo do aquecimento até 1300 °C, com maior declividade entre 50 °C e 600 °C, faixa associada à liberação de água fisicamente adsorvida, desidroxilação residual e decomposição de espécies hidratadas ainda presentes na matriz. Essa perda contínua indica que o sistema, embora já consolidado, ainda contém domínios parcialmente policondensados e estruturas instáveis termicamente. Em contraste, a amostra previamente calcinada a 800 °C apresenta perda de massa inferior a 2% a partir de aproximadamente 1050 °C, demonstra elevada estabilidade estrutural. Essa baixa variação na TGA indica que a etapa de calcinação a 800 °C promoveu remoção das espécies voláteis e hidroxilas estruturais, resultando em uma matriz densificada e anidra, com elevado grau de policondensação.

Entretanto, as curvas de DSC das duas condições mostram comportamento muito semelhante, com um evento endotérmico dominante em alta temperatura, próximo de $\sim 1200\text{ °C}$, apresentando valores de fluxo de calor comparáveis. Enquanto em 800 °C há um halo característico que sugere o início de densificação/sinterização viscosa, relaxação estrutural do gel (Na/ASH-Fe/ASH), e/ou nucleação/rearranjo de domínios



ferrossilicáticos/óxidos dentro de uma matriz ainda majoritariamente amorfa/semicristalina. Essa similaridade indica que o principal evento térmico em alta temperatura não está governado pela água residual, mas sim por uma transformação intrínseca da matriz inorgânica já formada em ambos os casos, tipicamente associada à reorganização final da rede alumino/ferrossilicatada, sinterização/viscosificação e transições do tipo amolecimento vítreo (“*softening*”)/densificação viscosa, eventualmente acompanhadas por recristalização de fases ferrossilicáticas e/ou transformação de silicatos alcalinos e óxidos de ferro para uma configuração mais estável. Assim, embora a calcinação a 800 °C aumente drasticamente a estabilidade de massa e elimine voláteis precocemente, as duas formulações convergem para um comportamento termoquímico semelhante em temperaturas muito elevadas, sugerindo que o comportamento térmico do geopolímero 7:2:2 é controlada pela natureza da rede estequiométrica (Na/ASH-Fe/ASH e silicatos associados) e não apenas pelo grau de hidratação remanescente.

3.4. Desempenho Mecânico Dinâmico: Resistência ao Choque α -Treton

Para validar mecanicamente o geopolímero de rejeitos de minério de ferro para aplicações estruturais sujeitas a fadiga, foi realizado o teste de resistência ao choque Treton, Tabela 2.

Tabela 2. Ensaio Treton, agregado da pasta geopolimérica.

TEMPERATURA (°C)	ÍNDICE TRETON (%)
400	52
500	60
600	62
700	66
800	81

Os resultados do impacto mecânico demonstraram que a matriz geopolimérica manteve integridade estrutural coesiva adequada quando calcinada a temperaturas de até 600 °C. Nessas condições (400 °C e 600 °C), o material apresentou índices de perda ao choque de 52%, 60% e 62%, respectivamente, atendendo ao limite máximo de 60% estabelecido para agregados em pavimentação asfáltica com carregamento de 100 tn. (DNER, 1999, LUZ; ALMEIDA, 2012). Dentro dessa faixa de temperatura, a formação das redes tridimensionais de Na/ASH e Fe/ASH, identificadas nas análises de XRD e FTIR, fornece coesão interna suficiente para absorver choques dinâmicos sem pulverização catastrófica.

No entanto, a partir de 700 °C, o material ultrapassa o limite normativo de 60% para pavimentação (atingindo 66%). Em temperaturas de calcinação mais altas (800 °C), o material apresentou um aumento significativo e contínuo no índice de fragmentação (81%). Essa queda acentuada na resistência ao choque é diretamente atribuída à microfissuração térmica e à fragilização estrutural da matriz.

4. CONCLUSÃO

Este estudo avaliou a viabilidade microestrutural, térmica e mecânica do uso de rejeitos de minério de ferro como um ligante geopolimérico para dormentes ferroviários. As principais conclusões técnicas, econômicas e operacionais são:



- A ativação alcalina do rejeito de minério de ferro com metassilicato de sódio formou com sucesso uma rede tridimensional estável de Na/ASH e Fe/ASH, incorporando ativamente o ferro na estrutura (Si-O-Fe). Os ensaios de impacto mecânico α -Treton confirmaram que a pasta de geopolímero endurecida possui resistência adequada ao choque dinâmico, um requisito operacional essencial para absorver cargas cíclicas de trens. No entanto, essa viabilidade mecânica se mantém apenas até uma temperatura de calcinação de 600 °C, após a qual a microfissuração térmica induz fragilidade severa e colapso estrutural sob impacto.
- O geopolímero rico em ferro sintetizado apresenta-se como um aglomerante cimentício viável e de baixo carbono, capaz de substituir o cimento Portland na mistura de concreto. Isso oferece enormes benefícios ambientais ao reduzir drasticamente a pegada de carbono da infraestrutura ferroviária e transformar um passivo de mineração perigoso e sem valor em um compósito estrutural de alto valor.
- Futuras otimizações da mistura, como a incorporação de fibras de aço para o ganho de tenacidade (“*strain hardening*”), são recomendadas para igualar ou superar totalmente o desempenho do concreto protendido convencional.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem FAPERJ, CAPES, CNPq e Finep por meio das bolsas e pelo financiamento da pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

ARAFAT, M. E.; IMAM, F. Suitability of recycled materials as a composite sleeper: a scoping review. *Materials Today: Proceedings*, v. 65, p. 1599-1607, 2022. DOI: [10.1016/j.matpr.2022.04.599](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.599).

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3418-21: standard test method for transition temperatures of polymers by differential scanning calorimetry (DSC)**. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D934-22: standard test method for determination of crystalline compounds**. West Conshohocken: ASTM International, 2022.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E1131-20: standard test method for compositional analysis by thermogravimetry (TGA)**. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

AZAD, N. M.; SAMARAKOON, S. S. M. Utilization of industrial by-products/waste to manufacture geopolymer cement/concrete. *Sustainability*, v. 13, n. 2, p. 873, 2021. DOI: [10.3390/su13020873](https://doi.org/10.3390/su13020873)

CARREÑO-GALLARDO, C.; TEJEDA-OCHOA, A.; PEREZ-ORDONEZ, O. I.; LEDEZMA-SILLAS, J. E.; LARDIZABAL-GUTIERREZ, D.; PRIETO-GOMEZ, C.; et al. In the CO₂ emission remediation by means of alternative geopolymers as substitutes for cements. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 6, n. 4, p. 4878-4884, 2018. DOI: [10.1016/j.jece.2018.07.033](https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.07.033).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 399/99: agregados: determinação da perda ao choque no aparelho Treton**. Rio de Janeiro: DNER, 1999.



DUAN, P.; YAN, C.; ZHOU, W.; REN, D. Fresh properties, compressive strength and microstructure of fly ash geopolymer paste blended with iron ore tailing under thermal cycle. *Construction and Building Materials*, v. 118, p. 76-88, 2016. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2016.05.059](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.059).

FERDOUS, W.; MANALO, A.; KHENNANE, A.; KAYALI, O. Geopolymer concrete-filled pultruded composite beams – concrete mix design and application. *Cement and Concrete Composites*, v. 58, p. 1-3, 2015. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2014.12.012](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.12.012).

FRIBER, M.; GUIMARÃES, A.; MARTINS, C.; SOARES, J. Study of the mining waste in the production of calcined aggregate for use in pavement. *Minerals*, v. 13, p. 1543, 2023. DOI: [10.3390/min13121543](https://doi.org/10.3390/min13121543).

HABERT, G.; D'ESPINOSE DE LACAILLERIE, J. B.; ROUSSEL, N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 11, p. 1229-1238, 2011. DOI: [10.1016/j.jclepro.2011.03.012](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.012).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Apresentação: mineração**. Manaus: SUFRAMA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/suframa/pt-br/centrais-de-conteudo/seminarios-e-apresentacoes/2022/mineracao/ApresentaoIPT.pdf>. Acesso em: 27 set. 2025.

KAEWUNRUEN, S.; NGAMKHANONG, C.; NG, J. Influence of time-dependent material degradation on life cycle serviceability of interspersed railway tracks due to moving train loads. *Engineering Structures*, v. 199, p. 109625, 2019. DOI: [10.1016/j.engstruct.2019.109625](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109625).

KAJASTE, R.; HURME, M. Cement industry greenhouse gas emissions: management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 4041-4052, 2016.

KAMSEU, E.; KAZE, C. R.; FEKOUA, J. N. N.; MELO, U. C.; ROSSIGNOL, S.; LEONELLI, C. Ferrisilicates formation during the geopolymerization of natural Fe-rich aluminosilicate precursors. *Materials Chemistry and Physics*, v. 240, p. 122062, 2020. DOI: [10.1016/j.matchemphys.2019.122062](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122062).

LI, X.; WANG, P.; GUO, Z.; QIN, J.; et al. Effect of $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ on high-strength ceramsite prepared by sintering geopolymers using iron ore tailings. *Ceramics International*, v. 48, n. 4, p. 5681-5688, 2022. DOI: [10.1016/j.ceramint.2021.11.113](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.113).

LONGA-AVELLO, L.; PEREYRA-ZERPA, C.; CASAL-RAMOS, J. A.; DELVASTO, P. Study of the calcination process of two limonitic iron ores between 250 °C and 950 °C. *Revista Facultad de Ingeniería*, v. 26, n. 45, p. 33-45, 2017. DOI: [10.19053/01211129.v26.n45.2017.6053](https://doi.org/10.19053/01211129.v26.n45.2017.6053).

LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. de. *Manual de agregados para construção civil*. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012.

MOHAMAD, N.; MUTHUSAMY, K.; EMBONG, R.; KUSBIANTORO, A.; HASHIM, M. H. Environmental impact of cement production and solutions: a review. *Materials Today: Proceedings*, v. 48, p. 741-746, 2022. DOI: [10.1016/j.matpr.2021.02.212](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.212).

MOHAMED, A.; ATTA, R. R.; KOTP, A. A.; ABO EL-ELA, F. I.; ABD EL-RAHEEM, H.; FARGHALI, A.; et al. Green synthesis and characterization of iron



oxide nanoparticles for the removal of heavy metals (Cd^{2+} and Ni^{2+}) from aqueous solutions with antimicrobial investigation. *Scientific Reports*, v. 13, 2023. DOI: [10.1038/s41598-023-31704-7](https://doi.org/10.1038/s41598-023-31704-7).

NATH, P.; SARKER, P. K. Effect of GGBFS on setting, workability, and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Construction and Building Materials*, v. 66, p. 163-171, 2014. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080).

OLIVEIRA, L. C.; FABRIS, J. D.; PEREIRA, M. C. Óxidos de ferro e suas aplicações em processos catalíticos: uma revisão. *Química Nova*, v. 36, p. 123-130, 2013. DOI: [10.1590/S0100-40422013000100022](https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000100022).

PONOMAR, V.; ADESANYA, E.; OHENOJA, K.; ILLIKAINEN, M. High-temperature performance of slag-based Fe-rich alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, v. 161, p. 106960, 2022a. DOI: [10.1016/j.cemconres.2022.106960](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106960).

PONOMAR, V.; YLINIEMI, J.; ADESANYA, E.; OHENOJA, K.; ILLIKAINEN, M. An overview of the utilisation of Fe-rich residues in alkali-activated binders: mechanical properties and state of iron. *Journal of Cleaner Production*, v. 330, p. 129900, 2022b. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.129900](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129900).

POTGIETER, J. H. An overview of cement production: how "green" and sustainable is the industry? *Environment Management and Sustainable Development*, v. 1, n. 2, p. 14, 2012. DOI: [10.5296/emsd.v1i2.1872](https://doi.org/10.5296/emsd.v1i2.1872).

SILVA DEFÁVERI, K. do C. e; SANTOS, L. F. dos; CARVALHO, J. M. F. de; PEIXOTO, R. A. F.; BRIGOLINI, G. J. Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: a study of mechanical and microstructural properties. *Construction and Building Materials*, v. 220, p. 375-385, 2019. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.05.181](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.181).

ZHANG, Y.; LIU, B.; GU, X.; NEHDI, M. L.; ZHANG, L. V. Mechanochemical activation of iron ore tailing-based ternary supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, v. 346, art. 128420, 2022. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.128420](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128420).



MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL STUDY OF GEOPOLYMERS OBTAINED FROM THE IRON ORE TAILING

ABSTRACT

The railway infrastructure industry needs sustainable and economically viable alternatives to replace traditional Portland cement concrete and treated wood sleepers, which have high carbon footprints and degradation problems. This study investigates the microstructural and mechanical viability of geopolymers formulated from iron ore extraction tailings as a novel cementitious binder for railway sleepers. Using a fine iron ore residue (74.68% by mass Fe_2O_3 and 19.08% SiO_2) as a precursor for the production of geopolymers activated with sodium metasilicate (Na_2SiO_3) in a 7:2:2 ratio (tailings:activator:water), this work promotes a circular economy approach by reusing mining waste in a high-value structural matrix. Thermal and microstructural characterizations revealed that calcination treatments up to 600 °C favor the formation of partially crystalline phases of sodium and iron aluminosilicate. To validate its applicability under conditions simulating train traffic, the dynamic impact resistance of the hardened geopolymer paste was evaluated using the α -Treton mechanical impact test, assessing the intrinsic cohesion and fracture toughness of the binder itself. The results demonstrated adequate impact resistance for calcination temperatures up to 600 °C, after which microcracking compromised structural integrity. Ultimately, the synthesized iron-rich geopolymer presents itself as a viable and low-emission cementitious binder, capable of replacing Portland cement in railway sleepers, converting a waste product into a cohesive and stable composite.

Keywords: *Iron ore tailing; Geopolymer; Alkaline activation; Thermal analysis; Shock Test.*