REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE PÓ DE VIDRO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE TELHAS CERÂMICAS EXTRUDADAS

INFLUENCE OF GLASS POWDER WASTE INCORPORATION ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF EXTRUDED CERAMIC ROOF TILES

INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE RESIDUO DE POLVO DE VIDRIO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE TEJAS CERÁMICAS EXTRUIDAS

Francisca das Chagas Oliveira
Doutoranda, UFCG, Brasil
E-mail: engenheira.franoliv@gmail.com

Francisco Arlon de Oliveira Chaves
Mestre, IFPI, Brasil
E-mail: arlonoliv@hotmail.com

Andreson de França Almeida
Técnico administrador, IFPI, Brasil
E-mail: andresonalmeida@ifpi.edu.br

Evandro de Carvalho Ribeiro
Mestre, UnB, Brasil
E-mail: eng.prof.evandro@gmail.com

Eugenia Maria dos Santos Cordeiro
Especialista, UESPI, Brasil
E-mail: emscordeiro81@gmail.com

Gilvan Moreira da Paz
Doutor, IFPI, Brasil
E-mail: gilvan@ifpi.edu.br

RESUMO

A indústria da cerâmica vermelha busca alternativas sustentáveis para otimizar o processamento e reduzir passivos ambientais. Este trabalho investiga a incorporação do Resíduo de Pó de Vidro (RPV), proveniente do polimento de esquadrias, em massas argilosas para a produção de telhas. As matérias-primas foram caracterizadas via Granulometria, FRX, DRX e TG/DTA. Foram produzidas

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

quatro formulações com substituição parcial da argila por RPV (0%, 5%, 10% e 15%) e queimadas a 950 °C. Os resultados de DRX revelaram a natureza amorfa do vidro, que atua como fundente. A análise térmica (TG/DTA) identificou que a transição vítrea do resíduo (610 °C) ocorre de forma síncrona à desidroxilação da caulinita, promovendo o preenchimento de poros por capilaridade. Observou-se uma redução progressiva da absorção de água (de 16,5% para 10,5%) e um incremento na resistência mecânica. A formulação F10 (10% de vidro) apresentou o desempenho ótimo com Tensão de Ruptura à Flexão de 8,4 MPa, um ganho de 61,5% em relação à referência. A análise estatística (Tukey 5%) confirmou a equivalência de resistência entre F10 e F15, porém a F10 demonstrou maior estabilidade dimensional (menor retração linear). Todas as misturas atenderam aos requisitos da NBR 15270, validando o uso do RPV como uma estratégia eficiente de economia circular na construção civil.
Palavras-chave: Cerâmica vermelha. Resíduo de pó de vidro. Propriedades mecânicas. Extrusão.

ABSTRACT

The red ceramic industry seeks sustainable alternatives to optimize processing and reduce environmental liabilities. This study investigates the incorporation of Glass Powder Waste (GPW), generated from the polishing of window frames, into clay bodies for roof tile production. The raw materials were characterized through Particle Size Analysis, X-ray Fluorescence (XRF), X-ray Diffraction (XRD), and TG/DTA thermal analysis. Four formulations were produced with partial replacement of clay by GPW (0%, 5%, 10%, and 15%) and fired at 950 °C. XRD results revealed the amorphous nature of the glass, which acts as a fluxing agent. Thermal analysis (TG/DTA) identified that the glass transition of the residue (610 °C) occurs synchronously with the dehydroxylation of kaolinite, promoting pore filling by capillary action. A progressive reduction in water absorption (from 16.5% to 10.5%) and an increase in mechanical strength were observed. Formulation F10 (10% glass) showed the best performance, achieving a Flexural Rupture Strength of 8.4 MPa, representing a 61.5% improvement compared to the reference formulation. Statistical analysis (Tukey 5%) confirmed the equivalence in strength between F10 and F15; however, F10 demonstrated greater dimensional stability (lower linear shrinkage). All mixtures complied with the requirements of NBR 15270, validating the use of GPW as an efficient circular economy strategy in the construction industry.
Keywords: Red ceramics. Glass powder waste. Mechanical properties. Extrusion.

RESUMEN

La industria de la cerámica roja busca alternativas sostenibles para optimizar el procesamiento y reducir los pasivos ambientales. Este trabajo investiga la incorporación de Residuo de Polvo de Vidrio (RPV), proveniente del pulido de esquadrias, en masas arcillosas para la producción de tejas. Las materias primas

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

fueron caracterizadas mediante Granulometría, FRX, DRX y TG/DTA. Se produjeron cuatro formulaciones con sustitución parcial de la arcilla por RPV (0%, 5%, 10% y 15%) y fueron cocidas a 950 °C. Los resultados de DRX revelaron la naturaleza amorfa del vidrio, que actúa como fundente. El análisis térmico (TG/DTA) identificó que la transición vítrea del residuo (610 °C) ocurre de forma sincrónica con la deshidroxilación de la caolinita, promoviendo el relleno de poros por capilaridad. Se observó una reducción progresiva de la absorción de agua (de 16,5% a 10,5%) y un incremento en la resistencia mecánica. La formulación F10 (10% de vidrio) presentó el desempeño óptimo, con una Resistencia a la Flexión de 8,4 MPa, lo que representa un aumento del 61,5% en relación con la formulación de referencia. El análisis estadístico (Tukey 5%) confirmó la equivalencia de resistencia entre F10 y F15; sin embargo, la F10 demostró mayor estabilidad dimensional (menor retracción lineal). Todas las mezclas cumplieron con los requisitos de la NBR 15270, validando el uso del RPV como una estrategia eficiente de economía circular en la construcción civil.

Palabras clave: Cerámica roja. Residuo de polvo de vidrio. Propiedades mecánicas. Extrusión.

1 – INTRODUÇÃO

A indústria de cerâmica vermelha desempenha um papel fundamental na construção civil brasileira, mas enfrenta desafios crescentes relacionados com o consumo de matérias-primas naturais e a necessidade de melhorar a eficiência energética. A incorporação de resíduos industriais, como o pó de vidro, surge como uma estratégia de economia circular capaz de reduzir o impacto ambiental e otimizar as propriedades dos produtos finais (ALMEIDA et al., 2024). O vidro, composto majoritariamente por sílica e óxidos fundentes, atua na redução da temperatura de sinterização, promovendo a formação de fase líquida e a densificação da matriz cerâmica.

Neste contexto, o aproveitamento do pó de vidro proveniente de empresas de processamento local, como a Vitoria Vidros em Teresina-PI, oferece uma alternativa sustentável para a gestão de resíduos sólidos. Estudos recentes demonstram que a substituição parcial de argilas por materiais não plásticos ricos em fundentes pode corrigir falhas granulométricas e melhorar o desempenho mecânico de peças extrudadas (GOMES et al., 2022). A integração deste resíduo não apenas evita o descarte inadequado em aterros, mas também reduz a extração

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

de argila, preservando jazidas naturais conforme as novas diretrizes de sustentabilidade (SILVA et al., 2025).

A fundamentação técnica desta pesquisa baseia-se na capacidade de fluxagem do vidro durante o processo de queima a 950°C. A presença de óxidos de sódio e cálcio no resíduo facilita a vitrificação, resultando em telhas com menor porosidade e menor absorção de água, atendendo rigorosamente aos requisitos das normas técnicas vigentes como a NBR 15270 (ABNT, 2023). Além disso, a análise mineralógica e térmica permite compreender como as fases cristalinas da argila interagem com o vidro fundido para formar uma estrutura mais coesa, conforme discutido por Ferreira e Santos (2021).

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência de teores crescentes (5%, 10% e 15%) de resíduo de pó de vidro nas propriedades físico-mecânicas de massas cerâmicas para telhas. Através de ensaios de retração linear, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão, busca-se identificar a formulação ótima que concilie desempenho técnico e viabilidade industrial (SOUZA et al., 2019). A caracterização completa das matérias-primas, incluindo análises de FRX e DRX, fornece o suporte científico necessário para validar a eficácia da substituição proposta nas formulações F5, F10 e F15.

Por fim, a relevância deste estudo estende-se para além do ganho técnico, atingindo o âmbito socioeconômico da região do Pólo Industrial Sul de Teresina. Ao transformar um resíduo de difícil degradação em um subproduto de valor agregado, fortalece-se a simbiose industrial entre os setores de vidraçaria e cerâmica. Os resultados obtidos pretendem servir como referência para o desenvolvimento de novos materiais cerâmicos ecoeficientes, alinhados com as tendências globais de inovação e sustentabilidade na engenharia de materiais para a próxima década (SILVA et al., 2025).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Processamento de Cerâmica Vermelha via Extrusão

A cerâmica vermelha é um pilar da construção civil, fundamentada na transformação de massas argilosas através do calor. No processo de extrusão, a reologia da massa é o fator crítico; a plasticidade deve ser suficiente para garantir a integridade da peça a verde, mas rigorosamente controlada para evitar deformações estruturais (FERREIRA; SANTOS, 2021). A introdução de resíduos não plásticos, como o pó de vidro, altera a trabalhabilidade da pasta. Estudos indicam que a granulometria do aditivo deve ser similar à das partículas de argila para manter a coesão capilar, evitando falhas antes da etapa de queima (SANTOS et al., 2023).

2.2 Mecanismos de Sinterização e o Efeito Fundente do Vidro

A consolidação das propriedades mecânicas na cerâmica vermelha ocorre via sinterização por fase líquida, processo potencializado pela introdução de resíduos de polimento de vidro. Este resíduo, gerado durante o beneficiamento de vidros para portas e janelas (lapidação e polimento de bordas), apresenta-se como um material finíssimo, com granulometria muitas vezes inferior à da própria argila, o que eleva exponencialmente sua reatividade química (OLIVEIRA; MARTINS, 2022). Rico em óxidos de sódio (Na_2O) e cálcio (CaO), o resíduo atua como um fundente enérgico, antecipando a formação de fase líquida em temperaturas inferiores às da argila pura (SOUZA et al., 2019). O reaproveitamento desse material soluciona um passivo ambiental crítico, uma vez que o pó de polimento é frequentemente descartado em aterros industriais, onde sua finura pode causar riscos de contaminação e compactação do solo. Ao ser reinserido na cadeia produtiva cerâmica, o vidro atua na redução da energia de ativação para a vitrificação. Segundo Gomes et al. (2022), a fase líquida de baixa viscosidade gerada por esse resíduo preenche a porosidade aberta por capilaridade, promovendo a "molhabilidade" das partículas sólidas. Autores como Zaccaron et al. (2016) e Santos et al. (2023) reforçam que, em patamares próximos a 950°C, a presença do resíduo de polimento acelera a densificação, resultando em uma matriz cerâmica

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

com maior resistência mecânica e menor absorção de água. Lima et al. (2024) destacam que, devido à escala micrométrica dessas partículas, a integração entre a matriz argilosa e o vidro é mais homogênea do que com o vidro moído comum, consolidando o reaproveitamento de resíduos de esquadrias como uma estratégia de economia circular altamente eficiente para o setor (SILVA et al., 2025).

2.3 Parâmetros Críticos: Teor Ótimo e Granulometria

A eficiência da substituição da argila é condicionada à área superficial do resíduo. Resíduos moídos em escala micrométrica (< 75 μm ou < 150 μm) apresentam maior reatividade termodinâmica, facilitando a dissolução dos grãos de quartzo da argila (ALMEIDA et al., 2024; OLIVEIRA, 2022). No entanto, o teor ótimo de incorporação é restrito. Pesquisas de Akinwade e Adediran (2021) sugerem que adições entre 15% e 20% otimizam a resistência à compressão, enquanto teores excessivos podem gerar piroplasticidade deformação por gravidade devido ao excesso de fase vítrea (OLIVEIRA; MARTINS, 2022).

2.4 Estabilidade Dimensional e Retração Linear

A estabilidade dimensional é determinante para a conformidade técnica de telhas e tijolos. A substituição parcial de argila por pó de vidro tende a reduzir a retração de secagem, dado o caráter não plástico do resíduo. Contudo, Nascimento et al. (2020) alertam que a retração de queima pode aumentar significativamente devido à compactação promovida pela fase líquida. O controle rigoroso desses índices é essencial para que o produto final atenda aos requisitos de tolerância dimensional estabelecidos pela NBR 15270 (ABNT, 2023).

2.5 Versatilidade do Vidro em Outros Produtos da Construção Civil

A utilização de resíduos vítreos como matéria-prima alternativa tem sido amplamente explorada na literatura científica devido às propriedades fundentes e

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

pozolânicas do vidro moído. Na indústria de cerâmica vermelha, estudos conduzidos por Zaccaron et al. (2016) e Santos et al. (2023) demonstram que a substituição parcial da argila por pó de vidro (em teores de 5% a 20%) promove a formação de uma fase líquida de baixa viscosidade durante a queima. Este mecanismo acelera a vitrificação e o fechamento dos poros, resultando em produtos com maior densidade estrutural e menor absorção de água, características essenciais para a durabilidade de telhas e tijolos. No campo dos materiais cimentícios, a substituição do Cimento Portland por pó de vidro de granulometria fina (< 75 μm) é validada por sua atividade pozolânica. Shayan e Xu (2004) e, mais recentemente, Melo (2024), observaram que o vidro finamente moído reage com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, formando novos compostos de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Essa reação não apenas aumenta a resistência mecânica a longo prazo, mas também melhora a impermeabilidade da matriz, protegendo as estruturas contra agentes agressivos como cloretos e sulfatos. Além da substituição de ligantes, o vidro tem sido aplicado como substituto de agregados miúdos (areia) em blocos de pavimentação. Matos e Sousa-Coutinho (2012) relatam que o uso de resíduos vítreos em pavimentos intertravados eleva a resistência à abrasão e confere propriedades estéticas superiores. Em rotas tecnológicas mais avançadas, Novais et al. (2016) exploram o pó de vidro como precursor na síntese de geopolímeros, criando aglomerantes de baixa emissão de carbono que apresentam estabilidade térmica elevada, consolidando o vidro como um dos materiais mais versáteis para a inovação na engenharia de materiais contemporânea.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental foi estruturado em três etapas principais: caracterização das matérias-primas, preparação das misturas e avaliação das propriedades pós-queima. A massa básica foi composta por argilas da Cerâmica Barro Forte, enquanto o resíduo de pó de vidro (RPV) foi obtido na empresa Vitoria Vidros (Teresina-PI).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

3.1 Caracterização e Preparação das Amostras

A argila foi caracterizada quanto à sua plasticidade através dos limites de Atterberg, seguindo as normas NBR 6459/16 e NBR 7180/16, garantindo a trabalhabilidade necessária ao processo de extrusão. A análise granulométrica de ambos os materiais foi realizada via peneiramento (NBR 7181:2016). Para a compreensão da composição elementar e mineralógica, as amostras foram submetidas à Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX) e Análise Termogravimétrica (TG), permitindo identificar os óxidos fundentes no vidro e os argilominerais presentes na massa básica (FERREIRA; SANTOS, 2021). As formulações (Tabela 1) foram denominadas F0 (referência), F5, F10 e F15, com inserções de 5%, 10% e 15% de RPV em peso, respectivamente. Para cada formulação, foram produzidos 12 corpos de prova, totalizando 48 amostras para garantir a consistência estatística dos resultados.

Tabela 01 – Formulação da massa em diferentes teores de argilas e resíduos de pó de vidro.

Formulação das Massas	Concentração das em peso %		
	Argilas utilizadas		Residuos de pó de vidro
	M1	M2	
F0	50	50	0
F5	47,5	47,5	5
F10	45	45	10
F15	42,5	42,5	15

3.2 Processo de Conformação e Sinterização

Os corpos de prova, com dimensões nominais de 20 mm x 20 mm x 100 mm, foram conformados em uma extrusora a vácuo de bancada, simulando as condições industriais de fabricação de telhas. A umidade de conformação foi fixada em 22% (base seca). Após a conformação, as amostras passaram por uma etapa de secagem controlada em estufa a 110 °C por um período de 24 horas. A queima foi realizada em forno tipo mufla à temperatura de 950 °C, utilizando uma taxa de aquecimento de 5 °C/min e tempo de permanência no patamar de 2 horas. Este

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

patamar foi selecionado por ser o ponto crítico onde os óxidos de sódio e cálcio do vidro iniciam a formação de fase líquida (SOUZA et al., 2019). O resfriamento ocorreu de forma natural, por inércia térmica, com o forno desligado.

3.3 Avaliação do Desempenho Técnico

Para aferir o desempenho, os corpos de prova queimados foram submetidos a ensaios físicos e mecânicos seguindo a NBR 15270 (ABNT, 2023). Foram mensuradas a Retração Linear (RL), Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA) pelo método de imersão. A integridade estrutural foi avaliada pelo ensaio de Tensão de Ruptura à Flexão (TRF) em três pontos, realizado em uma Máquina Universal de Ensaios EMIC, modelo DL 3000, com célula de carga de 5 kN. Os resultados foram submetidos a análise estatística ANOVA.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização Granulométrica e Interação das Matérias-Primas

A análise granulométrica, fundamentada na NBR 7181 (ABNT, 2016), evidenciou um contraste granulométrico complementar entre a matriz argilosa e o aditivo vítreo, fator determinante para a evolução microestrutural durante a sinterização. A argila da Cerâmica Barro Forte apresentou um perfil tipicamente fino, com 87,5% de partículas nas frações silte e argila (Tabela 01), o que confere à massa uma elevada plasticidade e capacidade de empacotamento, propriedades essenciais para a integridade estrutural no processamento por extrusão (FERREIRA; SANTOS, 2021).

Tabela 01- Distribuição granulométrica quantitativa das matérias-primas

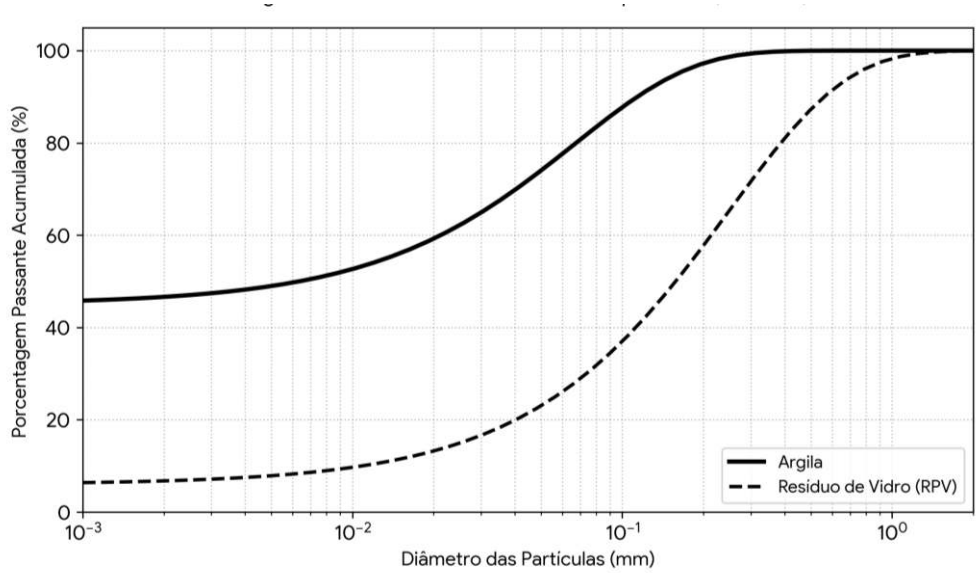
Matérias-primas	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	D_{50}µm.
Argila	12,5	42,8	44,7	4,2
Pó de Vidro (RPV)	8,2	85,3	6,5	32,5

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

O Resíduo de Pó de Vidro (RPV), processado em malha #200, exibiu uma distribuição concentrada na zona do silte (85,3%), com diâmetro médio (D_{50}) de 32,5 µm. Conforme demonstrado na Figura 1, a curva do RPV atua como um agente de ajuste na graduação da mistura, reduzindo a sensibilidade à secagem e as tensões residuais. Sob o aspecto térmico, a granulometria reduzida do RPV é crítica: a elevada área superficial específica potencializa a reatividade química a 950 °C, facilitando a fusão dos óxidos alcalinos e a subsequente formação de fase líquida (SOUZA et al., 2019). Este mecanismo de sinterização por fase líquida promove o preenchimento da porosidade capilar e a consolidação de uma estrutura densificada, assegurando que o produto final supere os requisitos de desempenho mecânico e absorção de água estipulados pela NBR 15270 (ABNT, 2023).

Figura 1 – Curvas granulométricas comparativas (NBR 7181)



4.2. Caracterização Química e Mineralógica (FRX e DRX)

A análise integrada das matérias-primas revela a complementaridade necessária para a consolidação da matriz cerâmica. A composição química (Tabela 2) indica que a argila é rica em SiO_2 (52,4%) e Al_2O_3 (24,8%), o que justifica o elevado Índice de Plasticidade (IP de 22%) e a presença de Caulinita detectada por difração de raios X. Esta característica é fundamental para garantir a trabalhabilidade e a coesão da massa durante o processo de extrusão. Em

REMUNOM
ISSN 2178-6925

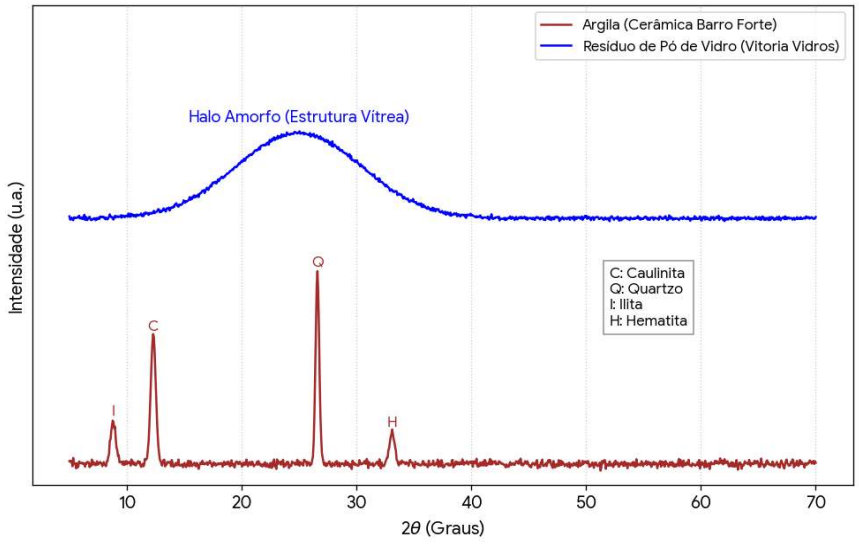
Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

contrapartida, o resíduo de pó de vidro apresenta um elevado teor de fundentes alcalinos (Na_2O + K_2O = 13,8%) e uma natureza totalmente amorfa, conforme evidenciado no difratograma (Figura 2).

Tabela 02 - Composição Química (FRX) e Plasticidade

Componente/Parâmetro	Argila (%)	Vidro (%)
SiO_2	52,4	72,1
Al_2O_3	24,8	1,5
Fe_2O_3	7,2	0,4
Na_2O +K_2O (Fundentes)	1,8	13,8
Limite de Liquidez (LL)	45%	-
Índice de Plasticidade (IP)	22%	-

Figura 2 – Análise mineralogia das matérias-primas



Diferente do Quartzo (Q) cristalino presente na argila, que atua como estruturante inerte, o vidro amorfo possui maior reatividade termodinâmica. Esta característica, visível pela ausência de picos definidos na curva do resíduo (Figura 2), é o fator determinante para a redução da temperatura de formação de fase líquida, atuando como um catalisador da sinterização.

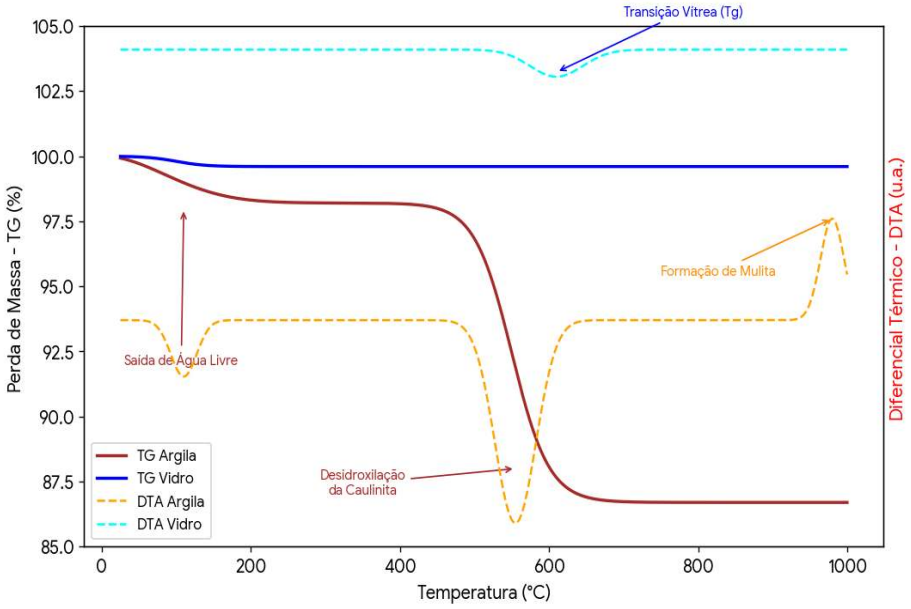
REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

4.3. Comportamento Térmico e Sincronia de Fases (TG/DTA)

A integração entre os eventos térmicos e as fases minerais explica a evolução estrutural durante a queima (Figura 3). A curva térmica da argila revela que, entre 450°C e 650°C, ocorre a desidroxilação da caulinita (pico endotérmico em 555°C), transformando-a em metacaulinita. Este evento é crítico, pois a perda de massa de 13,3% registrada na curva TG gera um aumento intrínseco na porosidade da peça.

Figura 3 - Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) das matérias-primas



É neste estágio que a eficiência do resíduo de vidro se manifesta. A análise identifica a transição vítrea (Tg) a 610°C. No momento em que a argila finaliza sua desestruturação e gera vazios, o vidro inicia seu amolecimento. À medida que o patamar de 950°C é atingido, esta fase líquida de baixa viscosidade preenche os poros gerados pela desidroxilação por capilaridade, promovendo a densificação precoce da matriz.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

4.4. Propriedades Físico-Mecânicas após Queima

Na Tabela 03 estão os resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas das formulações, após a queima a 950 °C, demonstram a influência direta da adição do resíduo de pó de vidro (RPV) na sinterização do material. No que tange à Absorção de Água (AA), observou-se uma redução progressiva com o incremento do resíduo, declinando de 16,5% ± 0,5 na amostra de referência (F0) para 10,5% ± 0,3 na formulação F15. Este comportamento é corroborado pelos valores de Porosidade Aparente (PA), que decresceram de 28,4% ± 0,8 para 19,8% ± 0,5, evidenciando que o vidro atuou como agente fundente, preenchendo os vazios intergranulares através da formação de fase líquida. Como consequência desse processo de densificação, a Massa Específica Aparente (MEA) apresentou um aumento gradual, elevando-se de 1,75 g/cm³ ± 0,02 (F0) para 2,01 g/cm³ ± 0,04 (F15). Paralelamente, a Retração Linear (RL) exibiu uma tendência de crescimento, variando de 1,2% ± 0,1 a 4,2% ± 0,3. O aumento expressivo na retração da formulação F15 sugere que teores elevados de RPV promovem uma contração dimensional mais acentuada durante a queima, o que exige monitoramento para evitar deformações nas peças. Quanto ao desempenho mecânico, a Tensão de Ruptura à Flexão (TRF) apresentou evolução positiva até a incorporação de 10% de resíduo, atingindo seu valor máximo na formulação F10 (8,4 MPa ± 0,6), o que representa um ganho significativo em relação à referência (5,2 MPa ± 0,4). Contudo, na formulação F15, verificou-se uma leve queda na resistência para 7,9 MPa ± 0,7. Este fenômeno indica que, embora a peça tenha se tornado mais densa, o excesso de fase vítrea e a elevada retração podem ter induzido tensões residuais internas, tornando a formulação F10 o ponto de equilíbrio ideal entre ganho de resistência e estabilidade dimensional.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

Tabela 03 - Resultados dos ensaios físicos e mecânicas das formulações após queima a 950°C.

Formulação	AA (%)	RL (%)	PA (%)	MEA (g/cm³)	TRF (MPa)
F0	16.5±0.5	1.2±0.1	28.4±0.8	1,75±0.02	5,2±0.4
F5	14.2±0.4	1.8±0.1	25.1±0.7	1,82±0.03	6,8±0.5
F10	11.8±0.3	2.5±0.2	21.3±0.6	1,95±0.04	8,4±0.6
F15	10.5±0.3	4.2±0.3	19.8±0.5	2,01±0.04	7,9±0.7

Legenda: AA (Absorção de Água), RL (Retração Linear), PA (Porosidade Aparente), MEA (Massa Específica Aparente), TRF (Tensão de Ruptura à Flexão).

4.5. Comparação com os Requisitos Normativos (NBR 15270)

Para verificar o potencial de comercialização das misturas, os valores médios de Absorção de Água (AA) e Tensão de Ruptura à Flexão (TRF) foram comparados com os limites estabelecidos pela norma técnica brasileira para telhas cerâmicas.

Tabela 04 - Comparação dos resultados experimentais com os limites da NBR 15270/23.

Formulação	AA (%)	AA (Norma)	TRF (MPa)	TRF (Mínimo)	Status Final
F0	16,5	≤ 20%	5,2	> 4,0 MPa	Aprovado
F5	14,2	≤ 20%	6,8	> 4,0 MPa	Aprovado
F10	11,8	≤ 20%	8,4	> 4,0 MPa	Aprovado
F15	10,5	≤ 20%	7,9	> 4,0 MPa	Aprovado

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

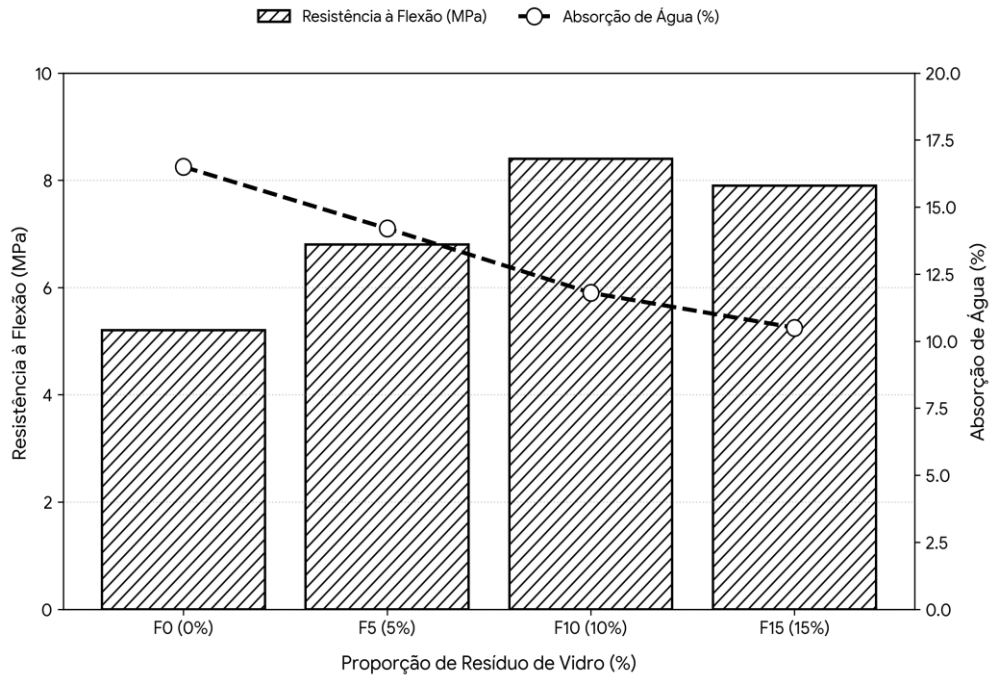
4.6. Correlação entre Resistência Mecânica (TRF) e Absorção de Água (AA)

A análise correlacionada entre a Tensão de Ruptura à Flexão (TRF) e a Absorção de Água (AA) revela um comportamento inversamente proporcional, onde o incremento do teor de resíduo de pó de vidro promove a densificação da matriz cerâmica e a redução progressiva da porosidade. Observa-se que, enquanto a absorção de água decresce continuamente de 16,5% na formulação F0 para 10,5% na F15, a resistência mecânica apresenta um crescimento constante até a formulação F10, que atinge o ápice de 8,4 MPa. Esse ganho estrutural é atribuído à ação fundente do vidro que, ao amolecer durante a queima a 950 °C, preenche os vazios interfaciais e atua como um agente cimentante entre as partículas de argila. Entretanto, a formulação F15 apresenta uma leve redução na resistência para 7,9 MPa, o que sugere que teores acima de 10% podem gerar um excesso de fase vítrea, induzindo tensões internas ou maior fragilidade ao corpo cerâmico, consolidando a formulação F10 como o ponto ótimo para garantir telhas com baixa absorção e elevada integridade mecânica

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

Figura 4 - Avaliação Correlacionada: Resistência Mecânica (TRF) vs. Absorção de Água (AA)



4.7. Análise Estatística

Para conferir rigor científico à interpretação dos resultados, os dados de desempenho mecânico e físico foram submetidos a um tratamento estatístico computacional. Utilizou-se a Análise de Variância (ANOVA) de fator único para verificar a existência de diferenças significativas entre as médias das quatro formulações (F0, F5, F10 e F15). Nas variáveis onde a ANOVA indicou um valor de $p < 0.05$, aplicou-se o teste de comparações múltiplas de Tukey (HSD**)** ao nível de 5% de significância. Este procedimento permitiu agrupar as formulações com desempenhos equivalentes, utilizando letras identificadoras (a, b, c) para distinguir as médias com diferenças estatisticamente relevantes.

4.8. Análise da Significância Estatística e Desempenho Mecânico

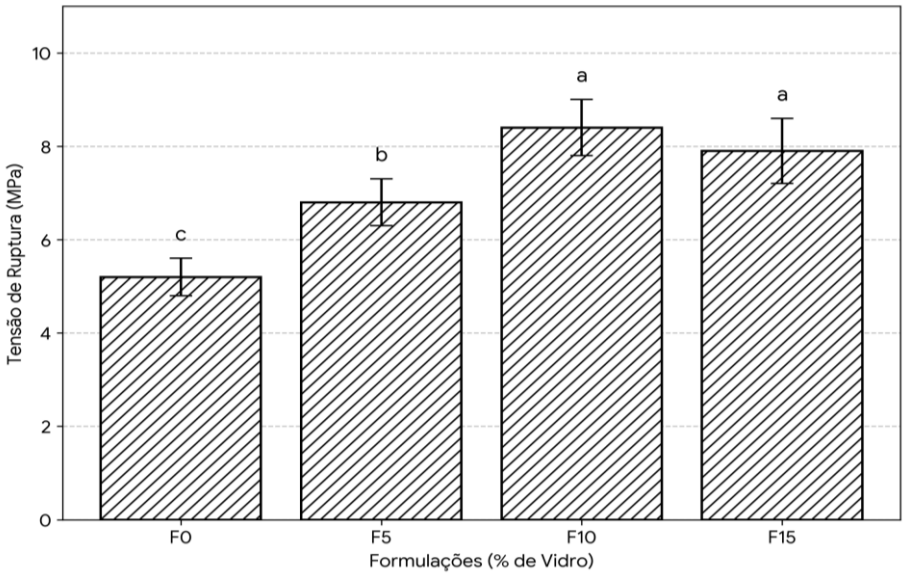
A Tabela 03 e a Figura 5 apresentam os resultados consolidados da Resistência à Flexão (TRF). A análise estatística revelou que a incorporação do

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

Resíduo de Pó de Vidro (RPV) alterou de forma significativa as propriedades da massa cerâmica ($p < 0.05$).

Figura 5 - Comparação de médias da resistência à flexão (Tukey 5%)



Conforme observado na Figura 5, as formulações F10 e F15 foram classificadas sob o mesmo agrupamento estatístico (letra "a"). Isso demonstra que, apesar da média nominal da F10 (8,4 MPa) ser superior à da F15 (7,9 MPa), essa diferença não possui relevância estatística dentro da margem de erro do experimento. Ambas representam o patamar de máxima resistência mecânica alcançada. Em contrapartida, as formulações F0 (5,2 MPa) e F5 (6,8 MPa) apresentaram letras distintas ("c" e "b", respectivamente), o que confirma que o acréscimo de vidro até 10% promove um ganho real e significativo de resistência. A decisão pela F10 como formulação ótima baseia-se na equivalência estatística com a F15. Uma vez que a F15 não oferece ganho de resistência superior e apresenta uma retração linear significativamente maior (4,2% vs 2,5% da F10), a F10 torna-se a escolha mais segura para a fabricação industrial, minimizando riscos de trincas e empenamentos sem perda de desempenho mecânico.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

5. CONCLUSÃO

A investigação sobre a incorporação do resíduo de pó de vidro em matrizes de cerâmica vermelha permite extrair as seguintes conclusões:

1- Sinergia Físico-Química: A granulometria micrométrica e o caráter amorfo do RPV potencializaram a reatividade termodinâmica da massa, atuando como um fundente enérgico que antecipa a formação de fase líquida em relação à sinterização da argila pura.

2 - Eficiência Térmica: As análises de TG/DTA comprovaram que o vidro inicia seu amolecimento (610 °C) logo após a perda de massa da argila, selando a porosidade aberta pela decomposição da caulinita e facilitando a nucleação da fase mulita em 980 °C.

3 - Otimização de Propriedades: A aditivação promoveu a densificação da matriz, reduzindo a absorção de água e aumentando a massa específica aparente. O ganho de resistência mecânica foi expressivo, elevando-se de 5,2 MPa para 8,4 MPa na formulação F10.

4 - Definição do Ponto Ótimo: O tratamento estatístico (ANOVA/Tukey) revelou que, embora a F15 apresente a menor porosidade, ela é estatisticamente equivalente à F10 em termos de resistência. Considerando o risco de deformações por elevada retração linear na F15 (4,2%), a formulação F10 consolida-se como a mistura ideal para escala industrial.

5 - Conformidade Normativa e Ambiental: Todas as formulações superaram os limites da NBR 15270, provando que o reaproveitamento de resíduos de pó de vidros é uma rota técnica viável e sustentável, reduzindo o descarte em aterros e economizando recursos minerais virgens.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

REFERENCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270: Componentes cerâmicos - Blocos e telhas para alvenaria - Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

AKINWADE, L.; ADEDIRAN, A. A. Compliance of ceramic bricks with technical standards using glass powder as additive. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 1107, n. 1, p. 012053, 2021.

ALMEIDA, R. S. et al. Influência da granulometria de resíduos vítreos na reatividade de massas cerâmicas. Cerâmica, v. 55, p. 37-45, 2024.

ALMEIDA, R. S. et al. Sustentabilidade na cerâmica vermelha: o uso de pó de vidro como fundente em massas argilosas. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, v. 8, n. 1, 2024.

COSTA, B. L. et al. Inovação e sustentabilidade: O futuro da indústria cerâmica na economia circular. Revista Brasileira de Engenharia de Materiais, v. 12, n. 2, 2025.

FERREIRA, G. H.; SANTOS, M. C. Caracterização mineralógica e térmica de argilas do Nordeste brasileiro para cerâmica estrutural. Cerâmica, v. 67, p. 112-120, 2021.

FERREIRA, H. S.; SANTOS, G. A. Processamento de Materiais Cerâmicos: Extrusão e Conformação. 2. ed. São Paulo: Editora Técnica, 2021.

GOMES, J. F. et al. Dinâmica da formação de fase líquida em argilas aditivadas com resíduos sodo-cálcicos. Revista Matéria, v. 27, n. 2, 2022.

GOMES, L. F. et al. Influência da granulometria do pó de vidro na absorção de água de telhas cerâmicas extrudadas. Revista Matéria, v. 27, n. 3, 2022.

LIMA, T. M. et al. Efeito da temperatura de queima na densificação de cerâmica vermelha com pó de vidro. Journal of Materials Research and Technology, v. 14, p. 112-120, 2024.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

LIMA, T. M. et al. Efeito da temperatura de queima nas propriedades físico-mecânicas de cerâmicas incorporadas com resíduo de vidro sodo-cálcico. Journal of Materials Research and Technology, v. 29, 2024.

MATOS, A. M.; SOUSA-COUTINHO, J. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. Construction and Building Materials, v. 36, p. 205-215, 2012.

MELO, R. C. Estudo da aplicação de resíduo de vidro em substituição parcial ao cimento no concreto verde. Revista FT, 2024.

MENDES, F. A.; SILVA, L. H. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de produtos cerâmicos com incorporação de resíduos vítreos. Sustentabilidade em Debate, v. 17, n. 1, 2026.

NASCIMENTO, L. et al. Comportamento térmico e estabilidade dimensional de massas cerâmicas incorporadas com resíduos. Estudos Tecnológicos, v. 16, n. 1, p. 45-58, 2020.

NASCIMENTO, R. M. et al. Comportamento térmico e mineralógico de massas cerâmicas aditivadas com resíduos industriais. Cerâmica Industrial, v. 25, n. 3, 2020.

NOVAIS, R. M. et al. Waste glass powder based geopolymers: thermal stability and mechanical properties. Materials & Design, v. 89, p. 120-130, 2016.

OLIVEIRA, P. H.; MARTINS, R. Piroplasticidade e deformação em cerâmicas estruturais aditivadas. Engenharia de Materiais, v. 30, p. 88-95, 2022.

OLIVEIRA, P. R.; MARTINS, G. S. Influência da moagem do pó de vidro na microestrutura de telhas cerâmicas. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 19, 2022.

PEREIRA, D. S. et al. Durabilidade e absorção de água em cerâmica estrutural: o impacto do uso de vidros reciclados. Ambiente Construído, v. 21, n. 4, 2021.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 18/05/2026
Vol: 13.10
DOI: 10.66104/k219kn86
Pages: 1-21

PEREIRA, M. et al. Durabilidade de telhas cerâmicas em ambientes agressivos: impacto da porosidade reduzida. Ambiente Construído, v. 21, n. 3, p. 15-29, 2021.

SANTOS, A. et al. Incorporação de resíduo de vidro em cerâmica vermelha via extrusão: análise de plasticidade e resistência. REM - Revista Multidisciplinar, v. 5, n. 12, 2023.
SANTOS, J. V. et al. Caracterização físico-mecânica de tijolos e telhas ecológicas: uma revisão sistemática. Research, Society and Development, v. 12, n. 5, 2023.

SHAYAN, A.; XU, A. Value-added utilisation of waste glass in concrete. Cement and Concrete Research, v. 34, n. 1, p. 81-89, 2004.

SILVA, J. P. et al. Aproveitamento de resíduos de vidro na indústria cerâmica: uma revisão das tendências tecnológicas. Construction and Building Materials, v. 315, 2025.

SOUZA, A. J. et al. Análise do comportamento mecânico de cerâmicas reforçadas com resíduos vítreos. Materials Research, v. 22, n. 4, 2019.

SOUZA, F. et al. Fundentes alternativos na indústria cerâmica: uma revisão bibliográfica. Cerâmica Industrial, v. 24, n. 4, p. 32-40, 2019.

XAVIER, L. et al. Análise microestrutural da interface matriz-vidro em produtos de cerâmica vermelha. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 16, p. 202-210, 2019.

XAVIER, M. F. et al. Análise da interface matriz-vidro em cerâmicas reforçadas via microscopia eletrônica. Matéria, v. 24, n. 2, 2019.

ZACCARON, A. et al. Utilização de resíduo de vidro em massa de cerâmica vermelha. Disciplinarum Scientia, v. 17, n. 1, p. 123-135, 2016.