TELHA DE GEOPOLÍMERO

GEOPOLYMER ROOF TILE

RESUMO

A produção de cimento Portland contribui significativamente para as emissões globais de CO_2, motivando a busca por materiais ligantes alternativos com menor impacto ambiental, entre eles os geopolímeros, alternativa que se destaca como material promissor que pode substituir o cimento. Nesse contexto, esse artigo apresenta o desenvolvimento e a caracterização físico-mecânica de telhas plans produzidas com argamassa geopolimérica à base de metacaulim ativado por uma solução alcalina composta por hidróxido de sódio e silicato de sódio, com o objetivo de avaliar sua viabilidade técnica como alternativa às telhas convencionais de concreto. Foram moldados seis corpos de prova cilíndricos (50 × 100) mm para o ensaio de compressão axial e três telhas plans (170 × 465 × 50 mm) para os ensaios de flexão, absorção de água e estanqueidade, seguindo parâmetros da NBR 13858-2 (ABNT, 2009). Os resultados aos 28 dias indicaram resistência média à compressão axial de 40,8 MPa, carga de ruptura (média) à flexão de 3,34 kN, absorção de água de 13,5% e estanqueidade integral durante 60 minutos de chuva simulada. A resistência à flexão obtida foi aproximadamente 68% superior ao limite mínimo (2,0 kN) da NBR 13858-2 (ABNT, 2009). A absorção manteve-se dentro dos limites normativos.

Palavras-chave: concreto geopolimérico; telhas de concreto; sustentabilidade; materiais alternativos; construção civil.

ABSTRACT

Portland cement production contributes significantly to global CO_2 emissions, driving the search for alternative binder materials with lower environmental impact; among these, geopolymers stand out as a promising alternative to cement. In this context, this article presents the development and physico-mechanical characterization of flat roof tiles produced using a metakaolin-based geopolymer mortar activated by an alkaline solution of sodium hydroxide and sodium silicate, aiming to evaluate their technical feasibility as an alternative to conventional concrete tiles. Six cylindrical specimens (50 × 100 mm) were cast for axial compression testing, and three flat tiles (170 × 465 × 50 mm) were cast for flexural, water absorption, and watertightness testing, following the parameters of NBR 13858-2 (ABNT, 2009). Results at 28 days showed an average axial compressive strength of 40.8 MPa, an average flexural failure load of 3.34 kN, water absorption of 13.5%, and complete watertightness during 60 minutes of simulated rainfall. The flexural strength obtained was approximately 68% higher than the minimum limit (2.0 kN) specified in NBR 13858-2 (ABNT, 2009). Water absorption remained within the limits established by the standard.

Keywords: geopolymer concrete; roof tiles; sustainability; alternative materials; construction industry.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil, de acordo com Scrivener et al (2018), é um dos setores que mais consomem recursos naturais e mais produzem gases de efeito estufa (GEE) globalmente, sendo o cimento Portland o principal insumo que contribui para esse impacto. Tem por

estimativa que a indústria cimenteira seja responsável por cerca de 6% das emissões mundiais de dióxido de carbono, provenientes da calcinação do carbonato de cálcio, bem como da queima de combustíveis fósseis em fornos rotativos (McLellan et al., 2011; Scrivener et al., 2018). Com esse cenário, tem-se estimulado o desenvolvimento de ligantes alternativos como menor emissão de CO2.

Os ligantes álcali-ativados destacam-se entre as alternativas estudadas, sendo estes obtidos por meio da reação de aluminossilicatos amorfos, como os presentes em cinzas volantes, escórias granuladas de alto-forno, metacaulim e entre outros, juntamente com soluções alcalinas concentradas, resultando num material geopolímerico (Davidovits, 2015). Geopolímeros à base de metacaulim podem apresentar características mecânicas elevadas, de acordo com Qader (2024), onde o material puro pode alcançar resistência a compressão entre 50 a 70 MPa aos 28 dias de cura. Já Lermen (2022) e Boca Santa (2012) observaram resistência de 25 MPa ao se utilizar na composição resíduos de papel e uso de metacaulim comercial. De acordo com Singh (2018), a obtenção de altos desempenhos mecânicos é possível ao se ter um controle nas condições de cura.

Considerando as características mecânicas dos geopolímeros que são semelhantes e até superiores ao concreto convencional em termos de propriedades mecânicas, durabilidade e resistência térmica, esse material se torna viável para utilização na construção civil, especialmente em elementos como telhas de concreto, que são amplamente usadas em sistemas de cobertura devido suas características mecânicas e facilidade de produto. Entretanto a fabricação desse componente exige uso de cimento Portland, material de alto impacto ambiental em sua produção.

No Brasil, as telhas de concreto são normalizadas pela NBR 13858 (ABNT, 2009a), que estabelece parâmetros e métodos de ensaios para avaliar suas características físicas e mecânicas, entre elas aspectos como dimensões, resistência, impermeabilidade, durabilidade e formato de acabamento das telhas. Embora já se tenha estudos consolidados sobre concretos geopoliméricos, pesquisas sobre sua utilização para confecção de elementos de coberturas ainda é limitada. Alguns estudos apontados por Qader (2024) e Almutairi et al (2021) aponta o concreto geopolimérico com resultados promissores em desempenho mecânico e higrotérmico, quando utilizado em pavers, blocos e painéis. As diferenças entre concretos convencionais e geopolimérico é um tema relevante para o contexto da construção civil.

Contudo, a falta de uma norma específica para telhas geopoliméricas resulta na aplicação, por similaridade as normas para telhas de concreto e cerâmicas (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). O que reforça a necessidade de estudos experimentais que fundamentem futuras revisões das normas.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver e caracterizar, em escala laboratorial, telhas plans de geopolímeros à base de metacaulim ativado por hidróxido de sódio, avaliando seu desempenho físico-mecânico em comparação aos limites estabelecidos pelas normas brasileiras vigentes para telhas de concreto e cerâmicas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cimento Portland e impactos ambientais

De acordo com Scrivener et al (2018) a indústria do cimento tem alta contribuição nas emissões industriais de dióxido de carbono. Essas emissões são provenientes de dois processos: a calcinação do carbonato de cálcio e queima de combustíveis fosseis nos fornos rotativos. McLellan et al (2011) em seu estudo apontam que a cada 1 tonelada de cimento Portland produzido, é liberado cerca de 0,6 a 1 tonelada de CO2, esse valor varia de acordo com o tipo de energia utilizada na fabricação e o tipo de cimento. Como uma estratégia para reduzir esses

valores, tem se como alternativa o aumento do teor de adições minerais, substituição parcial do clínquer no processo de fabricação e o desenvolvimento de ligantes álcali-ativados.

2.2 Geopolímeros: química e desempenho

Davidovits (2015) define os geopolímeros como polímeros inorgânicos resultantes da polimerização por condensação de aluminossilicatos em meio alcalino e produzidos em temperaturas abaixo de 100°C. De acordo com Duxson et al. (2007) e Provis e Bernal (2014), o processo de geopolimerização ocorre em três etapas: A primeira dissolução dos aluminossilicatos, que ocorre por hidrólise alcalina do precursor sólido, liberando aluminato e silicato para a solução; a segunda sendo uma reorientação e policondensação e, por fim, a terceira onde ocorre a formação de estrutura tridimensional amorfa.

Algumas propriedades dos geopolímeros como porosidade, resistência mecânica e durabilidade estão intrinsecamente ligadas a características como a relação molar entre dióxido de silício e óxido de alumínio, percentual da concentração da solução ativadora, teor de água no traço e condições de cura como temperatura e tempo (Qader et al, 2024; Lermen, 2022).

De acordo com Almutairi et al. (2021) no que se trata de geopolímeros à base de metacaulim, pode-se observar uma resistência à compressão semelhante ou até mesmo superior à dos concretos convencionais à base de cimento Portland quando se tem uma cura adequada. Boca Santa (2012) observou que experimentalmente a adição de metacaulim demonstrou um alto poder reativo devido ao alto valor de aluminossilicatos amorfo, o que possibilita uma matriz mais polimerizada, densa e resistente.

2.3 Telhas de concreto: requisitos normativos

As instruções normativas para telhas de concreto no Brasil são estabelecidas pela NBR 13858-2 (ABNT, 2009), que define os requisitos físicos e mecânicos. Quanto os parâmetros mecânicos a norma estabelece carga mínima de ruptura de acordo com a classe de perfil variando de 2,4 a 2,0 kN para telhas não plans. Quanto a absorção de água o limite normativo estabelece que seja no máximo 10% em relação a massa seca da telha. Para telhas cerâmicas, a NBR 15310 (ABNT, 2009) estabelece requisitos para fins de comparação onde as telhas plans tanto de encaixe como de sobreposição devem possuir carga mínima de ruptura à flexão de 1 kN. A NBR 15575, ABNT (2013) complementa esses requisitos estabelecendo critérios de estanqueidade às águas pluviais a sistemas de cobertura. Esses limites estabelecidos por essas normas servem como referência, para alternativas proposta de novos materiais incluindo as telhas geopoliméricas.

2.4 Telhas e elementos pré-moldados geopoliméricos

A aplicação de geopolímeros em elementos pré-moldados de cobertura vem sendo estudada por alguns autores, Almutairi et al. (2021) em sua pesquisa aponta que a baixa permeabilidade dos geopolímeros principalmente a íons de cloreto, permite sua aplicação em ambientes mais agressivos, sendo adequado para sistemas de cobertura.

Marvila et al (2021) em sua pesquisa com telhas de geopolímero a base de metacaulim, constatou que elas apresentam características superiores a telhas cerâmicas e de concreto, como alta resistência à flexão atingindo valores 6,5 MPa, baixa retração linear sendo 80% menor que as de telhas cerâmicas, densidade controlada, resistência ao fogo superior ao concreto, baixa absorção a água e estabilidade em condições de saturação. Alguns estudos já exploram a relevância de alternativas sustentáveis para aplicação em telhas. como o concreto leve com EPS estudado por Muller (2016) e as telhas cimentícias com resíduos de PET avaliadas por Callejas (2022). Esses trabalhos reforçam a necessidade de alternativas de estudo de novos materiais para sistemas de cobertura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios físicos e mecânicos seguiram, em adaptação, os procedimentos descritos pela NBR 13858-2 (ABNT, 2009). Nesta etapa essa norma foi utilizada para os ensaios com fins para referência metodológica.

3.1 Materiais e dosagem

A escolha do material base para a produção das telhas foi uma argamassa de geopolímero. Para a fabricação das telhas geopoliméricas, foi utilizado metacaulim com uma massa específica de 2,56 kg/dm³. A solução ativadora foi preparada a partir da mistura de hidróxido de sódio (NaOH) em escamas com pureza ≥ 98% em água, na concentração de 16 mol/L e, posteriormente, essa mistura foi adicionada ao silicato de sódio neutro na proporção de 1:2. O agregado miúdo utilizado foi areia natural quartzosa. A Figura 1 apresenta os materiais empregados.

Figura 1. Hidróxido de sódio, silicato, solução alcalina e metacaulim, respectivamente.



Fonte: Autor (2026)

A dosagem da argamassa geopolimérica foi adaptada de Azevedo et al (2024), com proporção em massa apresentada na Tabela 1. As quantidades absolutas empregadas para a moldagem das telhas e dos corpos de prova são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1. Traço unitário da argamassa geopolimérica

Argamassa Geopoliméricas			
Metacaulim (kg)	Areia (kg)	Solução ativadora (kg)	Água (kg)
1	1,5	0,8	0,10

Fonte: adaptado de Azevedo *et al* (2024)

Tabela 2. Quantitativo de materiais empregado na moldagem

Quantidade de material usado para Argamassa Geopolimérica			
Metacaulim (kg)	Areia (kg)	Solução ativadora (kg)	Água (kg)
2,7	4,05	2,16	0,27

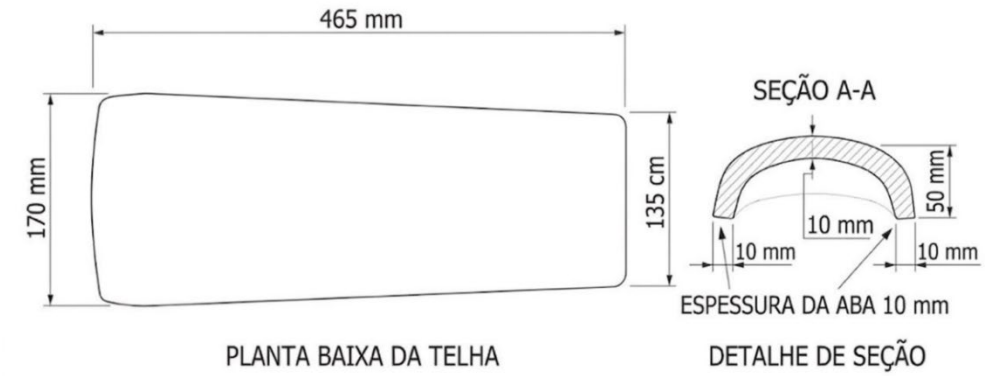
Fonte: Autor (2026)

3.2 Moldagem das telhas e dos corpos de prova

Para a preparação da argamassa, inicialmente foi misturado a areia e o metacaulim, seguido pela adição de solução ativadora. A mistura foi homogeneizada manualmente, sendo realizada adição gradual de água até que a pasta apresentasse a consistência e a trabalhabilidade adequadas para o processo de moldagem. O quantitativo apresentado na Tabela 2, corresponde ao necessário para moldagem de três telhas plans com dimensões de (170 × 465 × 50) mm como

ilustrado na Figura 2, para a moldagem foi utilizando um gabarito em madeira e uma forma macho de gesso ilustrados na Figura 3.

Figura 2 – Dimensões nominais das telhas geopoliméricas (mm)



Fonte: Autor (2026)

Figura 3 – Gabarito de madeira e forma de gesso utilizados na moldagem



Fonte: Autor (2026)

Para análise de parâmetros mecânicos da mistura foram moldados oito corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura: seis destinados ao ensaio de compressão axial, três corpos de prova com 15 dias e outros três com 28 dias de cura, dois foram reservados como amostras controle para o ensaio de absorção de água. A cura foi realizada em ambiente de laboratório.

3.3 Ensaio de compressão axial

O ensaio de compressão axial foi adaptado para o geopolímero de seguindo os parâmetros NBR 5739 (ABNT, 2018), com aplicação contínua de carga em prensa hidráulica até a ruptura. Antes da aplicação da carga as superfícies de contato dos corpos de prova foram capeadas com placas de neoprene, para garantir a distribuição uniforme das tensões e maior precisão nos resultados. A resistência à compressão axial foi determinada pela Equação 01, onde σ_c é a resistência à compressão axial, em MPa; $F_{máx}$ é a carga máxima registrada na ruptura, em N; e A é a área da seção transversal do corpo de prova, em mm².

$$\sigma_c = \frac{Fmáx}{A} \qquad \text{Eq. 01}$$

3.4 Ensaio de Resistência a flexão

O ensaio de resistência a flexão nas telhas de geopolímero, foi realizado com base na NBR 13858-2 (ABNT 2005), que normaliza ensaios em concreto e NBR 15310 (ABNT 2007) que normaliza telhas cerâmicas. O ensaio de resistência à flexão foi conduzido em dispositivo experimental composto por dois apoios de roletes de aço sobre painéis de madeira, com aplicação gradual de carga concentrada na região central da telha até a ruptura. O valor máximo de carga foi registrado e comparado aos limites mínimos estabelecidos pela NBR 13858-2 (ABNT, 2009) para telhas de concreto (2,0 kN) e pela ABNT NBR 15310:2009 para telhas plans cerâmicas (1,0 kN).

3.5 Ensaio de Absorção

A absorção de água foi determinada por adaptação dos procedimentos descritos pela NBR 9778 (ABNT, 2009), norma aplicável a concretos e argamassas endurecidos. Os corpos de prova foram secos em estufa a 110 ± 5 °C até massa constante (M_{seca}); em seguida, foram imersos em água por 24 h e pesados após remoção do excesso superficial ($M_{saturada}$). A absorção foi calculada pela Equação 2.

$$Abs = \frac{M_{saturada} - M_{seca}}{M_{seca}} \cdot 100 \qquad Eq. 02$$

3.6 Ensaio de estanqueidade

O ensaio de estanqueidade foi realizado conforme metodologia adaptada da NBR 13858-2 (ABNT, 2009) e da NBR 15575 (ABNT, 2013). Para o ensaio, a telha foi posicionada sobre suporte inclinado, simulando a configuração de instalação em telhado, e submetida a chuva simulada por 60 minutos. A face inferior foi monitorada visualmente durante todo o ensaio para detecção de gotejamento, infiltração ou formação de manchas de umidade. A telha é considerada impermeável quando não apresenta gotejamento ou passagem de água durante o teste. Essa etapa é importante para verificar possíveis falhas de vedação, porosidade ou defeitos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos no desenvolvimento e caracterização das telhas geopoliméricas evidenciam o elevado potencial técnico desse material como alternativa sustentável às telhas convencionais de concreto e cerâmica. A análise integrada dos ensaios mecânicos, físicos e funcionais demonstra que o geopolímero à base de metacaulim e ativadores alcalinos apresenta desempenho compatível com os requisitos normativos vigentes, além de vantagens adicionais associadas à durabilidade e à sustentabilidade ambiental.

De modo geral, o comportamento observado confirma que a matriz geopolimérica formada apresenta elevada coesão, baixa permeabilidade e excelente capacidade de suportar esforços mecânicos, características essenciais para elementos de cobertura sujeitos à ação contínua de cargas, variações térmicas e intempéries.

4.1 Resistência à compressão axial

Para o ensaio de compressão axial foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3. Pode se observar que aos 15 dias, os corpos de prova apresentaram resistência média de 35,0 MPa e

aos 28 dias, se obteve a média de 40,8 MPa. Constatando um ganho de resistência de aproximadamente 16,6% entre 15 e 28 dias. Esse comportamento é compatível com o desenvolvimento progressivo da reação de policondensação característico de matrizes geopoliméricas apresentadas por (Davidovits, 2015; Duxson *et al*., 2007). A Figura 4 mostra o ensaio de ruptura por compressão simples dos Corpos de prova realizado.

Tabela 3. Resistência à compressão axial dos corpos de prova

Amostra	**Idade de cura (dias)**	**Resistência à compressão fc (MPa)**	**Média (MPa)**
CP-1	15	36,7	35,0
CP-2		34,2	
CP-3		34,1	
CP-4	28	42,4	40,8
CP-5		40,4	
CP-6		39,6	

Fonte: Autor (2026)

Figura 4: Ensaio de ruptura por compressão simples dos corpos de prova



Fonte: Autor (2026)

Esses valores de resistência obtidos estão de acordo com algumas pesquisas já realizadas com geopolímero a base de metacaulim. Bezerra (2023) registrou em seus ensaios valores entre 36,5 e 39,6 MPa em compósitos com resíduos cerâmicos. Já Vasconcelos *et al*. (2011) obteve resistências entre 40 e 45 MPa para argamassas ativadas com hidróxido de sódio. Para aplicações específicas em telhas, Ferreira *et al*. (2022) alcançaram 44,05 MPa com cura térmica, valor próximo ao obtido neste trabalho em cura ambiente, o que reforça a viabilidade técnica do traço desenvolvido.

4.2 Resistência à flexão

O ensaio de flexão realizado em uma das telhas resultou em carga de ruptura de 3,45 kN, 3,35 e 3,22 kN. A média desses valores é aproximadamente 68% superior ao limite mínimo de 2,0 kN estabelecido pela NBR 13858-2 (ABNT, 2009) para telhas de concreto e 234% superior ao limite de 1,0 kN da ABNT NBR 15310 (ABNT, 2009) para telhas plans cerâmicas. A Figura 5 mostra o ensaio de rutura por flexão. Esse desempenho evidencia a elevada capacidade do material em resistir a esforços transversais, condição crítica para telhas submetidas a ações como vento, peso próprio, sobrecargas ocasionais e manutenção.

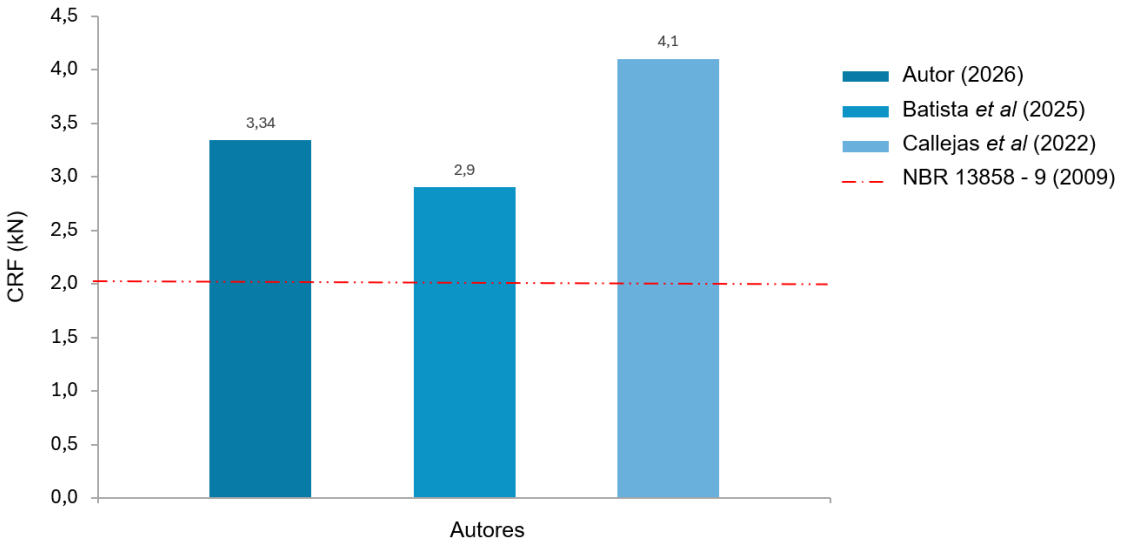
Figura 5: Ensaio de ruptura por flexão



Fonte: Autor (2026)

Os valores obtidos também se mostraram compatíveis com a literatura para componentes de cobertura: Batista *et al*. (2025) registrou para telhas de concreto a resistência de 2,9 kN, enquanto Callejas *et al*. (2022) em telhas cimentícias obteve valores de 4,1 kN, a figura 6 mostra a comparação dos resultados dos autores com o obtido nessa pesquisa.

Figura 6: Comparação dos resultados



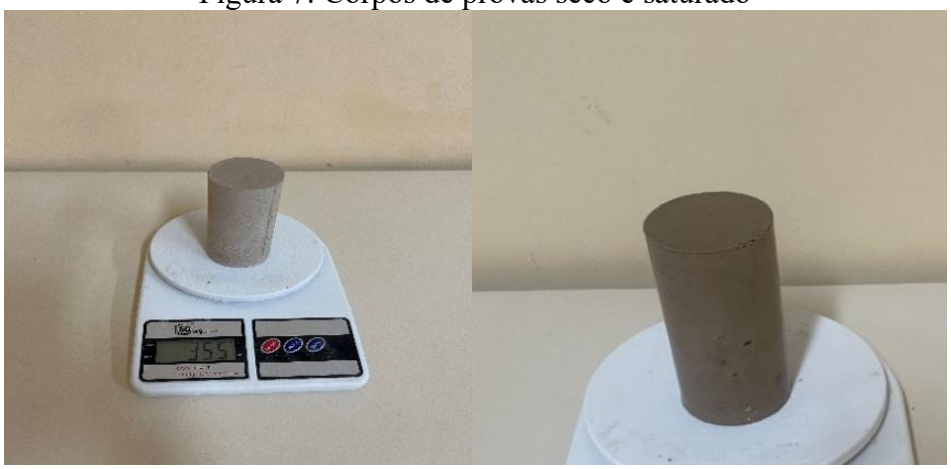
Fonte: Autor (2026)

Com esses dados pode se constatar que, esse estudo ao superar o mínimo normativo e coerência com estudos supracitados, mostra a viabilidade técnica do material geopolimérico como alternativa estruturalmente competitiva às telhas convencionais.

4.3 Absorção de água

No ensaio de absorção foram obtidos valores correspondentes a 13,52% de absorção, encontra-se plenamente dentro dos limites estabelecidos pela NBR 15210 (ABNT, 2005), que admite o máximo de absorção para telhas de 20%. A Figura 7 mostra a pesagem dos corpos de prova seco e saturado.

Figura 7: Corpos de provas seco e saturado



Fonte: Autor (2026)

Esse resultado também indica microestrutura densa e bem compactada, comportamento coerente com o que foi observado por Boca Santa (2012), que destaca que a menor absorção de geopolímeros à base de metacaulim em relação a concretos convencionais quando corretamente dosados e curados. Muller *et al*. (2016) aponta que absorções elevadas em telhas, levam maior risco de degradação em ciclos de umedecimento e secagem, confirmando que o uso de geopolímero é adequado para uso em ambientes externos.

4.4 Estanqueidade

O ensaio de estanqueidade demonstrou que as telhas geopoliméricas resistiram integralmente à ação da água durante o período de 60 minutos de chuva simulada, não apresentando infiltrações nem gotejamento. Esse resultado também atendeu aos requisitos das normas NBR 13858-2: (ABNT, 2010) e NBR 15575 (ABNT, 2013). A Figura 8 mostra uma telha após o ensaio, sendo possível observar a superfície inferior seca. Segundo Alves (2013), falhas de estanqueidade são recorrentes em telhas convencionais de concreto, principalmente quando associadas à elevada absorção de água ou à presença de defeitos de moldagem. No presente estudo, a ausência de infiltração evidencia a eficiência do processo de moldagem e a qualidade da matriz geopolimérica formada.

Figura 8: Ensaio de estanqueidade em coberturas com telhas



Fonte: Autor (2026)

4.5 Análise integrada da viabilidade técnica e ambiental

A análise conjunta dos resultados, apresentadas na Tabela 4, evidencia que as telhas geopoliméricas avaliadas apresentam desempenho mecânico compatível, no caso da resistência à flexão, superior aos requisitos das normas brasileiras para telhas de concreto e cerâmicas. A absorção de água também se estabeleceu dentro do limite. A estanqueidade integral observada sugere que que a telha não mostra infiltração seguindo também parâmetros normativos.

Tabela 4 – Síntese comparativa: resultado experimental × limite normativo

Propriedade avaliada	Resultado obtido	Limite normativo
Compressão axial (28 d)	40,8 MPa (média)	Não há limite específico para telhas
Carga de ruptura à flexão	3,35 kN (média)	≥ 2,0 kN - NBR 13858-2 (ABNT, 2009)
Absorção de água	13,5%	≤ 20% - NBR 13858-2 (ABNT, 2009)
Estanqueidade (60 min)	Sem infiltração	Sem infiltração - NBR 15575(ABNT, 2013)

Fonte: Autor (2026)

5 CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou a viabilidade técnica de telhas geopoliméricas produzidas a partir de metacaulim ativado por NaOH 16 mol/L, consolidando esse material como alternativa promissora às telhas convencionais de concreto e cerâmica. Os resultados experimentais evidenciam que a matriz geopolimérica desenvolvida reúne, simultaneamente, resistência mecânica elevada, estanqueidade integral e comportamento higroscópico aceitável, atendendo aos principais requisitos funcionais exigidos para elementos de cobertura.

O desempenho mecânico obtido de 40,8 MPa à compressão axial aos 28 dias e 3,45 kN à flexão posiciona o material em patamar competitivo frente à literatura especializada (Vasconcelos *et al*., 2011; Batista *et al*., 2025) e supera os limites normativos mínimos da NBR 13858-2 (ABNT, 2009), inclusive os da classe A. A absorção de água de 13,52% e estanqueidade também evidenciou que esse material está dentro dos limites normativos aptos para utilização em coberturas.

Do ponto de vista ambiental, a substituição do cimento Portland por ligantes geopoliméricos alinha o material às diretrizes contemporâneas de construção sustentável, com potencial de redução significativa das emissões de CO_2, a ser quantificado por Análise de Ciclo de Vida em estudos subsequentes. Dentro das limitações inerentes à escala laboratorial adotada, os resultados obtidos constituem base experimental sólida para o avanço da pesquisa em telhas geopoliméricas, reforçando seu potencial de aplicação na construção civil sustentável e indicando caminhos claros para sua consolidação técnica e futura normatização.

REFERÊNCIAS

ALMUTAIRI, A. L. et al. Potential applications of geopolymer concrete in construction: a review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, e00620, 2021.

ALVES, D. S. **Avaliação dos pontos críticos para a melhoria da qualidade na produção de telhas de concreto**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13858-2**: telhas de concreto – parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15310**: telhas cerâmicas – terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: edificações habitacionais – desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

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

AZEVEDO, E.; OLIVEIRA, D. Shear strength of reinforced concrete beams with recycled coarse aggregate. **ACI Structural Journal**, v. 121, n. 1, 2024.

BATISTA, L. L. Revista do técnico cerâmico brasileiro. **Cerâmica Industrial**, 2025.

BEZERRA, B. P.; MORELLI, M. R.; LUZ, A. P. Produção e caracterização de geopolímeros baseados em metacaulim e resíduo de telha cerâmica. **Cerâmica**, v. 69, p. 242-247, 2023.

BOCA SANTA, R. A. A. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

CALLEJAS, I. J. A. et al. Desempenho térmico de telhas cimentícias com incorporação de resíduo PET. In: **ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 17., 2022, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ENCAC/ELACAC, 2022.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer chemistry and applications**. 4. ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2015.

DUXSON, P. et al. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917-2933, 2007.

FERREIRA, W. M. et al. Perspective of the application of ash from the ceramic industry in the development of alkali-activated roof tiles. **Ceramics International**, v. 48, p. 6250-6257, 2022.

LERMEN, R. T.; REMONTTI, T. L.; SILVA, R. A. Influência da relação molar H2O/Na2O na formação de eflorescência em geopolímeros à base de metacaulim. **Revista Matéria**, v. 27, n. 4, 2022.

MARVILA, M. T. et al. Performance of geopolymer tiles in high temperature and saturation conditions. **Construction and Building Materials**, v. 286, p. 122994, 2021.

McLELLAN, B. C. et al. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement**. Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 9-10, p. 1080-1090, 2011.

MULLER, H. M. B. et al. Telhas de concreto leve com substituição parcial e gradual do agregado miúdo por EPS. In: **ENCONTRO DE ENGENHARIA DE EDIFICAÇÕES E AMBIENTAL**, 4., 2016, Cuiabá. Anais [...]. Cuiabá: UFMT, 2016.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and related alkali-activated materials. **Annual Review of Materials Research**, v. 44, p. 299-327, 2014.

QADER, D. N. et al. Metakaolin-based geopolymer concrete: a comprehensive review on properties, parameters and applications. **Results in Engineering**, v. 21, 101736, 2024.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: potential, economically viable solutions for a low-CO2, cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2-26, 2018.

SINGH, N. B. Fly ash-based geopolymer binder: a future construction material. **Minerals**, v. 8, n. 7, art. 299, 2018.

VASCONCELOS, P. et al. Concrete beams reinforced with geopolymeric mortars and CFRP. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 2004-2012, 2011.