

Estudo do desempenho mecânico de geopolímero produzido com auto teor de ferro

Marina Carvalho da Silva¹, Lêda de Azevedo Racanelli² , José Antônio da Silva Souza², João Nazareno Nonato Quaresma², Matheus Silva Corrêa³

¹Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química. Rua Augusto Corrêa, 110, Guamá, 66075-110, Belém, PA, Brasil.

²Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia. Rua Augusto Corrêa, 110, Guamá, 66075-110, Belém, PA, Brasil.

³Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Civil. Rua Augusto Corrêa, 110, Guamá, 66075-110, Belém, PA, Brasil.

e-mail: lbsracanelli@hotmail.com, dscarvalhomari@gmail.com, jass@ufpa.br, jnnquaresma@gmail.com, eng.matheus.correa@gmail.com

RESUMO

A característica mais comum dos cimentos geopoliméricos é que eles contêm uma quantidade relativamente pequena de óxidos de ferro. Isso se deve ao fato de que vários cientistas desconfiam da ação nociva de alguns compostos ferrosos no desenvolvimento da reação geopolimérica. Para alguns pesquisadores o Fe pode interferir negativamente no processo de geopolimerização do material, enquanto que, em alguns novos estudos o papel do Fe tem revelado resultados interessantes. No intuito de verificar a resistência mecânica alcançada pelo geopolímero obtido a partir do rejeito da lavagem da bauxita, que possui em sua composição alto teor de ferro, a presente pesquisa pretende utilizar 100% dessa matéria-prima calcinada como precursor, e reagentes como o NaOH e Na₂SiO₃ como ativadores no processo. Todos os materiais foram caracterizados perante suas propriedades físicas e mineralógicas, a fim de possibilitar a correta dosagem dos materiais. Com os geopolímeros obtidos, avaliou-se a resistência a compressão, variando a concentração de NaOH em 8 M e 10 M para diferentes tempos de cura (7 e 28 dias). Análise de difração de raios X (DRX), Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), análise granulométrica e testes de resistência mecânica. Mesmo com aproximadamente 25% de ferro, os geopolímeros apresentaram comportamento mecânico compatível com funções atribuídas e similares a normativa estabelecida para o cimento Portland, com resistência máxima de 25,85 MPa.

Palavras-chave: Geopolímero; Ferro; Caracterização; Propriedade mecânica.

ABSTRACT

The most common feature of geopolymer cements is that they contain a relatively small amount of iron oxides. This is due to the fact that several scientists suspect the harmful action of some Fe⁺⁺ ferrous compounds in the development of the geopolymeric reaction. For some researchers, Fe can interfere negatively in the geopolymerization process of the material, while, in some new studies, the role of Fe has revealed interesting results for geopolymers. In order to verify the mechanical resistance achieved by the geopolymer obtained from the bauxite washing waste, which has a high iron content in its composition, the present research intends to use 100% of this calcined raw material as a precursor, and reagents such as NaOH and Na₂SiO₃ as activators in the process. All materials were characterized in terms of their physical and mineralogical properties, in order to enable the correct dosage of materials. With the geopolymers obtained, the compressive strength was evaluated, varying the concentration of NaOH in 8 M and 10 M for different curing times (7 and 28 days). X-ray diffraction analysis (DRX), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), granulometric analysis and mechanical resistance tests. Even with approximately 25% of iron, the geopolymers presented a mechanical behavior compatible with assigned functions and similar to the norms established for Portland cement, with a maximum resistance of 25.85 MPa.

Keywords: Geopolymer; Iron; Description; Mechanical property.

1. INTRODUÇÃO

A produção de cimento Portland convencional é um processo com alto consumo de energia e gera impactos ambientais como a emissão de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera por exemplo, cerca de 5 a 7% das emissões em todo mundo [1]. Ainda que ações de melhoria no processo de produção de cimento diminuam significativamente a essa emissão, há pesquisas que apontam um aumento de 12 a 23% até 2050, devido à crescente demanda por produtos à base de cimento, principalmente em países em desenvolvimento [2]. Neste cenário, novas alternativas mais sustentáveis de materiais cimentícios estão sendo investigadas, como os geopolímeros, que possuem similaridade ao comportamento mecânico quando comparado à tecnologia tradicional [3, 4].

Os geopolímeros são polímeros inorgânicos, semicristalinos formados por uma longa cadeia de unidades tetraédricas de AlO_4 e SiO_4 [5–7]. A reação para formar a rede geopolimérica ocorre através de dois materiais, um precursor e um ativador alcalino, sendo esses materiais que contêm aluminossilicatos na sua composição e uma solução de silicato de sódio ou hidróxido de metais alcalinos [8].

De modo geral, a seleção da matéria-prima e condições de preparação dos materiais ativados alcalinamente promove alterações nas reações, conseqüentemente, nas propriedades e características finais do ligante geopolimérico, como elevada resistência à compressão, baixa retração, cura rápida ou lenta, resistência a ácidos; resistência ao fogo e baixa condutividade térmica [9].

O desenvolvimento desses ligantes agrega valor pela sua capacidade de introduzir na sua produção diversos materiais, como os minerais naturais ou sintéticos, subprodutos ou resíduos das indústrias como o metacaulim, cinza volante, escória granulada de alto forno, cinza de arroz, sílica ativa, argilas, lama vermelha, rejeito de lavagem de bauxita ou até uma combinação destes [9–12].

A composição mineralógica do material de partida influencia em uma maior resistência do geopolímero, que pode ser obtida quando apresentam uma alta taxa de dissolução ou através da calcinação das matérias-primas [13]. Outro exemplo, o teor de ferro presentes em minerais de ferro como hematita, magnetita, maghemita, goethita, limonita e entre outros, que são encontrados em quantidades significativas de fontes de aluminossilicatos, também afetam as propriedades mecânicas dos geopolímeros [14].

Diversos autores [15–18] avaliaram como esses tipos de minerais influenciam na resistência à compressão de materiais geopoliméricos, entretanto as conclusões divergem. ESSAIDI *et al.* [19] e ZAILANI *et al.* [20] investigaram o efeito do mineral hematita nas propriedades mecânicas de geopolímero à base de metacaulim e cinza volante, respectivamente. Para os autores ESSAIDI *et al.* [19], a pesquisa concluiu que por conta do seu caráter friável, a presença de hematita nos sistemas geopoliméricos diminuem as propriedades mecânicas dos geopolímeros. Porém, para os autores ZAILANI *et al.* [20], o mineral de ferro presente na composição pode melhorar as propriedades mecânicas. KAYA *et al.* [17] investigaram a influência do micro Fe_2O_3 nas propriedades físicas e mecânicas de materiais geopoliméricos à base de zeólita e caulim, relatando que a incorporação do Fe_2O_3 melhorou as propriedades físicas e mecânicas dos geopolímeros.

O comportamento do ferro na reação de geopolimerização depende de qual estado físico e mineralógico o ferro está contido na matéria-prima [21, 22]. NGNINTEDEM *et al.* [14] investigaram a influência de três minerais de ferro, sendo estes a hematita, magnetita e goetita, na resistência à compressão em materiais geopoliméricos à base de metacaulim. Foi observado uma maior resistência nos geopolímeros contendo hematita e magnetita em comparação com os contendo goetita. Esse resultado foi atribuído a uma matriz mais compacta e densa nos geopolímeros devido a adição de hematita e magnetita quando comparados ao com adição de goetita. Além disso, dentre os minerais de ferro estudados, a hematita com cerca de 10% de teor em peso e com tamanhos em média de 120 μm , obteve melhor desempenho em relação a resistência.

Os autores LEMOUGNA *et al.* [23] estudaram o papel do ferro na formação de polímeros inorgânicos a partir de cinzas volantes. Os autores utilizaram duas cinzas volantes, com teores de 12 e 14% de Fe_2O_3 e com composição química e mineralógica semelhantes, diferenciando apenas no tamanho das partículas. As amostras contendo 12% de teor de Fe adquiriram maior resistência, entretanto, ainda são baixas, indicando que a presença do ferro interferiu no desenvolvimento da resistência. Para os autores, já que a diferença de teor de ferro entre as duas cinzas volantes é relativamente pequena, é provável que uma maior resistência na cinza com menor teor de ferro seja decorrente do seu teor muito maior de partículas na faixa de 2 a 100 μm .

Outros autores [20] também pesquisaram o efeito do óxido de ferro nas propriedades mecânicas de geopolímeros à base de cinza volante. De acordo com esses autores, o alto teor de ferro nas matérias-primas pode prolongar a reação de geopolimerização com solução alcalina, formando um gel aglutinante de silicato de ferro. Isso se deve à alta massa atômica e ao diâmetro atômico do ferro, maior do que a sílica e a alumina. Assim, a presença do óxido de ferro foi atribuída a um maior tempo de cura colaborando com o aumento da resistência à compressão.

Recentemente alguns pesquisadores têm realizado estudos com solos lateríticos, geralmente compostos com 40% de óxido de ferro, para a síntese de geopolímeros [24–26]. Segundo os autores KAZE *et al.* [27], em lateritas calcinadas, os minerais de ferro, quando ativados por solução alcalina ou ácida, participam da reação de geopolimerização formando géis de berlinita, silicato de ferro, poli(ferrosialato-siloxo) e poli(ferrosialato-disiloxo) e que a reatividade dos minerais de ferro depende do ativador utilizado e do seu estado disponível no precursor. Esses resultados estão de acordo com os estudos de KAZE *et al.* [28], que investigaram o uso de lateritas na síntese de geopolímeros, concluindo também que o Fe^{+3} participa da reação de geopolimerização, inserindo em uma estrutura da rede de hidrato de aluminossilicato de sódio.

Como os geopolímeros sintetizados a partir de materiais rico em Ferro ainda é pouco estudado, mesmo sabendo à estabilidade das fases de ferro e sua completa integração na estrutura dos poliméricos inorgânicos garante resistência no material formado [29]. Esse trabalho tem por objetivo utilizar o rejeito da lavagem da bauxita, rico em ferro, como fonte precursora para obtenção de geopolímero, avaliando a resistência mecânica da pasta obtida a partir da variação da concentração de NaOH e tempo de cura em temperatura ambiente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizou-se rejeito de lavagem da bauxita (RLB), derivado de indústrias de mineração do Pará (Brasil). Essa matéria-prima é utilizada como precursor de aluminossilicato para a produção de geopolímero. Além disso, utilizou-se como ativadores alcalinos, hidróxido de sódio (NaOH) micro perola (Neon, 97% pureza) e solução de silicato de sódio alcalino (Na_2SiO_3) fornecidos pela empresa Comercial Aliança de Produtos Químicos LTDA.

Para análise granulométrica, esta foi realizada em equipamento Cilas 1064. As fases mineralógicas das amostras tratadas foram determinadas por difração de raios X (DRX) de acordo com o método do pó. Pelo método de Rietveld é possível quantificar os teores dos minerais presentes. A interpretação dos dados se deu apoio do software HighScore da Malvern Panalytical. Utilizou-se difratômetro da Empyrean com radiação Co ($1,78 \text{ \AA}$) e potência ($40 \text{ kV} \times 40 \text{ mA}$), com tempo de passo de 0,02 e uma velocidade de varredura de 1,0/s para uma faixa 2θ de 3 e 94° .

Os principais elementos químicos das amostras in natura foram determinados por espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX) -700, Shimadzu, um ânodo de ródio (Rh) e de atmosfera He. A perda por ignição (LOI) foi determinada através do método gravimétrico pela calcinação de amostras previamente secas a 1000°C por 1h.

A espectroscopia de absorção na região do infravermelho foi realizada em um espectrofotômetro com transformada de Fourier (FTIR) (SHIMADZU, No. 206 73600–36- Kyoto-Japan) utilizando a técnica de produção de pastilhas por disco prensado, relatando a média de 32 varreduras com resolução de 4 cm^{-1} , na região espectral de 4000 a 400 cm^{-1} .

A resistência à compressão dos corpos de prova foi testada em máquina universal de ensaios EMIC com velocidade de carregamento de $(0,45 \pm 0,15) \text{ MPa/s}$ para corpos de prova cilíndricos com altura de 100 mm.

2.1. Preparação/síntese e caracterização de geopolímeros

A matéria-prima RLB foi seca em forno a 105°C para garantir a retirada da umidade natural e depois tratado mecanicamente em moinho de bolas (Work Index/série 005) operando à frequência de 70 ± 3 rotações por minuto. O peso total da carga moedora foi de aproximadamente 20 kg, que corresponde a um total de 285 bolas de aço. Em seguida, peneirado a uma granulometria abaixo de $<150 \text{ mesh}$ e submetido termicamente à 600°C por 3 h para desidroxilação da caulinita e sua transformação em metacaulinita. Essas condições foram selecionadas com base em estudos anteriores [15].

Os reagentes foram preparados a partir de soluções de 8 e 10 M de NaOH e Na_2SiO_3 na proporção 1:2 por volume. Cada formulação foi colocada em argamassadeira (Solotest) juntamente com os ativadores (NaOH e Na_2SiO_3) lentamente adicionados e homogeneizados por 3 min. Após, a pasta de geopolímero foi adicionada em moldes plásticos em forma de cilindro com dimensões de $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, os quais foram vedados em filme plástico para controle da umidade e curados a 7 e 28 dias. As Tabelas 1 e 2, resumem a preparação e síntese.

Tabela 1: Proporções de materiais usados.

MATERIAL	FORMULAÇÃO	RLBC (G)	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$
100_RLBC	100 (em massa)	260	2,56		
NaOH/ Na_2SiO_3	1:2 (em volume) – 8 M			14,08	0,89
	1:2 (em volume) – 10 M			14,00	0,93

Tabela 2: Dado experimental.

FORMULAÇÃO	CONCENTRAÇÃO MOLAR (M)	DIAS (D)	
100_RLBC	8	7	28
100_RLBC	10	7	28

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Composição química

A composição química do precursor é apresentada na Tabela 3. A amostra consiste principalmente em SiO₂ (23,07%), Al₂O₃ (46,97%), e Fe₂O₃ (25,99%).

Observa-se que o teor de sílica (SiO₂) é maior em relação a quantidade de óxido de cálcio (CaO), portanto, o material é classificado como sendo de baixo teor de cálcio (SiO₂ + CaO ≤ 70%), logo, são materiais com possibilidade de produção de materiais geopolímeros [16].

3.2. DRX do RLB in natura

A Figura 1 mostrou que o RLB in natura possui gibbsita e caulinita como os minerais principais, sendo que possui aproximadamente 53,9% de gibbsita (PDF 00-007-0324) e 33,7% de caulinita (PDF 01-080-0886), outros minerais presentes como hematita (PDF 01-085-0599), anatásio (PDF 00-001-0562) e goetita (PDF 00-017-0536), além de possíveis fases não detectadas, que somam 12,4%. Esses resultados estão bem próximos dos valores obtidos por NASCIMENTO [30].

3.3. DRX do RLB calcinado

Após a calcinação do rejeito, a Figura 2 revela que os padrões difratométricos de gibbsita e caulinita desapareceram, indicando assim a transformação em um material amorfo ou parcialmente amorfo, e reativo [31].

3.4. Análise granulométrica do rejeito calcinado a 600 °C

A análise granulométrica permite determinar a distribuição do tamanho das partículas, para que dessa forma seja analisada as dimensões e capacidade de trabalhabilidade do material.

A distribuição granulométrica revela que o RLBC é composto principalmente de partículas finas, como pode ser visto na Figura 3. O valor do diâmetro médio (d_M) obtido contribui para um melhoramento da matriz cimentícia já que para produção de materiais geopoliméricos, o esperado é que a maioria das partículas sejam menores que 65 μm [32, 33], pois quanto mais fino o material, maior será a área de superfície e reatividade. O RLBC possui uma distribuição granulométrica adequada (Tabela 4) e de acordo com a literatura.

Tabela 3: Composição química (%).

Matéria prima	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	LOI
RLB	23,07	46,97	—	0,36	25,99	3,10	8,13

LOI = loss on ignition.

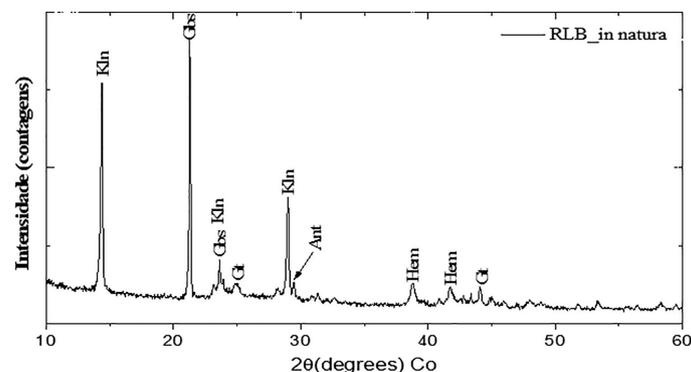


Figura 1: Rejeito da lavagem da bauxita (RLB) com fases de Kln (Caulinita), Gbs (Gibbsita), Goetita (Gt), Hematita (Hem) e Anatásio (Ant).

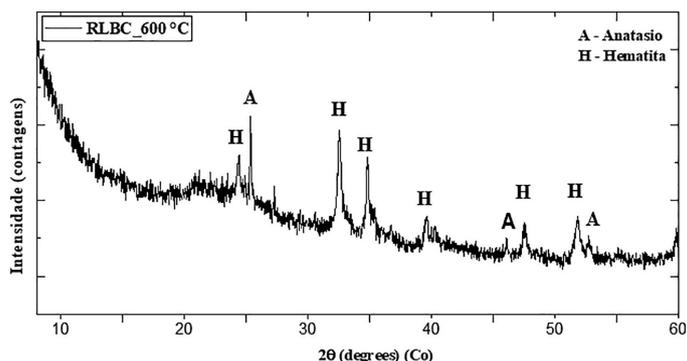


Figura 2: Rejeito da lavagem da bauxita calcinado (RLBC) à 600 °C com fases mineralógicas de Hematita (Hem) e Anatásio (Ant).

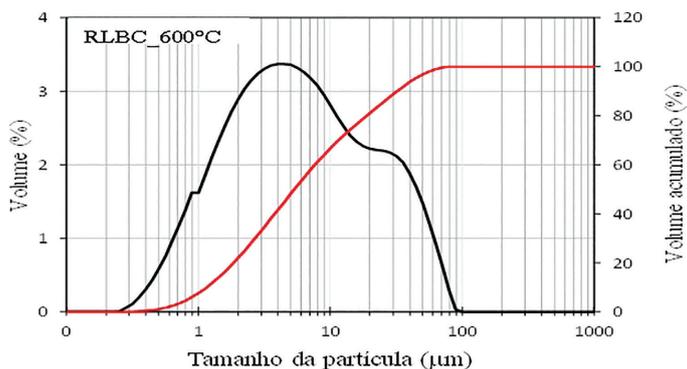


Figura 3: Distribuição de tamanho de partícula do RLBC.

Tabela 4: Diâmetro das partículas.

MATÉRIA-PRIMA	DIÂMETRO DE REFERÊNCIA (µm)			
	d ₁₀ (µm)	d ₅₀ (µm)	d ₉₀ (µm)	d _M
RLBC	1,1	5,3	31,9	11,3

d₁₀ = 10% das partículas da amostra estão abaixo deste valor; d₅₀ = 50% das partículas da amostra estão abaixo desse valor e d₉₀ = 90% das partículas da amostra estão abaixo desse valor.

3.5. Caracterização dos geopolímeros

3.5.1. DRX dos geopolímeros

Como pode ser observado na Figura 4, a amostra ativada com 8 M, ao passar dos dias de cura, não apresenta diferenças significativas em sua estrutura, mas deixa visível uma leve protuberância parcialmente amorfa entre 20° e 45° (2θ) relacionada provavelmente à formação de uma estrutura polimérica desordenada [21, 22]. Fases como de anatásio (TiO₂-PDF#98-010-6857) e hematita (Fe₂O₃-PDF#98-010-8081) também são observados, indicando que são inertes durante a ativação alcalina [20, 23, 24]. A caulinita também se faz presente na estrutura geopolimérica, mostrando assim que o processo de desidroxilação na temperatura escolhida, foi incompleto. Cristais de bicarbonato de sódio (Trona -Na₃(CO₃)(HCO₃) · 2H₂O; PDF# 98-001-4309) também aparecem, provavelmente, pelo excesso de álcalis na matriz geopolimérica [25].

Ainda na Figura 5, porém ativada com 10 M, mostra que com passar dos dias de cura, percebe-se também uma protuberância parcialmente amorfa entre 20° e 45° (2θ) relacionada provavelmente à formação de uma estrutura polimérica desordenada [20, 21]. Fases como de anatásio (TiO₂ - PDF# 98-010-6857) e hematita (Fe₂O₃ - PDF# 98-010-8081) ainda são observados, indicando que mesmo com uma concentração molar maior, ainda sim permanecem durante a ativação alcalina [20, 23, 24]. A caulinita também se faz presente na estrutura geopolimérica, mostrando assim que o processo de desidroxilação na temperatura escolhida, foi incompleto. Cristais de bicarbonato de sódio (Trona- Na₃(CO₃)(HCO₃)·2H₂O; PDF# 98-001-4309) também aparecem, provavelmente, pelo excesso de álcalis na matriz geopolimérica [25].

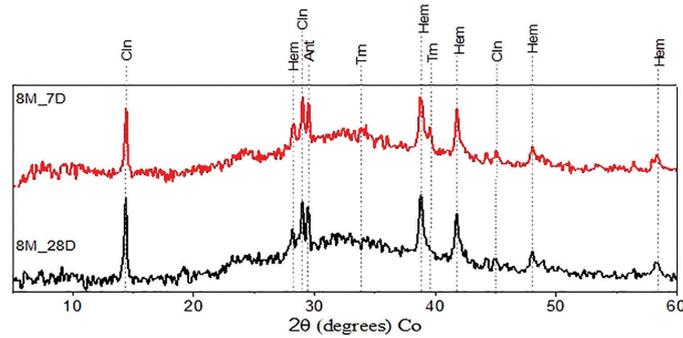


Figura 4: Difração de raios X dos geopolímeros ativados com 8 M. Apresentando fases como Caulinita (Cln), Hematita (Hem), Anatásio (Ant) e Trona (Trn).

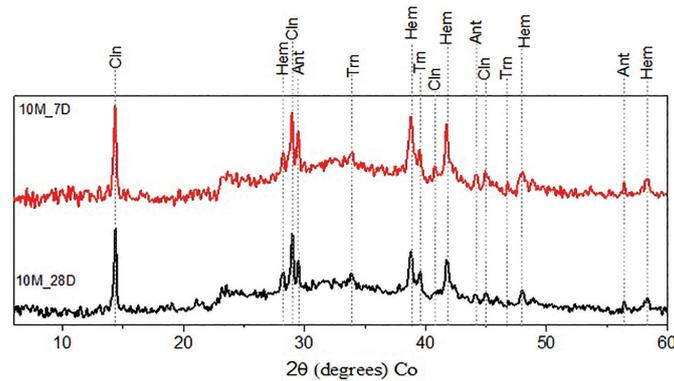


Figura 5: Difração de raios X dos geopolímeros ativados com 10 M. Apresentando fases como Caulinita (Cln), Hematita (Hem), Anatásio (Ant) e Trona (Trn).

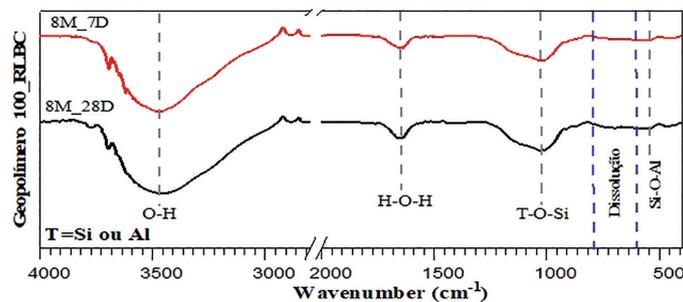


Figura 6: Espectro de FTIR de geopolímeros ativados a 8 M.

3.5.2. Espectros FTIR dos geopolímeros

Para Figura 6, ativada a uma concentração de NaOH 8 M, observa-se que com o passar dos dias de cura, há modos vibracionais semelhantes, ou seja, em $\sim 3450\text{ cm}^{-1}$ tem-se bandas atribuídas às vibrações O-H [26, 27]. As bandas entre 1650 cm^{-1} e 1630 cm^{-1} são atribuídas a estiramentos H-O-H, as quais indicam a presença de interações fracas de moléculas de H_2O que são adsorvidas na superfície ou estão presas nas regiões interlamelares da estrutura geopolimérica [28–30]. Em ~ 1200 a 900 cm^{-1} são atribuídas às vibrações assimétricas da ligação T-O-Si (T = Si ou Al) que são resultados da reorganização da molécula de TO_4 durante a reação de geopolimerização [33]. Pode-se perceber modos vibracionais próximos a 1020 cm^{-1} caracterizando a formação de gel geopolimérico [30].

Entre 800 a 600 cm^{-1} indica-se a dissolução de espécies para a formação dos laços próprios da estrutura do geopolímero [7, 34, 35], contudo é possível observar que esses modos vibracionais são bem suaves e pouco perceptíveis. Em torno de $\sim 540\text{ cm}^{-1}$ observa-se as ligações de Si-O-Al [35].

Para Figura 7, porém, ativada a 10 M, observa-se que com o passar dos dias de cura, há modos em $\sim 3450\text{ cm}^{-1}$ que são atribuídas às vibrações O-H. A banda menos intensa aos 28 Dias de cura, sugere a adsorção das moléculas de água do material [26, 27]. Bandas entre 1650 cm^{-1} e 1630 cm^{-1} são atribuídas às

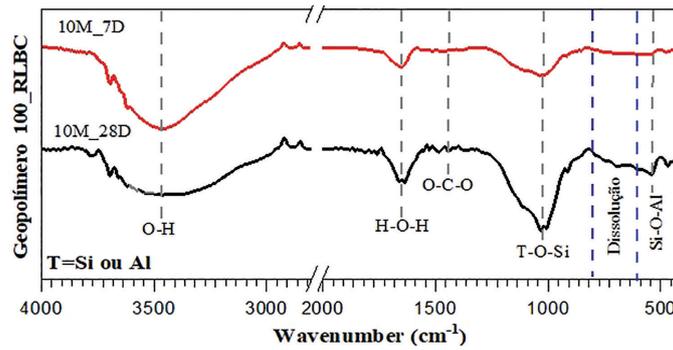


Figura 7: Espectro de FTIR de geopolímeros ativados a 10 M.

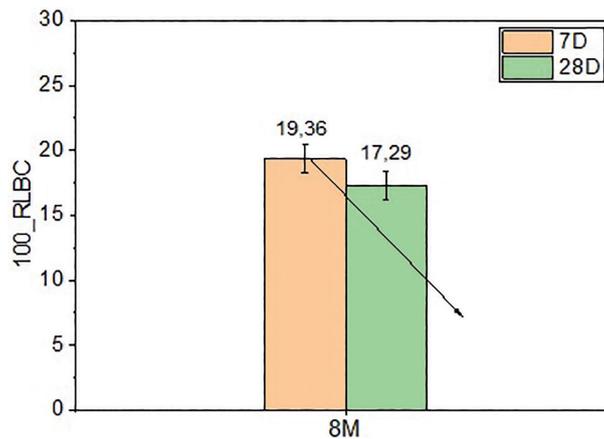


Figura 8: Resistência à compressão da formulação ativada a 8 M.

interações fracas de moléculas de H_2O que são adsorvidas na superfície ou estão presas nas regiões interlamelares da estrutura geopolimérica [28–30]. O surgimento de bandas em torno ~ 1470 e 1440 cm^{-1} são atribuídas ao fenômeno da eflorescência (formação de Na_2CO_3) obtida da reação entre o hidróxido de sódio e o dióxido de carbono. Geralmente estão relacionados ao excesso de álcalis na matriz geopolimérica [36–38], neste caso, ativado a 10 M. Em ~ 1200 a 900 cm^{-1} são atribuídas às vibrações assimétricas da ligação T-O-Si, resultantes da reação de geopolimerização [31]. Modos vibracionais próximos a 1020 cm^{-1} também são observados, caracterizando a formação de gel geopolimérico [30]. Entre 800 a 600 cm^{-1} é possível perceber modos vibracionais mais acentuados que refletem a dissolução de espécies para a formação dos laços próprios da estrutura do geopolímero [33–35]. Em torno de ~ 550 a 500 cm^{-1} observa-se as ligações de Si-O-Al na estrutura [39].

3.6. Propriedades técnicas do geopolímero

3.6.1. Resistência mecânica à compressão

Na Figura 8, para a menor concentração de NaOH 8 M, a resistência à compressão do geopolímero diminuiu com o tempo de cura de 19,36 para 17,29 MPa. Essa redução da resistência pode estar associada ao baixo grau de polimerização da amostra, visto que, foi possível observar a presença de materiais de baixa reatividade, como a caulinita por exemplo. Sabe-se que quanto menos reativo o precursor, mais difícil a reação de geopolimerização, culminando assim, em um material pouco denso, mais poroso e pouco resistente [40].

Na Figura 9, para a maior concentração de NaOH, a resistência à compressão do geopolímero aumentou com o tempo de cura. Em uma concentração alcalina de 10 M, a resistência aumentou de 12,53 para 25,85 MPa dos dias estudados. Esse aumento provavelmente pode ser justificado pelo grau de polimerização eficiente e fechamento dos poros ao longo do tempo, formando uma estrutura mais densa e resistente [41]. Mesmo que haja a presença de carbonato de sódio nessa formulação (observadas nas análises anteriores), é possível dizer que não houve interferência na estrutura geopolimérica do material com o passar dos dias [42].

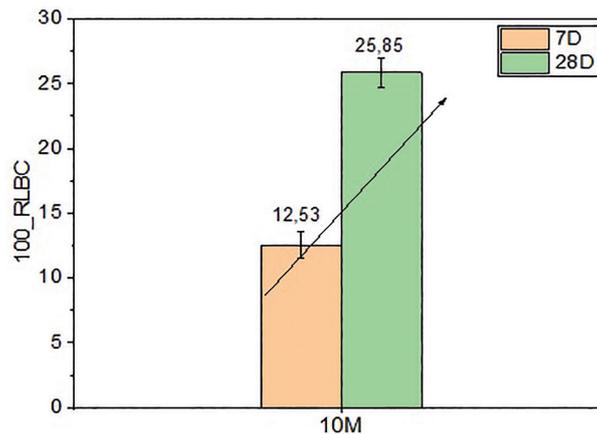


Figura 9: Resistência à compressão da formulação ativada a 10 M.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como principal objetivo avaliar a resistência mecânica dos geopolímeros com alto teor de ferro em sua composição. Ao analisar os resultados, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- A resistência mecânica dos geopolímeros aumentam com o aumento da concentração de NaOH;
- Com o passar dos dias de cura, é possível perceber que há instabilidade na resistência mecânica, ou seja, enquanto a 8 M tende a reduzir, a 10 M tende a aumentar;
- Apesar da elevada quantidade de ferro do rejeito estudado, obtém-se valores de resistência a compressão satisfatórios para a indústria da construção civil;
- A pasta geopolimérica obtida da concentração de NaOH 10 M, é a melhor formulação encontrada.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, PRODERNA e UFPA pelo incentivo a pesquisa.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] BERNDT, M.L., “Influence of concrete mix design on CO₂ emissions for large wind turbine foundations”, *Renewable Energy*, v. 83, pp. 608–614, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.002>.
- [2] ARRUDA JUNIOR, E.S., BARATA, M.S., “Cimento de baixo impacto ambiental a partir dos resíduos caulínicos da Amazônia”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 27, n. 1, pp. e202146434, 2022.
- [3] COSTA, L.M., ALMEIDA, N.G.S., HOUMARD, M., *et al.*, “Influence of the addition of amorphous and crystalline sílica on the structural properties of metakaolin-based geopolymer”, *Applied Clay Science*, v. 215, pp. 106312, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2021.106312>.
- [4] GHELLER, R., SILVA, L.L., FIORI, M.A. *et al.*, “Exploratory study for the alkaline activation of basalt powder as a supplementary cementitious matrix”, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 15, n. 3, pp. e15405, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952022000400005>.
- [5] TCHAKOUTÉ, H.K., RÜSCHER, C.H., KONG, S., *et al.*, “Geopolymer binders from metakaolin using sodium waterglass from waste glass and rice husk ash as alternative activators: a comparative study”, *Construction & Building Materials*, v. 114, pp. 276–289, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.184>.
- [6] APOLONIO, P.H., LIMA, J.S., MARINHO, E.P., *et al.*, “Produção de geopolímeros utilizando cinza da casca de arroz como fonte complementar de sílica”, *Cerâmica*, v. 66, n. 378, pp. 172–178, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132020663782914>.
- [7] PEREIRA, A.P.S., RAMOS, F.J.H.T.V., SILVA, M.H.P., “Caracterização estrutural de geopolímeros sustentáveis de escória de aciaria LD e escória de aciaria LF com KOH”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 3, pp. e12827, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200003.1127>.
- [8] LERMEN, R. T., REMONTTI, T. L., SILVA, R.A., “Influência da quantidade de água na formação de eflorescência em geopolímeros a base de metacaulim”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 27, n. 4, pp. e20220120, 2022.

- [9] ASIM, N., ALGHOUL, M., MOHAMMAD, M., *et al.*, “Emerging sustainable solutions for depollution: Geopolymers”, *Construction & Building Materials*, v. 199, pp. 540–548, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.043>.
- [10] AZEVEDO, A.G.S., STRECKER, K., LOMBARDI, C.T., “Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha”, *Cerâmica*, v. 64, n. 371, pp. 388–396, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132018643712420>.
- [11] BAI, C., COLOMBO, P., “Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: a review”, *Ceramics International*, v. 44, n. 14, pp. 16103–16118, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.05.219>.
- [12] RACANELLI, L.A., OLIVEIRA, T.C., BRITO, W.S. *et al.*, “Uso de rejeito de lavagem de bauxita para a fabricação de ligantes geopoliméricos”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 1, pp. e12595, 2020.
- [13] SHEHATA, N., SAYED, E.T., ABDELKAREEM, M.A., “Recent progress in environmentally friendly geopolymers: a review”, *The Science of the Total Environment*, v. 762, pp. 143166, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143166>. PubMed PMID: 33190897.
- [14] NGNINTEDEM, D.L.V., LAMPE, M., TCHAKOUTÉ, H.K., *et al.*, “Effects of iron minerals on the compressive strengths and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer materials”, *Gels (Basel, Switzerland)*, v. 8, n. 8, pp. 525, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/gels8080525>. PubMed PMID: 36005126.
- [15] CHOI, S.C., LEE, W.K., “Effect of Fe₂O₃ on the physical property of geopolymer paste”, *Advanced Materials Research*, v. 586, pp. 126–129, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.586.126>.
- [16] FEKOUA, J.N.N., *et al.*, “Effects of curing cycles on developing strength and microstructure of goethite-rich aluminosilicate (corroded laterite) based geopolymer composites”, *Materials Chemistry and Physics*, v. 270, pp. 124864, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124864>.
- [17] KAYA, M., KOKSAL, F., GENCEL, O., *et al.*, “Influence of micro Fe₂O₃ and MgO on the physical and mechanical properties of the zeolite and kaolin based geopolymer mortar”, *Journal of Building Engineering*, v. 52, pp. 104443, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2022.104443>.
- [18] ABDALLA, J.A., THOMAS, B.S., HAWILEH, R.A., *et al.*, “Influence of nano-TiO₂, nano-Fe₂O₃, nanoclay and nano-CaCO₃ on the properties of cement/geopolymer concrete”, *Cleaner Materials*, v. 4, pp. 100061, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clema.2022.100061>.
- [19] ESSAIDI, N., SAMET, B., BAKLOUTI, S., *et al.*, “The role of hematite in aluminosilicate gels based on metakaolin”, *Ceramics-Silikáty*, v. 58, n. 1, pp. 1–11, 2014.
- [20] ZAILANI, W.W.A., ABDULLAH, M.M.A., ARSHAD, M.F., *et al.*, “Effect of iron oxide (Fe₂O₃) on the properties of fly ash based geopolymer”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 877, pp. 012017, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/877/1/012017>.
- [21] HU, Y., LIANG, S., YANG, J., *et al.*, “Role of Fe species in geopolymer synthesized from alkali-thermal pretreated Fe-rich Bayer red mud”, *Construction & Building Materials*, v. 200, pp. 398–407, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.122>.
- [22] LI, X., WANG, P., GUO, Z., *et al.*, “Effect of Fe²⁺/Fe³⁺ on high-strength ceramsite prepared by sintering geopolymers using iron ore tailings”, *Ceramics International*, v. 48, n. 4, pp. 5681–5688, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.113>.
- [23] LEMOUGNA, P.N., MACKENZIE, K.J.D., JAMESON, G.N.L., *et al.*, “The role of iron in the formation of inorganic polymers (geopolymers) from volcanic ash: a Fe Mössbauer spectroscopy study”, *Journal of Materials Science*, v. 48, n. 15, pp. 5280–5286, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-013-7319-4>.
- [24] KAZE, C.R., LEMOUGNA, P.N., “Characterization and performance evaluation of laterite based geopolymer binder cured at different temperatures”, *Construction & Building Materials*, v. 270, pp. 121443, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121443>.
- [25] TEERAWATTANASUK, C., VOOTTIPRUEX, P., “Comparison between cement and fly ash geopolymer for stabilized marginal lateritic soil as road material”, *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 20, n. 11, pp. 1264–1274, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2017.1402593>.
- [26] SÁ RIBEIRO, M.G., SARDELA, M.R., KEANE, P.F., *et al.*, “Lateritic soil geopolymer composites for ceramics and engineering construction applications”, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, v. 19, n. 4, pp. 2148–2159, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/ijac.14046>.

- [27] KAZE, R.C., NAGHIZADEH, A., TCHADJIE, L., *et al.*, “Lateritic soils based geopolymer materials: a review”, *Construction & Building Materials*, v. 344, pp. 128157, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128157>.
- [28] KAZE, R.C., BELEUK À MOUNGAM, L.M., FONKWE DJOUKA, M.L., *et al.*, “The corrosion of kaolinite by iron minerals and the effects on geopolymerization”, *Applied Clay Science*, v. 138, pp. 48–62, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2016.12.040>.
- [29] OBONYO, E.A., KAMSEU, E., LEMOUGNA, P., *et al.*, “A sustainable approach for the geopolymerization of natural iron-rich aluminosilicate materials”, *Sustainability*, v. 6, n. 9, pp. 5535–5553, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/su6095535>.
- [30] NASCIMENTO, L.G., “Síntese de zeólitas a partir do rejeito gibbissítico-caulinítico do do beneficiamento de bauxita de paragominas-Pa”. Dissertação (M.Sc), UFPA, Marabá, Pa, 2013.
- [31] OLIVEIRA, M.P., NÓBREGA, A.F., DI CAMPOS, M.S., *et al.*, “Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. In: *Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infraestrutura de Interesses Sociais*, Pirassununga, 2004.
- [32] GRIGOLI, A.S., HELENE, P., “Comportamento das adições minerais inertes em poros e zona de transição em concretos”, In: *II Encontro Tecnológico de Engenharia Civil e Arquitetura de Maringá*, Paraná, 2001.
- [33] KAYA, K., SOYER-UZUN, S., “Evolution of structural characteristics and compressive strength in red mud metakaolin based geopolymer systems”, *Ceramics International*, v. 42, n. 6, pp. 7406–7413, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.01.144>.
- [34] GRILLO, F., MATOSKI, A., ALBERTI, M.E., “Caracterização de geopolímeros elaborados com resíduos de vidro e lodo de anodização”, *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 7, n. 6, pp. 60707–60725, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv7n6-446>.
- [35] DAVIDOVITS, J., *Geopolymer, chemistry and applications*, 4 ed., Saint-Quentin, Institut Géopolymère, 2015.
- [36] GARCÍA, C.I.V., “Síntesis de geopolímeros empleando activación alcalina de aluminosilicatos min rales”, D.Sc. Thesis – Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Chihuahua, 2013.
- [37] AZEVEDO, A.G.S., STRECKER, K., “Brazilian fly ash based inorganic polymers production using different alkali activator solutions”, *Ceramics International*, v. 43, n. 12, pp. 9012–9018, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.044>.
- [38] BELMOKHTAR, N., AMMARI, M., BRIGUI, J., *et al.*, “Comparison of the microstructure and the compressive strength of two geopolymers derived from Metakaolin and an industrial sludge”, *Construction & Building Materials*, v. 146, pp. 621–629, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.127>.
- [39] YUN-MING, L., CHENG-YONG, H., AL BAKRI, M.M., *et al.*, “Structure and properties of clay-based geopolymer cements: a review”, *Progress in Materials Science*, n. 83, pp. 595–629, 2016.
- [40] CHENG, H., XU, P., WANG, D., *et al.*, “Thermal decomposition behavior and de-intercalation kinetics of kaolinite/quaternary ammonium salt complexes”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 126, n. 2, pp. 421–433, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-016-5572-x>.
- [41] CHANGE, H., LIN, K.L., CUI, R., *et al.*, “Effect of solid - to - loiqui ratios on the properties of waste catalyst – metakaolin based geopolymer”, *Construction & Building Materials*, v. 88, pp. 74–83, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.005>.
- [42] LONGHI, M.A., “*Eflorescência em geopolímeros à base de metacaulim: formação, efeitos e mitigação*”, D.Sc. Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.