



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CHAMOTE NA FORMULAÇÃO DE PASTAS  
GEOPOLIMÉRICAS À BASE DE METACAU LIM**

**LEONARDO FERREIRA JUNIOR**

Foz do Iguaçu  
2025

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CHAMOTE NA FORMULAÇÃO DE PASTAS  
GEOPOLIMÉRICAS À BASE DE METACAU LIM**

**LEONARDO FERREIRA JUNIOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Priscila Lemes.

Foz do Iguaçu  
2025

LEONARDO FERREIRA JUNIOR

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CHAMOTE NA FORMULAÇÃO DE PASTAS  
GEOPOLIMÉRICAS À BASE DE METACAU LIM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Priscila Lemes  
UNILA

---

Prof. D.Sc. Alex Neves Junior  
UFMT

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Edna Possan  
UNILA

Foz do Iguaçu, 13 de março de 2025.

## TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): Leonardo Ferreira Junior.

Curso: Bacharel em engenharia de Materiais.

Tipo de Documento	
<input checked="" type="checkbox"/> graduação	<input type="checkbox"/> artigo
<input type="checkbox"/> especialização	<input checked="" type="checkbox"/> trabalho de conclusão de curso
<input type="checkbox"/> mestrado	<input type="checkbox"/> dissertação
<input type="checkbox"/> doutorado	<input type="checkbox"/> tese
	<input type="checkbox"/> CD/DVD – obras audiovisuais

Título do trabalho acadêmico: Influência da adição de chamote na formulação de pastas geopoliméricas à base de metacaulim.

Nome do orientador(a): Profa. Dra. Priscila Lemes

Data da Defesa: 13/03/2025

### Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

- 1 Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.
- 1 Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública [Creative Commons Licença 3.0 Unported](#).

Foz do Iguaçu, 13 de março de 2025.

Assinatura do Responsável

Dedico este trabalho a Deoclides N. da  
Silva.

## RESUMO

A procura por materiais de construção que combinem sustentabilidade e alto desempenho tem se intensificado nos últimos anos, motivada pela urgência em minimizar os impactos ambientais, como os decorrentes da fabricação do cimento Portland, responsável por cerca de 8% das emissões globais de CO<sub>2</sub>. Nesse contexto, os geopolímeros emergem como uma alternativa promissora, pois podem ser produzidos a partir de resíduos industriais, como cinzas volantes e escórias de alto-forno, contribuindo para a economia circular e a redução do descarte inadequado de resíduos sólidos. Dentre esses subprodutos, temos o chamote (CM), gerado a partir da quebra de materiais cerâmicos em linha de produção, como as de blocos, telhas e porcelanatos. Esse material, um rejeito sinterizado, pode ser reintroduzido na formulação como matéria-prima (MP) secundária, reduzindo o descarte de materiais beneficiados. Além de mitigar os desperdícios, o chamote é empregado para melhorar a resistência mecânica de peças cerâmicas no estado a verde e após a sinterização, como em casos que necessitem reduzir a retração das peças durante a secagem e/ou queima. Esse subproduto pode apresentar propriedades como elevada estabilidade térmica, dureza e baixa absorção de água, especialmente quando proveniente de indústrias de porcelanato, com sua granulometria e refratariedade variando conforme a origem. Atualmente o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de cerâmicas, com 8,15 bilhões de blocos/telhas e 470.550 toneladas de outros produtos por ano (ANICER, 2023). É o terceiro maior em revestimentos cerâmicos, representando 6% do PIB da construção (ANFACER, 2025), mas enfrenta perdas de até 14% no processo, como a produção de cerâmicas vermelhas que gera ~7.500 toneladas anuais de resíduos (chamote) (Queiroz Neto et al., 2016). Diante desse cenário, o estudo buscou avaliar a influência da adição de chamote de porcelanato esmaltado nas propriedades mecânicas e microestruturais de pastas geopoliméricas à base de metacaulim, silicato de sódio e hidróxido de sódio. Para as análises foram produzidos corpos de prova cúbicos de arestas de 50mm, sendo confeccionados três corpos de prova (CP's) para cada formulação. Cada traço variou sua fórmula através da substituição de metacaulim por chamote entre 0%, 20%, 30%, 70% e 80%. As amostras foram caracterizadas por meio de ensaios de compressão, difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de dispersão de elétrons (EDS). Os resultados revelaram uma distribuição granulométrica de  $35,67 \pm 13,65 \mu\text{m}$  para o chamote moído utilizado, além de uma resistência à compressão atrativa (40–50 MPa) para as formulações com 20% e 30% de chamote, comparável à do cimento Portland convencional. A análise de DRX identificou halos amorfos e fases cristalinas bem definidas de quartzo nas matérias primas precursoras, enquanto a MEV mostrou uma microestrutura densa e homogênea no CP confeccionado com 20% de chamote. A ativação alcalina da fase cristalina do chamote foi sugerida pelo abaulamento dos cantos vivos das partículas evidenciadas no MEV, demonstrando seu potencial como material alternativo para a produção de geopolímeros de alto desempenho. Esses resultados contribuem para a ecoeficiência dos materiais, promovendo a economia circular na indústria da construção civil e de revestimentos cerâmicos, além de reduzir o descarte inadequado de resíduos industriais.

**Palavras-chave:** geopolímero; chamote; metacaulim; resíduo; construção civil.

## RESUMEN

La demanda de materiales de construcción que combinen sostenibilidad y alto rendimiento se ha intensificado en los últimos años, motivada por la urgencia de minimizar los impactos ambientales, como los derivados de la fabricación del cemento Portland, responsable de alrededor del 8% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>. En este contexto, los geopolímeros emergen como una alternativa prometedora, pues pueden ser producidos a partir de residuos industriales, como cenizas volantes y escorias de alto horno, contribuyendo a la economía circular y a la reducción del descarte inadecuado de residuos sólidos. Entre estos subproductos, se encuentra la chamota (CM), un subproducto generado a partir de la rotura de materiales cerámicos en líneas de producción, como las de bloques, tejas y baldosas. Este material, un rechazo sinterizado, puede ser reintroducido en la formulación como materia prima secundaria, reduciendo la eliminación de materiales procesados. Además de mitigar los desperdicios, la chamota se emplea para mejorar la resistencia mecánica de piezas cerámicas, en estado verde y después de la sinterización, además de reducir la contracción durante las etapas de secado y sinterización. Este subproducto puede presentar propiedades como elevada estabilidad térmica, dureza y baja absorción de agua, especialmente cuando proviene de industrias de porcelanato, con su granulometría y refratariedad variando según el origen. Actualmente, Brasil es uno de los mayores productores mundiales de cerámicas, con 8.150 millones de bloques/tejas y 470.550 toneladas de otros productos al año (ANICER, 2023). Es el tercer mayor productor de revestimientos cerámicos, representando el 6% del PIB de la construcción (ANFACER, 2025), pero enfrenta pérdidas de hasta el 14% en el proceso, como en la producción de cerámicas rojas que genera ~7.500 toneladas anuales de residuos (chamota) (Queiroz Neto et al., 2016). Ante este panorama, el estudio buscó evaluar la influencia de la adición de chamota de porcelanato esmaltado en las propiedades mecánicas y microestructurales de pastas geopoliméricas a base de metacaolín, silicato de sodio e hidróxido de sodio. Para los análisis se produjeron probetas cúbicas de aristas de 50 mm, elaborándose tres probetas (CPs) para cada formulación. Cada dosificación varió su composición mediante la sustitución de metacaolín por chamota entre 0%, 20%, 30%, 70% y 80%. Las muestras fueron caracterizadas mediante ensayos de compresión, difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopía de dispersión de energía (EDS). Los resultados revelaron una distribución granulométrica de  $35,67 \pm 13,65 \mu\text{m}$  para la chamota molida utilizada, además de una resistencia a la compresión atractiva (40-50 MPa) para las formulaciones con 20% y 30% de chamota, comparable a la del cemento Portland convencional. El análisis de DRX identificó halos amorfos y fases cristalinas bien definidas de cuarzo en las materias primas precursoras, mientras que el MEB mostró una microestructura densa y homogénea en la probeta elaborada con 20% de chamota. La activación alcalina de la chamota en la pasta fue sugerida por el redondeamiento de los bordes vivos evidenciado en las partículas en el MEB, demostrando su potencial como material alternativo para la producción de geopolímeros de alto desempeño. Estos resultados contribuyen a la ecoeficiencia de los materiales, promoviendo la economía circular en la industria de la construcción civil y de revestimientos cerámicos, además de reducir el descarte inadecuado de residuos industriales.

**Palabras clave:** geopolímero; chamota; metacaolín; residuo; construcción civil.

## ABSTRACT

The demand for construction materials that combine sustainability and high performance has intensified in recent years, motivated by the urgency to minimize environmental impacts, such as those arising from the production of Portland cement, responsible for about 8% of global CO<sub>2</sub> emissions. In this context, geopolymers emerge as a promising alternative, as they can be produced from industrial waste, such as fly ash and blast furnace slag, contributing to the circular economy and reducing improper disposal of solid waste. Among these by-products is chamotte (CM), generated from the breakage of ceramic materials in production lines, such as blocks, tiles, and porcelain tiles. This sintered residue can be reintroduced into formulations as a secondary raw material, reducing the disposal of processed materials. In addition to minimizing waste, chamotte is used to improve the mechanical strength of ceramic pieces, both in the green state and after sintering, as well as to reduce shrinkage during drying and sintering stages. This byproduct can exhibit properties such as high thermal stability, hardness, and low water absorption, especially when sourced from porcelain tile industries, with its particle size and refractoriness varying according to origin. Currently, Brazil is one of the world's largest ceramic producers, with 8.15 billion blocks/tiles and 470,550 tons of other products per year (ANICER, 2023). It is the third-largest producer of ceramic coatings, representing 6% of the construction GDP (ANFACER, 2025), but faces losses of up to 14% in the process, such as in red ceramics production, which generates ~7,500 tons of chamotte waste annually (Queiroz Neto et al., 2016). Given this scenario, the study sought to evaluate the influence of the addition of chamotte on the mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer pastes, using sodium silicate and sodium hydroxide. Cubic specimens with 50mm edges were produced, with three specimens made for each formulation. Each mix varied its composition by replacing metakaolin with chamotte at 0%, 20%, 30%, 70%, and 80%. The samples were characterized through compression tests, X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive spectroscopy (EDS). The results revealed a particle size distribution of  $35.67 \pm 13.65 \mu\text{m}$  for the ground chamotte, as well as an attractive compressive strength (40-50 MPa) for formulations with 20% and 30% chamotte, comparable to conventional Portland cement. XRD analysis identified amorphous halos and well-defined crystalline phases of quartz in the precursor materials, while SEM showed a dense and homogeneous microstructure in the specimen with 20% chamotte. The alkaline activation of chamotte in the paste was suggested by the rounding of the sharp edges of particles observed in SEM, demonstrating its potential as an alternative material for producing high-performance geopolymers. These results contribute to the eco-efficiency of materials, promoting the circular economy in the construction and ceramic coatings industries, while reducing improper disposal of industrial waste.

**Key words:** geopolymer; chamotte; metakaolin; waste; civil construction.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 01</b> – Estrutura de ligação entre tetraedros de SiO <sub>4</sub> e AlO <sub>4</sub> .....	14
<b>Figura 02</b> – Estrutura padrão da caulinita .....	19
<b>Figura 03</b> – Transformação (0 a 100%) da caulinita em metacaulinita .....	20
<b>Figura 04</b> – Produto. MK HP Ultra .....	22
<b>Figura 05</b> – Chamote moído .....	22
<b>Figura 06</b> – Molde com contenção.....	23
<b>Figura 07</b> – Chamote britado utilizado como objeto de estudo.....	29
<b>Figura 08</b> – Chamote britado, retido #50.....	40
<b>Figura 09</b> – Ampliação de 1000x – chamote .....	40
<b>Figura 10</b> – Chamote utilizado como MP .....	41
<b>Figura 11</b> – CP F20%CM – ampliações de 100x, 1000x, 5.000x .....	43
<b>Figura 12</b> – Espectro EDS da amostra F20%CM .....	45
<b>Figura 13</b> – MEV para mapeamento de elementos no CP F20%CM.....	46
<b>Figura 14</b> – Mapeamento da distribuição no CP F20%CM: (a)O, (b)Na, (c)Al, (d)Si. ....	47

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01</b> – FR-X do MK utilizado em projetos entre 2019 e 2024 .....	21
<b>Tabela 02</b> – Porcentagem peso entre MK, CM, SS e HS nas formulações .....	25
<b>Tabela 03</b> – FR—X do chamote .....	30
<b>Tabela 04</b> – Razões molares propostas por Davidovitz .....	30
<b>Tabela 05</b> – Razões Molares – traço E.....	31
<b>Tabela 06</b> – Razões Molares – traço F.....	32
<b>Tabela 07</b> – Razões Molares – traço I.....	32
<b>Tabela 08</b> – Razões Molares – traço O .....	33
<b>Tabela 09</b> – Média dos valores de RC para cada traço e teor de subst. ....	34

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CM	Chamote moído
CP	Corpo de prova
MK	Metacaulim
MP	Matéria-prima
LS	Limite superior
RC	Resistência à compressão
RM	Razão molar
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
EDS	Espectroscopia por dispersão de elétrons
DR-X	Difratometria de raios X
FR-X	Fluorescência de raios X
ILATIT	Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
LADEMA	Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
ANFACER	Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para revestimentos, louças sanitárias e congêneres

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
2.1 OBJETIVOS GERAIS .....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
3.1 GEOPOLIMERIZAÇÃO.....	14
3.2 FUNÇÃO DOS CÁTIOS E ATIVADORES ALCALINOS .....	16
3.4 CHAMOTE .....	17
3.5 METACAULIM .....	19
<b>4 MATERIAIS E METODOLOGIA</b> .....	<b>22</b>
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	22
4.2 METODOLOGIA.....	24
4.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	26
4.4 ENSAIOS E ANÁLISES.....	27
4.4.1 FASES PRESENTES E CRISTALINIDADE.....	27
4.4.2 ANÁLISE E TRATAMENTO DE IMAGENS.....	28
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>29</b>
5.1 COMPOSIÇÃO DO CHAMOTE E MOAGEM.....	29
5.2 RAZÕES MOLARES.....	30
5.2 ENSAIOS DE COMPRESSÃO .....	33
5.3 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X .....	37
5.4 MICROSCOPIA ELETRONICA DE VARREDURA (MEV) .....	39
5.5 ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ELETRONS .....	45
5.6 MAPEAMENTO DE ELEMENTOS QUÍMICOS .....	46
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>48</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>49</b>
<b>8 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>50</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda por materiais de construção sustentáveis tem ganhado cada vez mais relevância, impulsionada pela crescente conscientização sobre a necessidade de reduzir as emissões de carbono, em especial geradas pela indústria da construção civil. Diante desse cenário, os geopolímeros emergem como uma solução promissora e mais ecológica frente ao cimento Portland tradicional, cuja produção é responsável por aproximadamente 8% das emissões globais de dióxido de carbono (Andrew, 2018; Monteiro; Miller; Horvath, 2017).

Os geopolímeros são materiais inorgânicos de alta resistência e durabilidade, formados a partir da reação de ativação alcalina de materiais ricos em sílica e alumina, como a metacaulinita (MK), que é um material pozolânico fora do equilíbrio termodinâmico, obtida pela calcinação da caulinita entre 600°C e 800°C, sendo um dos principais precursores utilizados na síntese de geopolímeros (Neves e Melo Filho, 2018). A reatividade dessas fontes de aluminossilicatos está diretamente relacionada a sua composição química e mineralógica, morfologia, granulometria e presença de fases amorfas. Para a obtenção de geopolímeros estáveis, é essencial que os materiais precursores apresentem elevada amorfismo, baixa exigência de água e capacidade de liberar íons de alumínio de forma eficiente durante a ativação. Como agentes ativadores, são comumente empregados compostos alcalinos, tais como hidróxido de sódio e/ou silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) (Singh et al., 2015).

Estes geopolímeros apresentam a vantagem de poder serem produzidos a partir de resíduos industriais, como cinzas volantes, escórias de alto-forno e outros subprodutos (Provis, 2018; Singh et al., 2015). Dentre esses resíduos, temos o chamote, um subproduto gerado a partir da quebra de materiais cerâmicos em linha de produção, como as de blocos, telhas, pisos e porcelanatos. Esse material, um rejeito sinterizado, pode ser reintroduzido nas linhas de produção ao qual faz parte, como matéria-prima secundária, reduzindo desperdícios. Além de mitigar o desperdício, o uso chamote é empregado para melhorar a resistência mecânica de peças cerâmicas na pré-queima, além de reduzir a contração durante as etapas de secagem e queima. Esse subproduto pode apresentar propriedades como elevada estabilidade térmica, dureza e baixa absorção de água.

Ao incorporar esses materiais em sua composição, os geopolímeros contribuem para a redução do descarte inadequado e promovem a circularidade na economia. Essa abordagem diminui a extração de matérias-primas virgens e agrega valor a subprodutos, fomentando uma cadeia produtiva mais sustentável e ecoeficiente. Dessa forma, os geopolímeros representam um avanço significativo na busca por soluções que aliem desempenho técnico, viabilidade econômica e responsabilidade ambiental (Provis, 2018; Singh et al., 2015).

A Associação Nacional da Indústria Cerâmica – ANICER (2023), destaca que o Brasil com uma produção anual de 8,15 bilhões de blocos e telhas, além de 470.550 toneladas de outros produtos cerâmicos. Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para revestimentos, louças sanitárias e congêneres – ANFACER (2025), o país é o terceiro maior produtor mundial de revestimentos cerâmicos, representando 6% do PIB da indústria da construção, com produção em 2020 atingindo entre 1,48 bilhões de m<sup>2</sup>. No último dado publicado do mercado global, a China lidera com 9,37 bilhões de m<sup>2</sup> produzidos em 2023, seguida pela Índia (2,58 bilhões) e pelo Brasil (751 milhões). Quanto as perdas neste processo, Gouveia (2008) aponta que nestes segmentos podem chegar a 10%, e Queiroz Neto et al. (2016) estimam que 14% da produção anual de cerâmicas vermelhas se transforma em resíduos (chamote), totalizando aproximadamente 7.500 toneladas.

Frente a este panorama, o presente trabalho (TCC) investiga a influência da adição de chamote na formulação de pastas geopoliméricas à base de metacaulim. O estudo caracterizou via difração de raios x (DR-X) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) as matérias-primas secas utilizadas. As amostras geopolimerizadas foram testadas com diferentes teores de substituição de metacaulim por chamote (0%, 20%, 30%, 70% e 80%), produzindo corpos de prova que foram caracterizadas por ensaios de compressão, MEV e espectroscopia de dispersão de elétrons (EDS). Os resultados de DRX apresentaram fases cristalinas bem definidas de quartzo. Pelo MEV foi estimado distribuição do tamanho de partículas de chamote moído ( $35,67 \pm 13,65 \mu\text{m}$ ) e observado a formação de uma microestrutura densa e homogênea do CP geopolimerizado. Os resultados demonstraram que as formulações com 20% e 30% de chamote apresentaram resistência à compressão atrativa (40–50 MPa), comparável à do cimento Portland convencional. Estes valores obtidos confirmam para a eficiência no uso do chamote como substituto ao metacaulim, promovendo a economia circular na indústria.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVOS GERAIS

- Desenvolvimento de matrizes álcali-ativadas à base de metacaulim e chamote.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

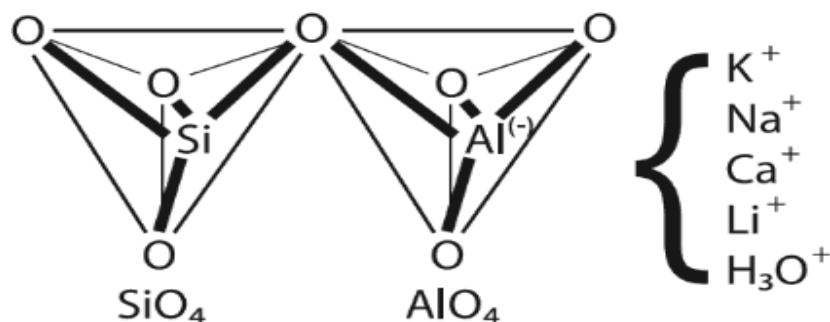
- Avaliar as propriedades mecânicas de pastas geopoliméricas confeccionadas com metacaulim e chamote;
- Avaliar química e microestruturalmente as matérias-primas utilizadas e as pastas geopoliméricas confeccionadas.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 GEOPOLIMERIZAÇÃO

Davidovits (1991) teoriza que a ciência da geopolimerização parte da policondensação de precursores inorgânicos, sendo estes, óxidos alumino-silicatos com polissilicatos alcalinos, cuja polimerização ocorre em temperaturas inferiores a 100°C, promovendo a formação de ligações do tipo poli(sialato), poli(sialato-siloxo) e poli(sialato-dissiloxo). A estes materiais amorfos/semicristalinos deu-se o nome de geopolímeros. As redes formadas de sialatos são estruturas tridimensionais básicas dos geopolímeros, que se organizam pela ligação alternada entre tetraedros de silicatos e aluminatos, compartilhando todos os átomos de oxigênio e utilizando cátions de valência 1+ e 2+ para equilibrar as cargas negativas geradas pela presença de  $\text{Al}^{3+}$  em coordenação IV conforme mostrado na Figura 01. A composição química geral destes geopolímeros é representada como  $\text{Mn} \{-(\text{SiO}_2)_z-(\text{AlO}_2)\}_n, w\text{H}_2\text{O}$ , onde M é o cátion equilibrador de carga, n é o número de unidades repetidas (grau de polimerização), z é o número de  $\text{SiO}_2$  contido no monômero, podendo variar de 1 a 3, conforme a quantidade de  $\text{SiO}_2$ .

**Figura 01** – Estrutura de ligação entre tetraedros de  $\text{SiO}_4$  e  $\text{AlO}_4$ .



Fonte: Ledur. 2024.

A partir da razão molar  $\text{SiO}_2/\text{AlO}_2$  resultante da combinação dos materiais da mistura reacional, pode-se determinar o tipo de polysialato a ser produzido na geopolimerização. Para uma razão molar (RM) igual a 1, obtém-se o poli(sialato), que

apresenta a estrutura menos complexa, com uma alternância direta entre os tetraedros de  $\text{AlO}_4$  e  $\text{SiO}_4$ . Sua fórmula geral é representada como  $\text{Mn} \{-(\text{SiO}_2)_1-(\text{AlO}_2)\}_n, w\text{H}_2\text{O}$ . Essa estrutura possui elevada reatividade devido à alta concentração de alumínio, o que favorece a cinética das ligações Si-O-Al. No entanto, a baixa razão molar resulta em menor resistência térmica e química quando comparada a razões maiores, limitando suas aplicações a ambientes menos hostis, como cimentos convencionais e contenção de resíduos. Além disso, o poli(sialato) é frequentemente utilizado em aplicações que demandam rápida cura e alta resistência inicial, como reparos estruturais e materiais de construção de baixo custo. Contudo, sua menor estabilidade em condições extremas, como altas temperaturas ou exposição a produtos químicos agressivos, restringe seu uso em tais cenários (Davidovits, 1991).

Por outro lado, o poli(sialato-siloxo), com razão molar igual a 2, apresenta uma estrutura mais complexa, com a inclusão de um tetraedro adicional de  $\text{SiO}_4$  entre os tetraedros de  $\text{SiO}_4$  e  $\text{AlO}_4$ . Essa razão indica dois átomos de silício para cada átomo de alumínio, com fórmula geral  $\text{Mn} \{-(\text{SiO}_2)_2-(\text{AlO}_2)\}_n$ . O aumento na presença de  $\text{SiO}_4$  melhora a estabilidade da rede, conferindo ao material maior resistência térmica e mecânica em comparação ao poli(sialato). Por isso, essa estrutura é amplamente utilizada na produção de concretos geopoliméricos e revestimentos resistentes ao fogo, sendo ideal para aplicações que exigem elevado desempenho estrutural e durabilidade. Por fim, o poli(sialato-dissiloxo), com razão molar igual a 3, é a estrutura mais complexa, com a inserção de dois tetraedros adicionais de  $\text{SiO}_4$  entre os tetraedros de  $\text{SiO}_4$  e  $\text{AlO}_4$ . Essa razão proporciona a maior estabilidade térmica, mecânica e química entre os tipos de estruturas poliméricas citadas, sendo aplicável em ambientes extremamente hostis, como ferramentas de altas temperaturas, materiais para a indústria aeroespacial e compósitos reforçados (Davidovits, 1991).

Zhang *et al.* (2010) investigaram como a proporção molar entre  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  afeta as características de geopolímeros. No estudo foram produzidos geopolímeros com proporções molares variando de 2,0 a 4,0. Os resultados mostraram que uma proporção de 3,98 levou à formação de uma microestrutura mais compacta e uniforme, com ganhos expressivos na resistência à compressão, na estabilidade química e térmica. Essa razão molar foi fundamental para otimizar a formação de géis geopoliméricos e a distribuição de poros, resultando em um material com baixa permeabilidade e alta resistência à penetração de água do mar.

### 3.2 FUNÇÃO DOS CÁTIONS E ATIVADORES ALCALINOS

A dissolução dos precursores aluminossilicatos e a formação das ligações Si-O-Al que compõem a rede tridimensional dos geopolímeros são fortemente influenciadas pela presença de cátions alcalinos (como Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) e ativadores alcalinos (como NaOH e KOH). Os cátions atuam como compensadores de carga na estrutura geopolimérica, como explicado no tópico anterior e ocupam as cavidades das estruturas, equilibrando e estabilizando as cargas na rede tridimensional (Davidovits, 1991).

Cátions de sódio são comumente utilizados devido sua alta solubilidade e capacidade de ativação dos precursores aluminossilicatos (Davidovits, 2008). Cátions de potássio possuem raio atômico maior que os de sódio, ocasionando a formação de uma estrutura mais porosa e geralmente com maior resistência térmica e química, sendo os mais indicados para estas condições nos casos extremos (Davidovits, 1991).

Os ativadores como soluções de NaOH e KOH são fundamentais para que ocorra a dissolução adequada dos precursores aluminossilicatos e para a geração das espécies reativas participantes da geopolimerização. Estes ativadores ofertam o meio alcalino necessário para ocorrer a quebra das ligações Si-O-Si (siloxano) e Al-O-Al, disponibilizando os íons formadores da rede de sialatos (Davidovits, 2008).

Santos *et al.* (2020) descrevem um método geral para a ativação alcalina de materiais à base de sílica e alumina, dividido em quatro fases principais: dissolução, coagulação, condensação e cristalização. Na primeira etapa, a elevação do pH da solução alcalina provoca a ruptura das ligações covalentes Si-O-Si e Al-O-Si, transformando esses grupos em uma fase coloidal e dissolvendo os precursores sólidos. Na sequência, os produtos da dissolução interagem entre si, formando uma estrutura coagulada. Esse processo evolui para a condensação, onde a estrutura se torna mais densa e inicia a gelificação, com a reorganização da rede. Por fim, ocorre a cristalização, marcada pela formação e endurecimento do geopolímero, resultante da interação entre aluminatos e silicatos.

### 3.4 CHAMOTE

Assim como em qualquer linha de produção, a fabricação de materiais cerâmicos, sejam semiacabados ou acabados, envolvem perdas durante o processo. Após a etapa de sinterização, essas perdas são classificadas como "quebra" e geram um subproduto conhecido como chamote. Gouveia *et al.* (2009) definem os resíduos de quebra da indústria de blocos cerâmicos como chamote, enquanto MELO, M. M. *et al.* (2009). utilizam o mesmo termo para se referir aos rejeitos provenientes da fabricação de telhas. Essas diferentes aplicações do conceito evidenciam a versatilidade do chamote como material reutilizável na indústria cerâmica.

Nesse contexto, Garcez (2011) define o chamote como um material cerâmico resultante da calcinação e posterior trituração desta argila sinterizada. Esse componente é incorporado a pastas com elevada plasticidade com o objetivo de elevar sua resistência mecânica e minimizar a contração durante as etapas de secagem e queima. A autora ressalta que a produção desse material pode variar principalmente em termos de granulometria e refratariedade.

A ANICER (2023) apresenta dados do setor de cerâmica e olarias no Brasil, onde o país possui ao total 5.578 fábricas, com uma produção de blocos e telhas estimada em 8,15 bilhões de unidades por ano, e para outros acessórios uma estimativa em torno de 470.550 ton/ano.

De acordo com a ANFACER (2025), o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de revestimentos cerâmicos, com este segmento representando no país 6% do PIB da indústria de material de construção, cujo sua produção anual (2020 a 2023) variou entre 751 milhões e 1,48 bi de m<sup>2</sup>, com a evolução da capacidade produtiva atingindo o ápice em 2020. Além disso a associação traz informações do mercado global onde é possível observar a China como líder da produção global deste segmento, alcançando em 2023 a marca anual de 9,37 bilhões de m<sup>2</sup> produzidos, seguido por Índia (2,58 bi) e Brasil (751 milhões).

Para as perdas no processo de fabricação Gouveia (2008) afirma que no segmento cerâmico podem chegar até 10% de sua produção. Queiroz Neto *et al.* (2016) relata que a geração de chamote de cerâmica vermelha no país corresponda aproximadamente a 14% de toda produção, cujo autor estima esta perda em torno de 7500 ton/ano.

Segundo Mendes (2022), o chamote de porcelanato é composto principalmente por sílica, alumina e óxidos metálicos, o que o torna um material com potencial para aplicações sustentáveis, como a incorporação em matrizes de geopolímeros. Mendes (2022) identificou a presença de aluminossilicatos amorfos e atividade pozolânica no chamote, destacando seu potencial como precursor para geopolimerização. O estudo também apontou que, embora sua reatividade seja menor quando comparada ao metacaulim, ajustes na formulação da pasta podem resultar em geopolímeros com resistência à compressão superior a 20 MPa.

Ripoli Filho (1997) demonstrou que a adição de chamote pode melhorar o controle da retração linear durante a secagem de corpos de prova de cerâmica vermelha, analisando a variação da qualidade desses CP's em função da incorporação do subproduto.

Quarth *et al.* (2013) observaram que, embora a adição de chamote de porcelanato na reformulação do produto tenha gerado um aumento no número de vazios, reduzindo a densidade aparente do material no estado verde, após a secagem, a fase líquida formada pelos materiais fundentes durante a sinterização preencheu esses vazios, promovendo maior densificação do produto.

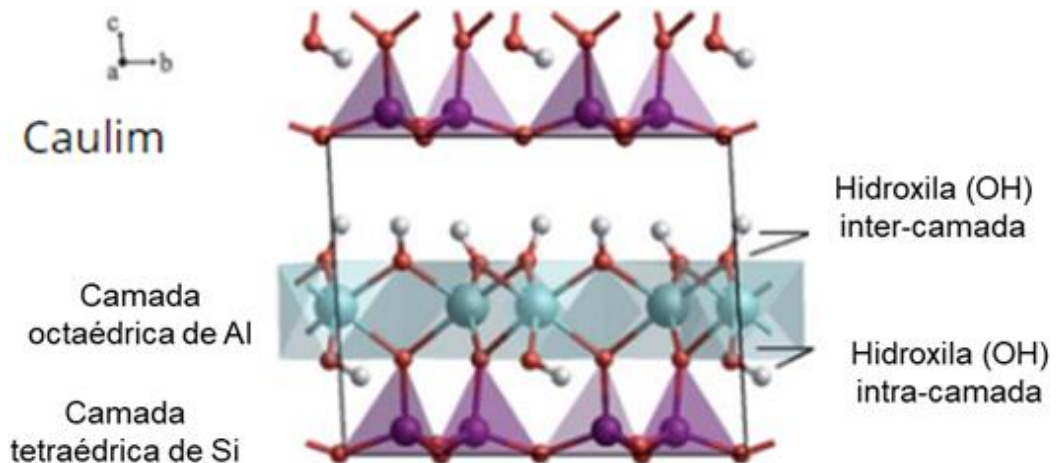
Velasco *et al.* (2021), ao avaliar a incorporação de chamote em revestimentos de tubulações industriais à base de matriz Epóxi DGEBA/TETA, constataram que a adição do resíduo como reforço reduziu a presença de defeitos no produto e aumentou a resistência à flexão das amostras testadas.

Lopes (2023) em sua comparação entre diferentes precursores de geopolímeros relatou que o chamote é um subproduto industrial que pode ser utilizado em formulações de geopolímeros, podendo apresentar ganhos de até 74,01% na resistência a compressão e até mesmo valores mais altos de compressão em temperaturas de 300°C.

### 3.5 METACAULIM

A caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), mineral pertencente ao grupo dos filossilicatos, apresenta uma estrutura cristalina constituída por camadas alternadas de tetraedros de sílica ( $\text{SiO}_4$ ) e octaedros de alumínio ( $\text{AlO}_6$ ), interligadas por átomos de oxigênio, conforme representado na figura 02. Essas camadas são coesas devido a ligações de hidrogênio de baixa energia (SPERINCK, 2010). A desidroxilação endotérmica para a fase metacaulim ocorre na faixa de temperatura de 450 °C a 700 °C, conforme estabelecido por Sperinck (2010), de acordo com a reação:  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 + 2\text{H}_2\text{O}$ .

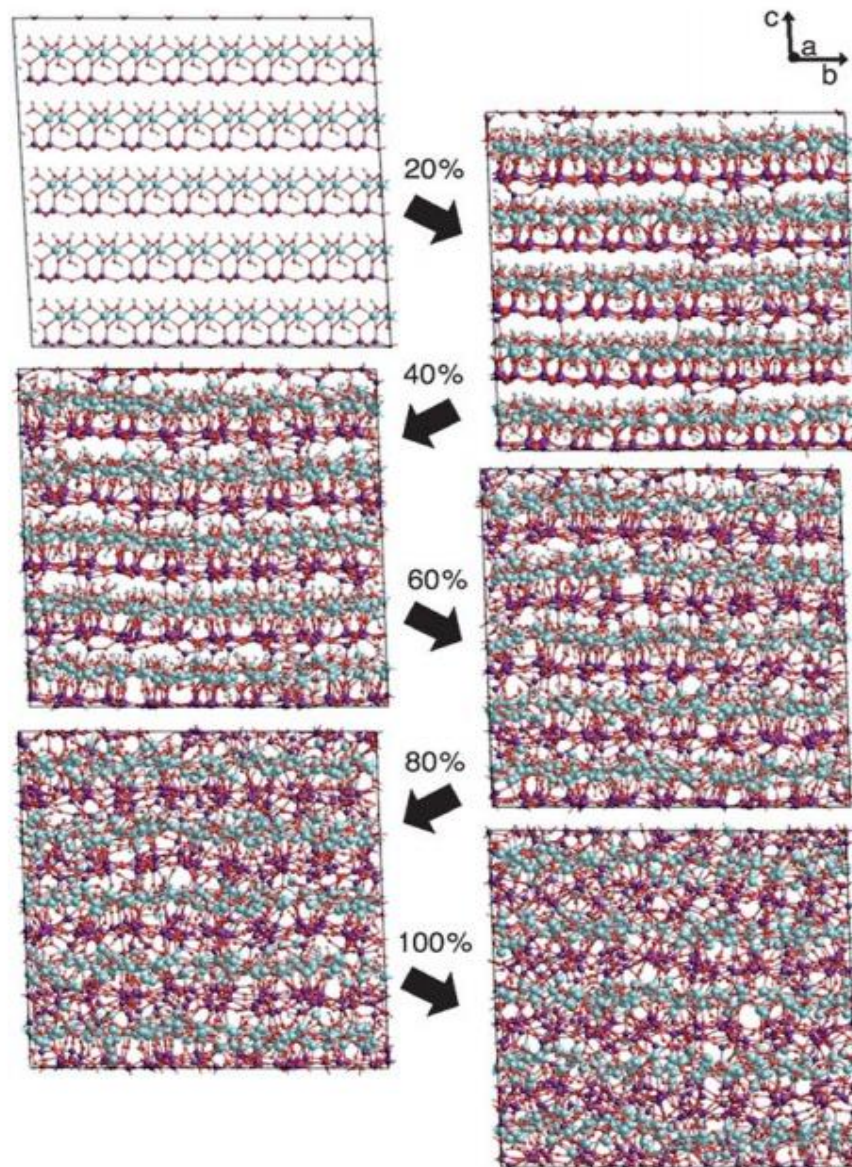
**Figura 02** – Estrutura padrão da caulinita.



Fonte: Adaptado e traduzido de Sperinck *et al.* (2010).

Esse fenômeno promove a distorção da rede cristalina (flambagem), como representado na figura 03, resultando no colapso da estrutura original, redução da distância basal entre camadas e liberação de espécies reativas de silício e alumínio. O produto obtido, denominado metacaulim, caracteriza-se como uma fase **metaestável, fora do equilíbrio termodinâmico**, de microestrutura amorfa ou semicristalina, com elevada reatividade química. Pela imagem (figura 03) é possível observar o aumento na desordem do sistema com o avanço da desidroxilação, promovendo o aumento da energia livre de superfície.

**Figura 03** – Transformação (0 a 100%) da caulinita em metacaulinita.



Fonte: Sperinck *et al.* (2010).

O metacaulim é um material pozolânico essencial para a geopolimerização. Sua alta superfície específica (ilustrada na figura 03) amplia a reatividade com ativadores alcalinos (silicatos de sódio ou potássio), favorecendo a formação de ligações de sialatos (Si-O-Al), que constituem a matriz geopolimérica. Essa matriz confere aos geopolímeros propriedades mecânicas superiores, como resistência à compressão, durabilidade em ambientes agressivos e estabilidade térmica (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

Na construção civil, o uso do metacaulim é amplamente disseminado, sendo indicado para obras de infraestrutura de grande porte, barragens, portos, obras de saneamento, entre outras. Sua eficiência na substituição parcial de cimentos Portland contribui para a redução de custos e impacto ambiental, alinhando-se às demandas por materiais sustentáveis (DAVIDOVITS, 1991).

A relevância do metacaulim na construção civil moderna reside em sua contribuição para a sustentabilidade ambiental. A síntese de geopolímeros a partir do MK reduz significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção de cimento convencional, além de demandar menor consumo energético durante sua fabricação. Estudos recentes destacam ainda sua aplicação em concretos de alta resistência, revestimentos anti-corrosivos e elementos estruturais expostos a condições extremas, consolidando-o como material estratégico para a engenharia do século XXI (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

As propriedades finais do geopolímeros são diretamente influenciadas pela composição química dos materiais utilizados. O metacaulim utilizado no desenvolvimento desta monografia é o mesmo utilizado por Pereira (2024) em sua dissertação. Riscado *et al.* (2023) apresenta uma tabela que relaciona diversos autores brasileiros que utilizaram o mesmo produto de MK (de 2019 a 2022) empregado por Pereira (2024) na obtenção de geopolímeros. A tabela 01 apresenta uma adaptação da tabela elaborada por Riscado *et al.* (2023). Pelas datas de publicação de cada autor é possível observar neste produto que, apesar do teor de ferro (que pode ser considerado um contaminante) ter reduzido ao longo dos anos, também houve um aumento no teor de sílica, em detrimento do teor de alumina.

**Tabela 01** – FR-X do MK utilizado em projetos entre 2019 e 2024.

Metacaulim Ultra HP								
Autores	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
PEREIRA, 2024	61,38	28,46	2,00	1,67	2,84	0,47	0,03	0,49
MATTOS, GONÇALVES, 2019	52,37	39,16	2,83	1,48	0,11	0,31	0,03	0,87
SOUZA, RÊGO, 2020	52,10	36,50	2,73	1,79	0,11	0,76	0,05	2,88
LERMEN <i>et al.</i> , 2022	54,6	34,84	4,45	1,98	-	0,48	3,18	0,15

Fonte: Adaptado de Riscado *et al.* (2023).

## 4 MATERIAIS E METODOLOGIA

### 4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

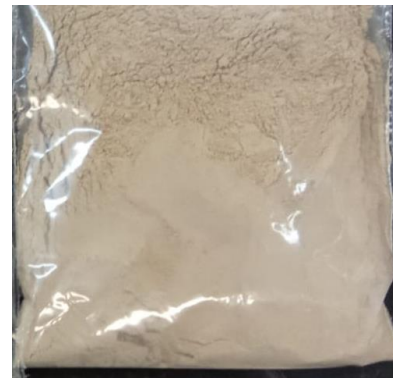
A base da formulação elaborada por Pereira (2024) consistiu no uso de três componentes: metacaulim, silicato de sódio (SS) e hidróxido de sódio (HS). Além da geopolimerização pelo uso desses materiais, este trabalho investiga a influência da substituição de metacaulim por chamote oriundo de quebras de revestimentos cerâmicos (porcelanato esmaltado) em linhas de produção da região Sul do Brasil.

**Figura 04.** – Produto MK HP Ultra.



Fonte: Metacaulim do Brasil Ltda. 2025

**Figura 05** – Chamote moído.



Fonte: Autor. 2025.

O metacaulim selecionado para este trabalho (figura 04) foi adquirido pelo incentivo a pesquisa realizado pela empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda. O produto fornecido é denominado Metacaulim Ultra HP. O chamote utilizado foi doado por uma indústria de revestimentos cerâmicos (porcelanato esmaltado), situada no sudeste do Paraná. O material doado foi previamente britado pela fornecedora. Ao ser recebido, a MP foi peneirada de modo a ser utilizado somente o que fosse passante na #50. O produto obtido nesta malha, passou por um processo de moagem, em um moinho gira jarros da marca MATOLI – modelo 0070M002, durante 24hs e o produto obtido consta na figura 05.

O Silicato de sódio alcalino utilizado como um dos ativadores alcalinos é da marca Quimisul SC Brasil Ltda. Outro ativador utilizado é a solução molar 40mol/L de HS. A diluição de HS em água deionizada foi produzida no laboratório LADEMA a partir micro pérolas de HS sólido, da marca Nox, PAACS com 98% de pureza, misturando os reagentes em um béquer de vidro de 2500mL.

No processo de produção das pastas, foram empregados uma balança de precisão 0,01g da marca Marte - modelo AD5002 e dois agitadores mecânicos digitais da marca Fisatom, modelo 713D, sendo um para a mistura do SS com a solução de HS e outro para a homogeneização final da pasta geopolimérica. As misturas foram realizadas em béqueres de polipropileno da marca Nalgon, com capacidades de 250 e 600mL, garantindo a compatibilidade química com os reagentes utilizados.

Para a moldagem dos corpos de prova foram utilizados moldes cúbicos de silicone com arestas de 50 mm resultando em faces de 25 cm<sup>2</sup>. Foram utilizados 12 moldes deste formato. Esses moldes foram escolhidos devido à sua flexibilidade e facilidade de desmoldagem dos CP's conforme apresentado na figura 06.

**Figura 06.** – Molde com contenção.



Fonte: Autor. 2025.

Por fim, para conferir paralelismo entre a face superior do cubo moldado e sua base, foi utilizado uma retífica de bancada faceadora de corpo de prova de concreto da marca STUHLERT, modelo Mini. Este equipamento possui fixação pneumática do CP, retificação automatizada, entrada e direcionamento de água para refrigeração do disco diamantado utilizado no processo.

## 4.2 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho baseia-se em uma análise quantitativa comparativa das propriedades físicas e mecânicas de corpos de prova geopoliméricos fabricados a partir de metacaulim, silicato de sódio e hidróxido de sódio, com substituição parcial do MK por chamote.

As composições estudadas foram baseadas nas amostras de referência apresentadas na dissertação de Pereira (2024) que utilizou modelagem estatística de misturas para otimização de pastas geopoliméricas, seguindo a linha de pesquisa proposta por Davidovits para o desenvolvimento de geopolímeros. As matérias-primas escolhidas foram fundamentadas em sua disponibilidade, viabilidade técnica e potencial de contribuição para a formação de uma matriz geopolimérica eficiente.

A solução de hidróxido de sódio 10 mol/L foi produzida a partir da mistura de 400g de micro-pérolas de NaOH(s) com 1000 mL de água deionizada, utilizando um misturador magnético a uma velocidade de aproximadamente 300rpm até que ocorresse a dissolução completa. Esse processo foi realizado com cuidado para garantir a homogeneidade da solução, uma vez que a concentração e a qualidade do ativador alcalino são fatores críticos para a geopolimerização. Após a produção, a solução foi deixada em repouso por 2 horas em temperatura ambiente.

O presente trabalho partiu do estudo de Pereira (2024), que desenvolveu geopolímeros à base de metacaulim e biocarvão de casca de arroz para captura de CO<sub>2</sub>. Dentre os inúmeros traços analisados pela autora, selecionaram-se quatro formulações de referência que apresentaram os melhores desempenhos mecânicos em resistência à compressão (RC). Estes traços originais, formulados exclusivamente com metacaulim como material seco (sem adição de biocarvão), tiveram o MK

parcialmente substituído por chamote nas proporções de 20%, 30%, 70% e 80%, mantendo-se as proporções fixas de silicato de sódio e hidróxido de sódio propostas por Pereira. A Tabela 02 detalha a distribuição quantitativa (em porcentagem peso) de metacaulim, chamote, silicato de sódio e hidróxido de sódio para cada traço adaptado, garantindo comparabilidade metodológica com o estudo-base. A substituição do MK por chamote visa avaliar sistematicamente o impacto dessa alteração nas propriedades mecânicas e na eficiência dos geopolímeros.

**Tabela 02** – Porcentagem peso entre MK, CM, SS e HS nas formulações.

Traço	Metacaulim (%)	Silicato de Sódio (%)	Hidróxido de Sódio (%)	Chamote (%)	
I	55,38	31,62	13,00	-	REF
O	56,12	27,76	16,12	-	
E	52,55	34,00	13,45	-	
F	52,00	30,00	18,00	-	
I	44,30	31,62	13,00	11,08	20%
O	44,90	27,76	16,12	11,22	
E	42,04	34,00	13,45	10,51	
F	41,60	30,00	18,00	10,40	
I	38,77	31,62	13,00	16,61	30%
O	39,28	27,76	16,12	16,84	
E	36,79	34,00	13,45	15,77	
F	36,40	30,00	18,00	15,60	
I	16,61	31,62	13,00	38,77	70%
O	16,84	27,76	16,12	39,28	
E	15,77	34,00	13,45	36,79	
F	15,60	30,00	18,00	36,40	
I	11,08	31,62	13,00	44,30	80%
O	11,22	27,76	16,12	44,90	
E	10,51	34,00	13,45	42,04	
F	10,40	30,00	18,00	41,60	

Fonte: o autor, 2025.

### 4.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A fabricação das pastas precursoras dos corpos de prova geopoliméricos foi realizada a partir dos traços apresentados na tabela 02. A produção, armazenamento e retifica foram realizados através do uso do laboratório de desempenho, estruturas e materiais (LADEMA) da UNILA. O processo de mistura e homogeneização das matérias-primas e moldagem da pasta produzida está dividido como:

**Homogeneização da fase líquida:** A solução de silicato de sódio e hidróxido de sódio foi preparada em um agitador mecânico, operando a uma velocidade de 700 rpm, durante cinco minutos. Essa etapa garante a dissolução completa dos componentes e a formação de uma solução homogênea, essencial para a ativação dos aluminossilicatos.

**Mistura da fase sólida com a líquida:** Após a homogeneização da fase líquida, o metacaulim e o chamote foram adicionados gradualmente à solução, com agitação manual em um béquer de polipropileno, utilizando uma espátula por um minuto. Em seguida, a pasta foi homogeneizada novamente em um agitador mecânico a 1250 rpm por cinco minutos, garantindo a completa dispersão das partículas sólidas e a formação de uma pasta uniforme.

**Moldagem dos corpos de prova:** as pastas foram vertidas em moldes de silicone de geometria cúbica com dimensões de 5 cm × 5 cm × 5 cm resultando em uma área de seção transversal média de 25 cm<sup>2</sup>. Para que as paredes do molde não deformassem com a pressão resultante do fluido contido, gerando após a cura faces abauladas, o molde é acoplado em uma espécie de negativo de suas faces externas, feito de madeira, gerando assim a contenção necessária para evitar este problema (figura 06). Após 48hs as amostras foram desmoldadas.

Após a desmoldagem, os CPs foram submetidos a um processo de cura por 21 dias em temperatura ambiente. Durante o processo foram realizadas inspeções visuais periódicas para verificar a ausência de trincas ou deformações nos corpos de prova, garantindo a integridade das amostras para os ensaios subsequentes.

## 4.4 ENSAIOS E ANÁLISES

### 4.4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os corpos de prova anteriormente descritos foram submetidos a ensaios destrutivos de compressão para avaliação da resistência mecânica. As caracterizações foram realizadas em uma prensa hidráulica universal – elétrica/digital – para ensaios de compressão. O equipamento utilizado é da marca Contenco. A velocidade empregada para o ensaio foi de 1mm/min.

A partir dos resultados, foram analisadas a média e o desvio padrão entre os conjuntos de amostras de mesma formulação. Esses dados foram representados em gráficos de barras e discutidos, relacionando-os às informações obtidas nas demais caracterizações.

### 4.4.2 FASES PRESENTES E CRISTALINIDADE

As matérias-primas sólidas, metacaulim e chamote, foram caracterizadas por difração de raios X em um difratômetro EMPYREAN PANalytical, utilizando radiação Cu-K $\alpha$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ), com varredura angular de  $5^\circ$  a  $100^\circ 2\theta$  e passo de  $0,02^\circ$ . Os difratogramas obtidos foram analisados no software HighScore Plus (versão acadêmica), empregando seus recursos padrão para identificação de fases cristalinas. As condições experimentais seguiram os parâmetros controlados de tensão e corrente do equipamento. A análise concentrou-se na identificação das fases presentes, com ênfase no quartzo e na investigação de halos amorfos, particularmente relevantes para a reatividade na ativação alcalina. A comparação entre os difratogramas de MK e CM foi realizada considerando a posição, intensidade e perfil dos picos, visando caracterizar a microestrutura dos materiais para aplicação em geopolímeros.

#### 4.4.3 ANÁLISE E TRATAMENTO DE IMAGENS

A partir de ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram obtidas imagens detalhadas de amostras de metacaulim, chamote britado (peneirado), chamote moído e de fragmento de um corpo de prova (traço F, 20%CM) rompido em ensaio de compressão. Essas análises permitiram uma investigação aprofundada da microestrutura dos materiais, fornecendo informações valiosas sobre as características da matriz geopolimérica e da morfologia, distribuição e tamanho das partículas de chamote. Para garantir a representatividade e confiabilidade do campo amostral na granulometria estimada, foram realizadas 200 medições de tamanho de partículas na ampliação de 100x. A imagem capturada foi tratada no software *ImageJ*, e os dados foram manipulados no software *Origin 2025* para gerar uma curva de distribuição granulométrica, apresentando média e desvio padrão.

A técnica de MEV foi selecionada por sua capacidade de gerar imagens de alta resolução, o que possibilitou a observação de detalhes em escalas micrométrica e submicrométrica, essenciais para a compreensão das propriedades dos materiais estudados. O microscópio de varredura utilizado foi o modelo Zeiss EVO-MA10, operando com uma tensão de 10 kV. Este equipamento pertence à Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) e está localizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LMEV). Para a caracterização, as amostras foram fixadas em um suporte (stub) utilizando fita adesiva dupla face de carbono. Em seguida, foi realizada a deposição de uma camada de ouro-paládio com espessura entre 6 e 9 nm, por meio do equipamento SC7620 Quorum Mini Sputter Coater/Glow Discharge System, garantindo a condutividade necessária para a análise.

Além do MEV, foi realizado o ensaio de espectroscopia por dispersão de energia (EDS) utilizando o detector INCA x-act da Oxford Instruments (modelo 51-ADD0048), acoplado ao microscópio Zeiss EVO-MA10. Esse ensaio permitiu mapear a dispersão dos elementos químicos de interesse (sílica, alumínio, sódio e oxigênio) nas amostras.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 COMPOSIÇÃO DO CHAMOTE E MOAGEM

A figura 07 corresponde ao chamote britado doado para o estudo. O produto ao ser seco em estufa por 3 hs, à 110°C e posteriormente peneirado (500g), apresentou 67,90% de sua massa retida na #50, 12,73% retida #100 e 19,36% passante na #100. Para as partículas mais finas o produto apresenta um aspecto arenoso. Para as mais grosseiras apresenta morfologia não uniforme, com arestas pontiagudas e bem definidas, sendo uma espécie de cacos que variam seu tamanho na distribuição granulométrica descrita.

**Figura 07** – Chamote britado utilizado.



Fonte: Autor. 2025.

Como estimativa da composição química deste material, foram utilizados dados de uma caracterização de FR-X fornecidos pela empresa doadora da matéria-prima. Os resultados desta análise estão representados na tabela 03. Esta composição apresentada foi utilizada como base para os cálculos de razão molar no capítulo 5.2 deste trabalho.

**Tabela. 03** – FR-X do chamote.

Óxidos	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Zr <sub>2</sub> O	PF
%	71,3	16,9	1,7	1,5	0,9	0,5	4,8	1,8	0,3	0,3

Fonte: Empresa fornecedora da matéria-prima.

## 5.2 RAZÕES MOLARES

Riscado *et al.* (2023) elencou caracterizações do MK Ultra HP obtidas por FR-X em diferentes trabalhos publicados entre 2019 e 2022. Esses estudos possibilitaram estipular razões molares de SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> variando de 1,34 a 1,57. Enquanto isso, na pesquisa de Pereira (2024), essa razão estava na casa de 2,16. Para o chamote, foi estipulado uma razão molar a partir de seu FR-X apresentado na tabela 03, sendo estimado em 4,21. A influência desta variação de RM afeta diretamente no tipo de geopolímero formado como descrito no capítulo 3.1, podendo resultar em três tipos distintos de poli sialato, com diferentes níveis de complexidade de microestrutura, resistência térmica e química.

De acordo com Davidovits, para que ocorra a geopolimerização, as pastas produzidas devem apresentar as razões molares (RM) dentro dos intervalos apresentados na tabela 04:

**Tabela 04** – Razões molares proposta por Davidovits para geopolimerizar.

Razão molar	Mín. (%)	Máx. (%)
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,30	4,50
Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub>	0,20	0,48
Na <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,80	1,60
H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	10,00	25,00

Fonte: Adaptado de Davidovits (1991).

Considerando o FR-X apresentado na tabela 03, foi realizado a partir deste, uma estimativa das razões molares, para cada traço, em seu respectivo teor de substituição de metacaulim por chamote. Nas Tabelas 8, 9, 10 e 11 são apresentadas as projeções realizadas. Os teores de substituição de 0% indicam as razões molares de partida, utilizando 100% MK.

Pelos traços de referência (0% CM), observa-se que nas projeções a relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ , já iniciam se fora do proposto por Davidovits (1991). As razões para  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  mantiveram-se dentro do intervalo proposto, com todos os teores de substituição apresentados nas tabelas seguintes. Para as razões  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , vale uma análise mais detalhada, pois foram obtidas reformulações dentro e fora do intervalo proposto.

As formulações a partir de 70% de substituição apresentaram atraso no tempo para atingir a densificação adequada, demorando cinco dias para adquirir a consistência necessária para desmoldagem. Conseqüentemente as amostras de 80% extrapolaram ainda mais este tempo, não sendo possível desmolda-los dentro dos 21 dias de cura estipulados para ensaio. Com isso, pelos valores estimados na tabela 05, 06, 07 e 08 encontrarem se muito acima dos ranges apresentados na tabela 04, sugere-se que o atraso de desmoldagem tenha sido principalmente influenciado pela extrapolação desses valores.

Para o traço E (tabela 05), a substituição de 20% de CH trouxe a razão  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  apenas 3,5% acima do limite superior e a adição de 30% resultou em 10,31% acima do limite proposto. A tabela 05, relaciona as razões molares do traço E, em seus respectivos teores de substituição.

**Tabela 05 – Razões Molares – traço E.**

Traço E						
Razão molar	0%	20%	30%	70%	80%	100%
$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0,30	0,30	0,31	0,31	0,32	0,32
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	4,90	5,47	5,79	7,43	7,97	9,26
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	1,47	1,66	1,77	2,32	2,51	2,95
$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	5,79	5,58	5,48	5,11	5,02	4,86

Fonte: o autor, 2025.

Para o traço F (tabela 06), a razão  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  inicial (0% de CM) apresenta-se 8,06% acima do limite superior (LS). Esse fato reforça a possibilidade de haver geopolimerização nas pastas, ainda que ocorra ultrapassagem da razão em proporções similares a esta, como no traço E para 20% de CH (3,50% acima) e 30% de CH (10,31% acima). Ainda que para este traço, as misturas com 20% e 30% de CH estejam entre 21,50% e 29,13% acima do limite superior, esses CP's apresentaram tempo de cura em conformidade com os processos convencionais.

**Tabela 06 – Razões Molares – traço F.**

Traço F						
Razão molar	0%	20%	30%	70%	80%	100%
Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub>	0,36	0,37	0,37	0,37	0,37	0,38
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,77	5,32	5,63	7,24	7,77	9,03
Na <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,73	1,94	2,07	2,69	2,90	3,39
H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	4,89	4,74	4,66	4,39	4,33	4,21

Fonte: o autor, 2025.

Para o traço I (Tabela 07), a razão  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  inicial (0% de CH) apresenta-se 17,19% abaixo do LS, o que possibilitou a permanência dentro do intervalo para as adições de 20% e 30% de CH. Visto que o tempo de cura se manteve adequado para as amostras com razão de até 2,13, fica como possibilidade de trabalhos futuros a produção de amostras que cheguem ao teor de até 60% de CH, cuja razão molar encontra-se abaixo desse valor.

**Tabela 07 – Razões Molares – traço I.**

Traço I						
Razão molar	0%	20%	30%	70%	80%	100%
Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub>	0,28	0,28	0,29	0,29	0,30	0,30
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,76	5,31	5,62	7,23	7,75	9,01
Na <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,33	1,50	1,61	2,13	2,30	2,72
H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	5,70	5,47	5,36	4,97	4,88	4,71

Fonte: o autor, 2025.

Dentre as formulações para o traço "O" apresentadas na tabela 08, a de 20% de CM apresentou apenas 2,38% acima do limite superior da razão

molar  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Para a formulação com 30% de CH, obteve-se o aumento de 9,13%. Apesar de uma margem significativa no aumento dessa razão, os resultados de tempo de cura se mantiveram em conformidade com o tempo máximo estipulado para desmoldagem (48 hs).

**Tabela 08 – Razões Molares – traço O.**

Traço O						
Razão molar	0%	20%	30%	70%	80%	100%
$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	4,61	5,15	5,54	7,02	7,53	8,77
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	1,45	1,64	1,75	2,30	2,48	2,92
$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	4,95	4,77	4,68	4,37	4,29	4,15

Fonte: o autor, 2025.

Os resultados apresentados demonstram que, embora algumas razões molares, como  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , tenham se desviado dos intervalos propostos por Davidovits, as amostras de até 70% apresentaram tempos de cura aceitáveis. Isso sugere que as formulações utilizadas, mesmo fora dos parâmetros ideais, podem ser capazes de promover uma geopolimerização eficiente.

## 5.2 ENSAIOS DE COMPRESSÃO

Como já dito anteriormente, os corpos de prova (CP's) com até 70% de substituição apresentaram consistência e densificação adequadas para ensaio de resistência à compressão após 21 dias de cura. Os CP's com 70% de substituição apresentaram um atraso na desmoldagem (cinco dias). Para os CP's com 80%CM o tempo para desmoldagem demorou ainda mais, não atingindo consistência necessária durante os 21 dias. Em vista das previsões feitas de RM, cogita-se uma possível influência negativa das razões molares de  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (2,30 a 2,90). A fabricação dos CP's de traço I com 30 e 70% ficaram pendentes neste estudo.

Os resultados da tabela 09 apresentam as médias de resistência à compressão obtidas para cada conjunto de amostras. Os valores indicam que dentre

as formulações desenvolvidas por Pereira (2024) aplicadas neste projeto, as substituições de MK pelo CM maior ou igual a 70% podem comprometer significativamente a formação da matriz geopolimérica. Entretanto, teores de substituição de até 30% apresentaram bons valores de resistência à compressão, tempo de solidificação para desmoldagem adequado, boa interface entre matriz geopolimérica e CM (quando ocorre solubilização parcial) atuando como reforço inerte na forma de microagregados, demonstrando que pode ser incorporado de forma eficiente em proporções moderadas.

**Tabela 09 – Médias de RC para cada traço e teor de subst.**

Traço	STD	20%	30%	70%
O	59,9	49,1	52,1	13,7
E	50,2	45,7	49,8	8,1
F	39,8	46,5	47,9	13,6
I	48,2	49,9	-	-

Fonte: o autor, 2025.

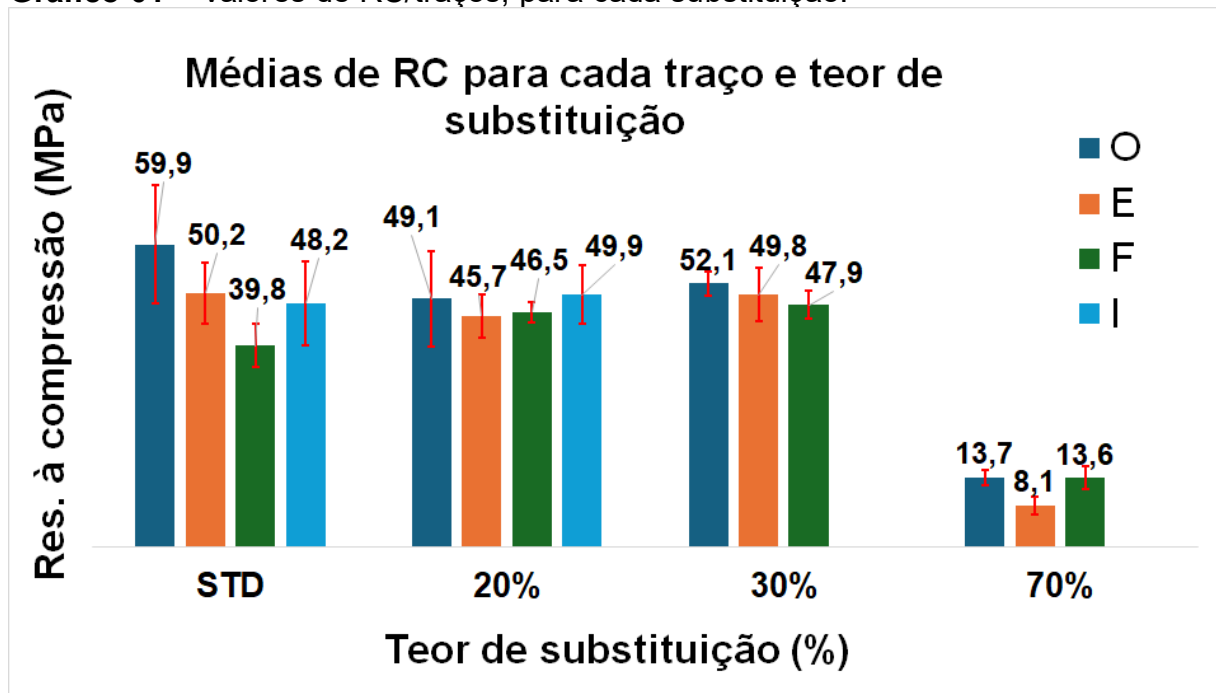
Pela tabela 09, também fica evidente que os traços I e F (20%CM) apresentaram uma média de resistência à compressão acima dos valores de referência, alcançando um valor máximo no ensaio compressivo de 56,35 MPa para o traço I, sendo este, um valor maior que todos os apresentados pelos CP's de referência neste mesmo traço. As demais formulações com 20% de substituição apresentaram médias de resistência à compressão menores que suas referências, sendo discutidas junto a seus respectivos traços nos parágrafos posteriores. Os valores na tabela destacados na cor verde representam os melhores resultados, sendo estes, próximos ou maiores que 50MPa.

As fórmulas com 30% de CM apresentaram valores promissores de resistência à compressão, com um dos CP's ensaiados alcançando valor de 54,75MPa (traço E) equiparando-se aos valores dos CP's de referência e de valores obtidos na literatura para cimentos Portland dos tipos CP-I e CP-II. Esses materiais são adequados para aplicações na construção civil, conforme estabelecido pelas normas brasileiras NBR 5732 (Portland comum) e NBR 11578 (Portland composto). Essas normas definem classes de resistência à compressão de 32, 40 e 50 MPa, dependendo da aplicação, sendo o valor máximo (50MPa) compatível/próximo dos valores apresentados na cor verde (Tabela 09) para 20 e 30% de CM.

Apesar da composição de 70% ter apresentado valores RC consideravelmente inferiores aos demais, com média de 11,77 MPa, ela demonstra potencial para estudos futuros com tempos de cura mais longos e outras aplicações como materiais poliméricos que apresentem resistência a compressão entre 10 e 20MPa (Baur; Osswald; Rudolph, 2017).

Para os corpos de prova (CP's) de referência, a análise das médias obtidas nos ensaios de compressão para cada traço resultou em uma média global de 49,53 MPa. O traço O destacou-se com a maior média, atingindo 59,87 MPa. O conjunto de CP's com 20% de CM apresentou uma redução de 3,51% na média global em comparação à referência (STD), resultando em 47,79 MPa. Para o teor de 30% de CM, considerando os três traços produzidos (O, E e F), a média global foi de 49,96 MPa. Quando analisados apenas os valores de referência (STD) desses traços, a média global foi de 49,98 MPa, sendo este valor muito próximo ao obtido para 30% de CM, indicando consistência nos resultados. Os desvios padrão mais acentuados no traço podem ter sido influenciados por falhas no processo de faceamento dos corpos de prova.

**Gráfico 01** – Valores de RC/traços, para cada substituição.



Fonte: o autor, 2025.

No gráfico 01, são apresentadas as médias de resistência à compressão para cada grupo de amostras, nos seus respectivos traços e teores de substituição. A partir desta discussão foi possível observar a influência da adição de CM.

Para o traço O foi apresentado uma perda de 18% em sua resistência à compressão para a adição de 20%, apresentando o valor máximo de 54,74MPa e valor médio de 49,09MPa. Considerando que dentre os três CP's produzidos para esta composição, tivemos dois pontos que apresentaram resistência à compressão superior a 54MPa este traço também se mostra como uma formulação em potencial de conformidade com as classes de RC para CP-I e CP-II. O terceiro CP apresentou uma RC DE 38MPa. Esta discrepância no valor pode ter ocorrido por conta de alguma não conformidade de processo, como na etapa de retífica das faces a serem comprimidas. Dito isto, é importante observar que se caso este valor de fato seja decorrente de um erro, essa formulação poderia então estar apresentando um ganho na média de resistência à compressão ainda maior.

Para o traço O com 30% de CM, a redução na resistência à compressão (RC) foi menor (12,96%) em comparação à média para 20% de CM, estabelecendo-se em 52,11 MPa. Apesar da redução, o valor mantém-se atrativo para diversas aplicações, como estruturas de concreto armado e elementos pré-moldados. Dos três CP's ensaiados, apenas um apresentou valor ligeiramente inferior a 50 MPa (49,44 MPa), enquanto os demais superaram essa marca. Essa consistência na qualidade dos resultados obtidos reforça a viabilidade do traço O para aplicações que demandam alta resistência e confiabilidade, desde que sejam mantidos os controles adequados no processo de produção, como a homogeneização da mistura e dosagens adequadas.

Para o traço E, a adição de 20% de CM resultou em uma redução de 9,02% na RC, com pico de 49,74 MPa e média de 45,70 MPa, a mais baixa para esse teor de substituição. Embora a substituição parcial do MK por CM tenha impactado a resistência, os valores ainda se mantêm dentro de faixas aceitáveis para determinadas aplicações. Dos três CP's produzidos com 30% de CM, apenas um apresentou RC nitidamente abaixo de 50 MPa, conforme detalhado. Caso essa discrepância seja confirmada como um erro e, após ajustes no processo, os resultados superem 50 MPa, o traço E poderá ser aprovado nas três classes de resistência estabelecidas pela normativa NBR 11578 para cimentos Portland

composto (CP-I e CP-II). Essa análise reforça a importância de um controle rigoroso nas etapas de produção para garantir a consistência e a qualidade dos geopolímeros. Além disso, a possibilidade de ajustes no processo abre caminho para otimizações que podem melhorar ainda mais o desempenho desse traço em estudos futuros.

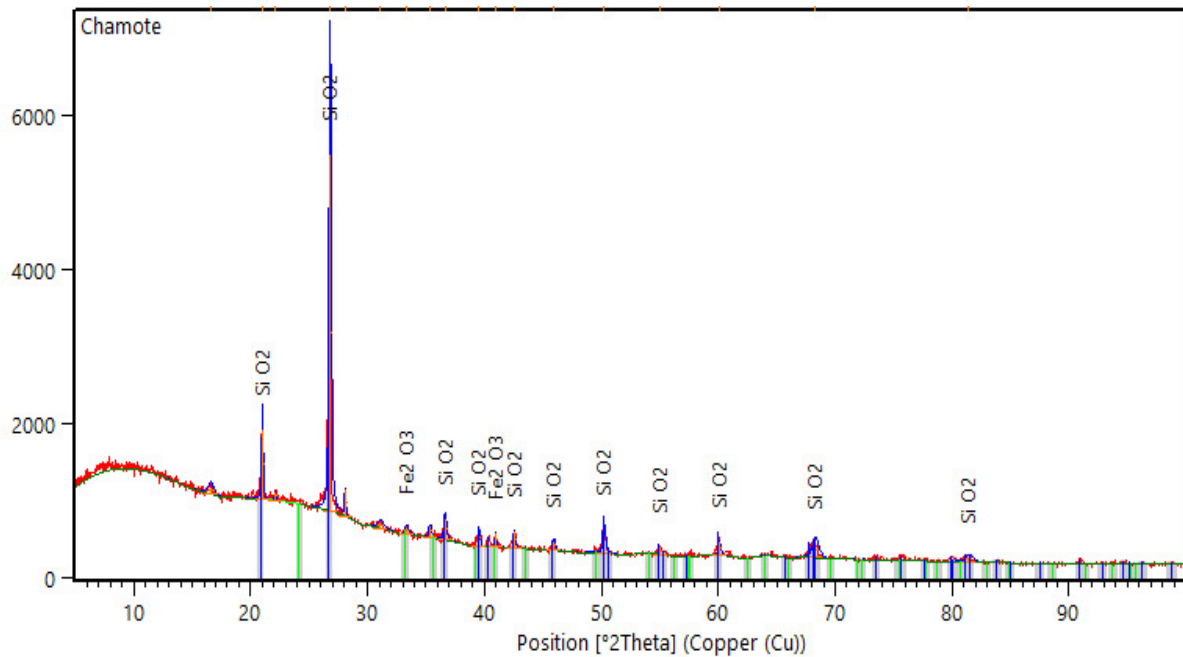
Para o traço F, foi observada uma melhoria de 16,62% na resistência à compressão com a substituição de 20% de MK por CM, atingindo valores máximos de 47,95 MPa e uma média de 46,46 MPa. Com 30% de substituição, a progressão dos resultados manteve-se consistente, registrando um acréscimo de 20,30% no valor médio de referência, que se estabeleceu em 47,93 MPa, além de apresentar um valor máximo de 50,82 MPa nos ensaios. Apesar de ser o terceiro maior valor nas médias de resistência para os quatro traços avaliados com essa proporção de CM, o traço F destacou-se por apresentar a melhor progressão de resultados com o aumento do teor de substituição.

A consistência dos resultados obtidos até o momento sugere que a adição de CM em teores moderados pode ser uma estratégia viável para otimizar as propriedades dos geopolímeros. Estudos futuros devem explorar fatores como a composição química do CM, dosagem dos ativadores alcalinos, temperatura de cura e principalmente a distribuição do tamanho de partícula. Segundo Provis e Van Deventer (2009), durante a geopolimerização, a adição de nanopartículas remove o atraso na nucleação e induz mudanças nano estruturais, como a formação de cristalitos zeolíticos e a segregação de fases de gel ao redor dos locais de nucleação.

### 5.3 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

Pelos difratogramas plotados para o chamote moído (gráfico 03) e o metacaulim (gráfico 04), foi possível evidenciar os picos de maior e menor intensidade da fase cristalina de quartzo presente. Ao compará-los, foi observado a presença destes picos em ângulos  $2\theta$  praticamente idênticos em posição e definição, sem um deslocamento notório destes picos, além de uma intensidade dos halos amorfos similar, sugerindo uma semelhança entre as MP's.

**Gráfico 03** – Difratoograma de amostra em pó – chamote moído.



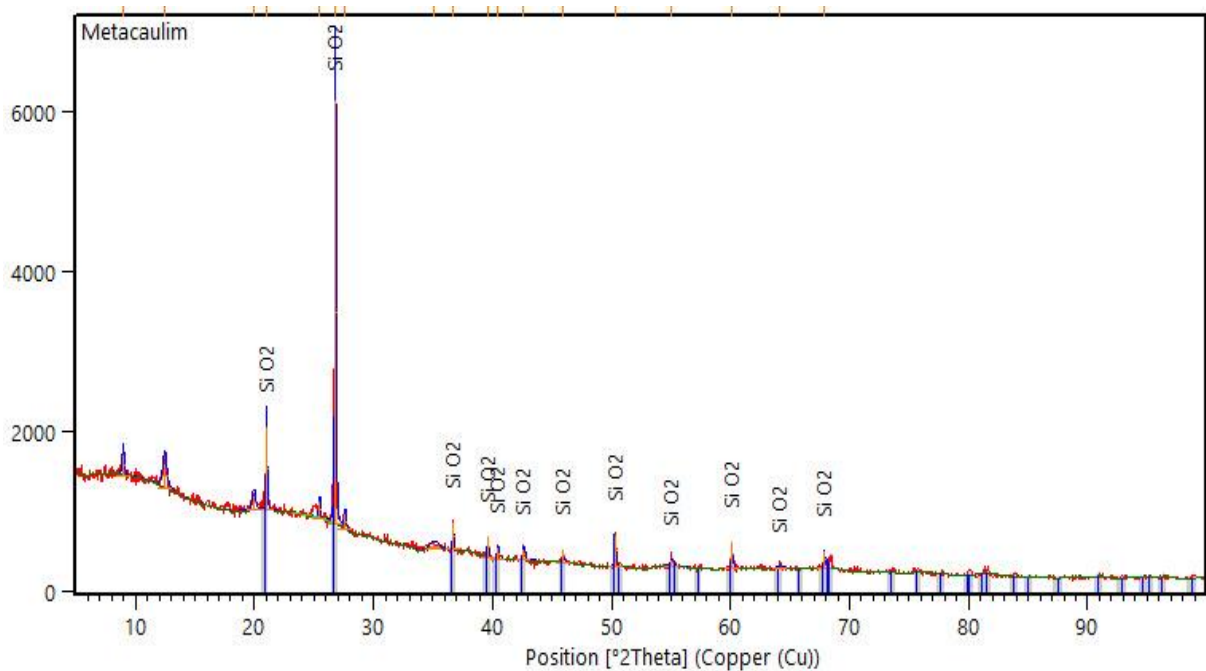
Fonte: o autor, 2025.

No gráfico 03 consta o difratograma obtido a partir da caracterização do chamote. Os picos cristalinos identificados correspondem às fases de quartzo e hematita. Além destas não foram identificadas outras fases cristalinas por meio da biblioteca utilizada. Para o chamote, apesar da presença de alumina no FR-X apresentado na Tabela 03 e de alumínio no resultado de EDS – que é o que se espera de maneira geral, da composição química de chamotes de porcelanato esmaltados – essas fases não foram identificadas. Conseqüentemente, isso pode ser decorrente de algum erro de tratamento de dados ou medição.

O gráfico 04 diz respeito ao difratograma respectivo ao metacaulim utilizado na formulação. Para esse ensaio, assim como para o chamote, foi observada a predominância da fase de quartzo, que corrobora com a caracterização (DR-X e FR-X) realizada para o metacaulim no trabalho de Pereira (2024). Para o pico situado próximo aos 13° sabe-se pelo banco de dados que diz respeito a fase de caulinita residual, onde sugere-se que está presente na matéria-prima por não ter sido transformada em metacaulinita durante seu processo de fabricação. Sendo a metacaulinita uma fase metaestável do tratamento térmico da caulinita com perda de água de cristalização deixando a estrutura distorcida. O halo apresentado no

difratograma sugere um grau de amorfismo do material. Importante ressaltar, que o mesmo ocorre no difratograma do chamote, o que também sugere um potencial para a geopolimerização assim como o metacaulim (DUXSON *et al.*, 2007).

**Gráfico 04.** Difratograma de amostra em pó MK.



Fonte: o autor, 2025.

Ambos difratogramas apresentaram pico com 100% de intensidade de quartzo próximo de 26,6°, respectivos ao plano cristalográfico 101. Além deste, também confirmou se para ambos, picos de quartzo situados em de 20,9° (plano 100); 36,5° (110); 39,5° (102); 50,1 (112), entre outros. Este fato reforça a semelhança entre as fases majoritárias de cada MP.

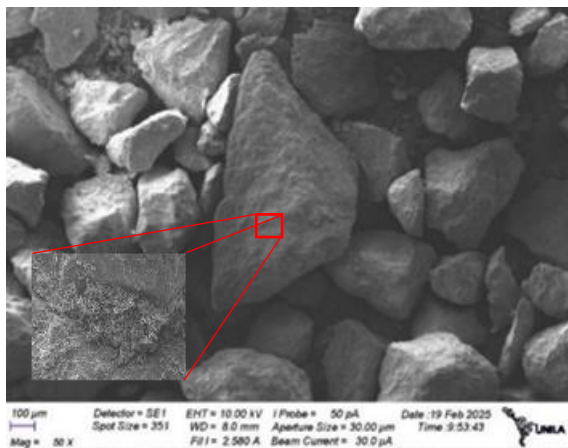
#### 5.4 MICROSCOPIA ELETRONICA DE VARREDURA (MEV)

Para os ensaios, foi possível observar a distinção entre as morfologias das matérias-primas sólidas utilizadas na fabricação dos CP's, a homogeneidade da matriz geopolimérica, o tamanho e a distribuição das partículas, e a porosidade das amostras geopolimerizadas. Além disso, foi possível comparar a combinação das misturas após o processo de geopolimerização.

A análise por MEV revelou uma distribuição heterogênea de tamanhos de partículas, com predominância de partículas na faixa de 10 a 50  $\mu\text{m}$ , o que pode influenciar diretamente as propriedades mecânicas e a trabalhabilidade das misturas.

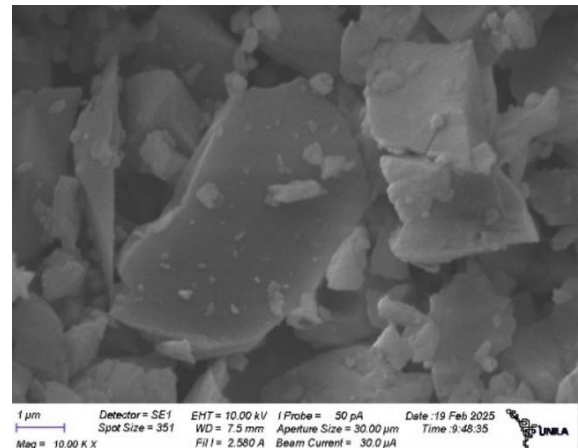
As figuras 08 e 09 dizem respeito ao chamote britado, previamente peneirado, sob diferentes ampliações. Na primeira ampliação de 50x (figura 08) revelou partículas de formato não uniforme, com baixa porosidade e uma variação considerável de tamanho. Nessa ampliação, não aparenta haver um excesso de partículas depositadas sobre a superfície nas partículas mais grosseiras (aglomeração).

**Figura 08** – Chamote britado, retido #50.



Fonte: o autor, 2025.

**Figura 09** – Ampliação de 10.000x.



Fonte: o autor, 2025.

Pelo tratamento de dados através do *image J* realizada para a figura 08, nota-se uma distribuição granulométrica relativamente simétrica, com média (314,74  $\mu\text{m}$ ) próxima à mediana (313,59  $\mu\text{m}$ ), indicando que os tamanhos das partículas estão equilibrados em torno de um valor central, sem predominância de partículas muito pequenas ou muito grandes. Isso sugere uma distribuição uniforme, com quantidades semelhantes de partículas acima e abaixo da mediana, o que favorece a homogeneidade do material.

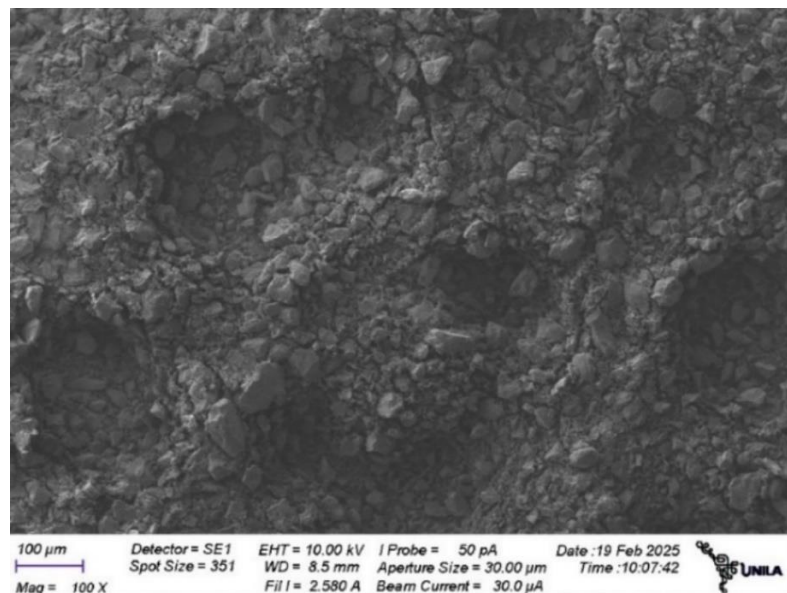
Na ampliação de 1.000x (imagem anexada no canto inferior esquerdo da figura 08), observa-se que embora não fosse evidente na ampliação de 100x, ocorre um fenômeno de aglomeração de partículas sob a superfície das partículas maiores. Esse fenômeno é mais pronunciado em regiões que apresentam concavidades e cantos vivos, contrastando com outras áreas da superfície analisada. Essa característica

sugere que, durante o processo de cominuição, partículas menores aderiram às superfícies irregulares das partículas maiores, possivelmente devido a forças eletrostáticas ou de Van der Waals (Reed, J. S. 1995).

Na ampliação de 10.000x (figura 09) evidencia-se um padrão de morfologia com arestas bem definidas, angulares com regiões pontiagudas, indicativo de uma fratura frágil. Esse padrão é consistente com o tipo de fratura que ocorre durante processos de britagem realizado. Este tipo de britagem (britador de mandíbulas) é conhecido por gerar partículas com formatos angulares, arestas afiadas e superfícies planares (Callister; Rethwisch, 2018), características estas, observadas na imagem.

Por fim a figura 09 reforça a alta densidade do material, confirmando sua baixa porosidade e, conseqüentemente, sua baixa absorção de água (característica intrínseca dos porcelanatos esmaltados). A densidade elevada e a microestrutura compacta observada sugerem que o material possui uma estrutura interna coesa, com poucos vazios ou defeitos que comprometam sua integridade. Essa característica é particularmente vantajosa para a fabricação de geopolímeros, pois a baixa porosidade contribui para uma maior resistência mecânica e estabilidade dimensional do produto. Além disso, a homogeneidade da microestrutura observada indica que o material pode ser processado de forma eficiente, garantindo propriedades consistentes e previsíveis em aplicações industriais.

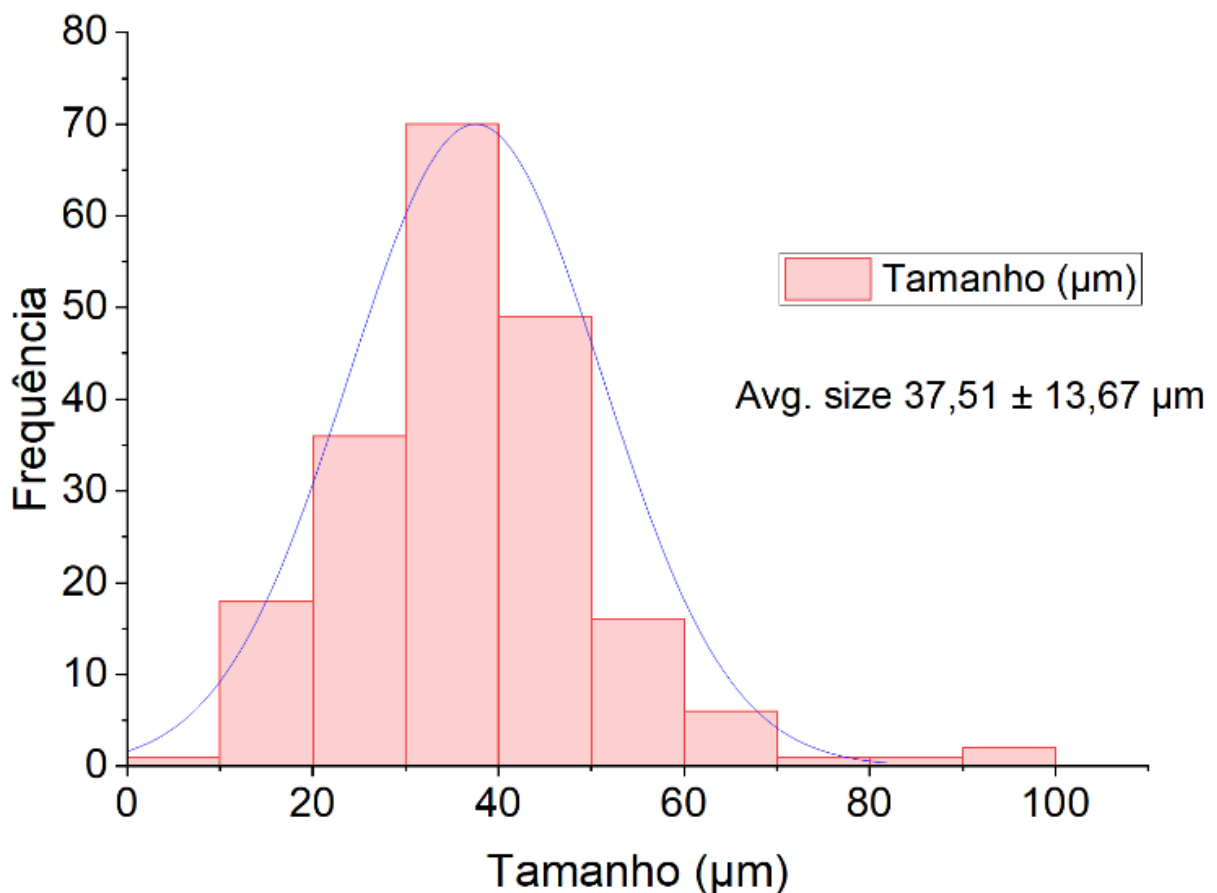
**Figura 10** – Chamote utilizado como MP.



Fonte: o autor, 2025.

Além do chamote britado, também foi caracterizado o chamote após sua moagem de 24 hs descrita na metodologia (figura 10). A análise granulométrica do chamote moído pode ser realizada a partir de 200 medidas feitas na figura 10 e tratado estatisticamente no software Origin 2025, fornecendo as informações plotadas no gráfico 05. Aliado a estas informações os dados revelaram uma distribuição de tamanhos de partículas com média de **37,51  $\mu\text{m}$**  e desvio padrão de **13,67  $\mu\text{m}$** , indicando uma variação moderada no tamanho das partículas. O tamanho mínimo foi de **5,30  $\mu\text{m}$** , enquanto o máximo atingiu **94,07  $\mu\text{m}$** , demonstrando uma ampla faixa de distribuição. A mediana de **37,06  $\mu\text{m}$**  confirma que a maioria das partículas se concentra próximo à média, sugerindo uma distribuição relativamente simétrica.

**Gráfico. 05** – Distribuição granulométrica do chamote moído

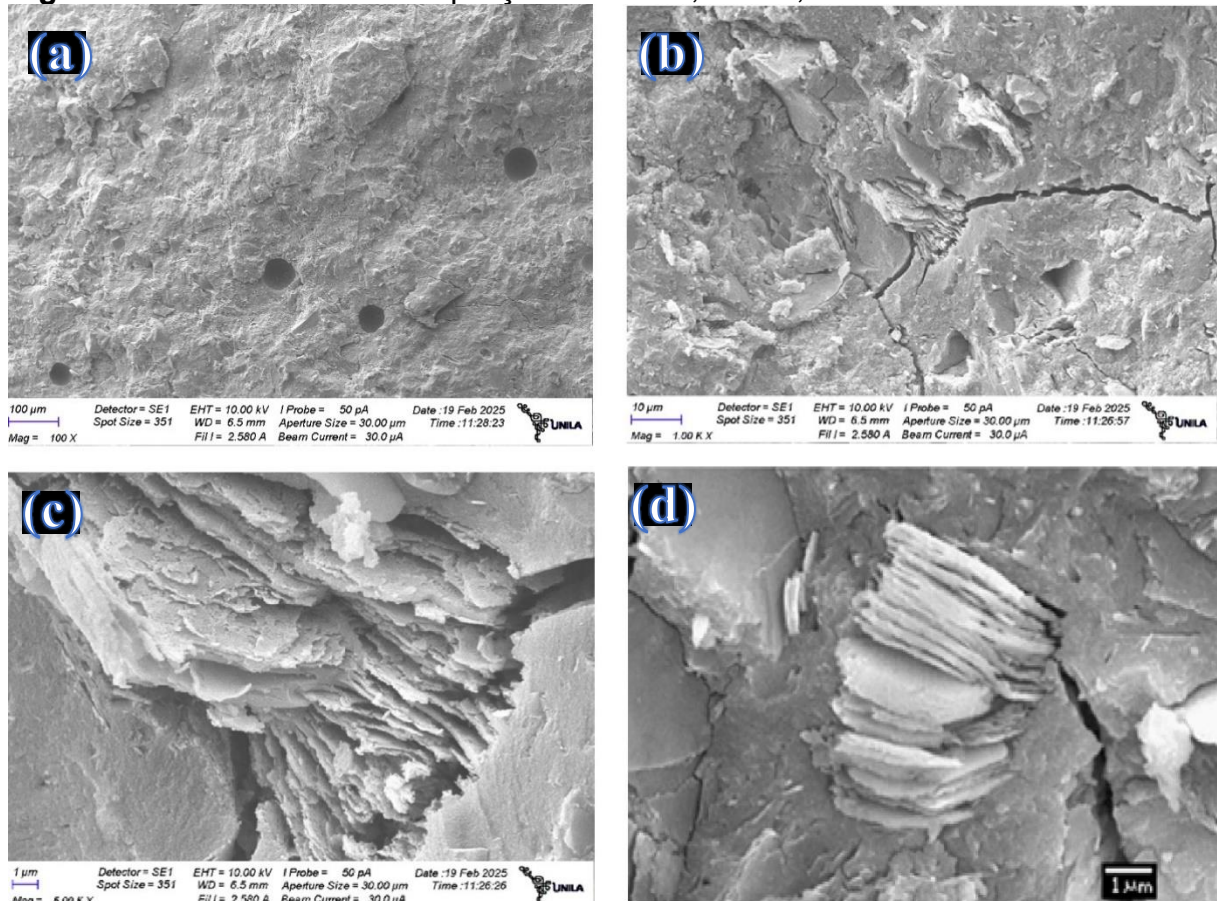


Fonte: o autor, 2025.

Pela distribuição apresentada, sugere-se que além da ativação alcalina ter ocorrido, é possível que essas partículas micrométricas atuem como reforços inertes na forma de migroagregados, resultando um número alto de pontos de ancoramento, fornecendo assim, os resultados atrativos de resistência a compressão apresentados para 20 e 30% de substituição de metacaulim por CM.

O CP geopolimerizado de traço F20%CM encontra-se na figura 11 (a,b e c). Para figura 11(a) fica evidenciado a baixa porosidade. As partículas de CM não apresentam fácil visibilidade, e com isso sugere-se que possa estar relacionado com sua boa interação no processo de geopolimerização.

**Figura 11** – CP F20%CM – ampliações de 100x, 1000x, 5.000x.



Fonte: o autor, 2025.

Além disso, a região analisada pode ter atuado como um ponto de concentração de tensão, uma vez que duas trincas são observadas propagando-se perpendicularmente à orientação das lamelas na fig 11(b). A propagação das trincas parece ter se originado a partir da falha na região lamelar. É importante investigar se a formação dessas lamelas está relacionada ao alinhamento da estrutura semicristalina na direção de tração aplicada ao material. A presença de fraturas ao longo de planos específicos, visíveis nessa ampliação, indica que o material pode sofrer ruptura frágil quando submetido a esforços de tração, conforme observado em estudos anteriores (Zhang *et al.*, 2010).

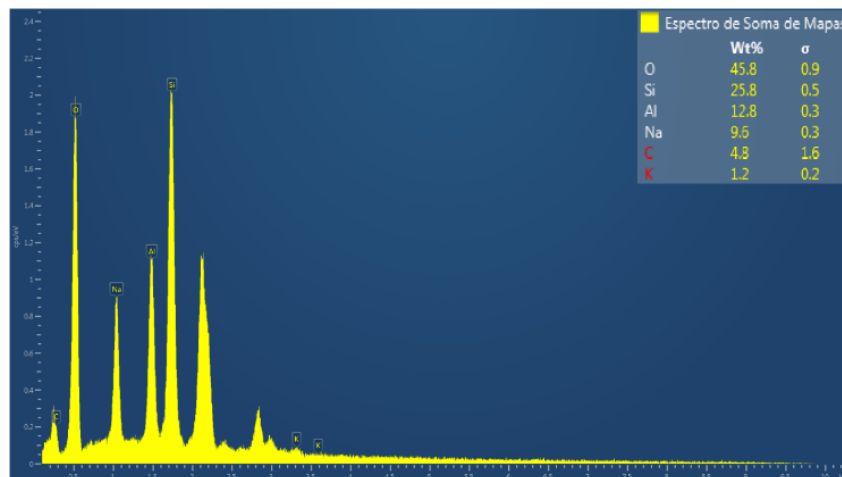
A figura 11(c) apresenta uma ampliação de 5000x, na qual é possível observar uma estrutura lamelar em parte do sólido. Essa configuração sugere que o material pode exibir comportamento anisotrópico, com propriedades mecânicas que variam dependendo da direção da aplicação de força. Essa anisotropia pode estar associada à formação de fases ordenadas, presença de planos de fratura ao longo de direções preferenciais, ou presença de fase cristalina de caulinita que não foi ativado para se tornar MK. Zhang *et al.* (2010) por meio de uma caracterização via MEV em geopolímeros, representado na figura 11(d), apresentaram amostras com a presença de uma estrutura similar a esta lamelar e sugeriu tratar-se de partículas residuais de MK formadas durante a dissolução dos compostos de Si-O- e Al-O- através de policondensação que se concentra preferencialmente nas bordas das partículas de metacaulinita, onde há uma maior energia livre de superfície e conseqüentemente favorecendo os processos de nucleação. O autor constata que as estruturas resultantes não desenvolvem uma cristalização completa e formam-se géis geopoliméricos com uma morfologia lamelar, que podem apresentar certa organização em escala molecular.

Por fim, as observações microestruturais apresentadas neste capítulo corroboram os resultados dos ensaios de RC, demonstrando que a combinação desses materiais juntamente com o processo de ativação alcalina, promoveu a formação de um geopolímero com propriedades mecânicas atrativas. A densidade da matriz, a boa adesão das interfaces da matriz geopolimerizada e as partículas de solubilização parcial (reforços inertes na forma de microagregados) são fatores-chave que justificam o desempenho excepcional do produto.

## 5.5 ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ELETRONS

Neste capítulo constam as informações produzidas a partir da análise dos ensaios de EDS dos elementos constituintes das MP's sólidas e do produto geopolimerizado. Os picos observados entre 2 e 3.5 keV estão relacionados ao ouro e ao paládio depositados sobre as superfícies para torná-las condutoras. O sinal de carbono detectado é atribuído exclusivamente à fita utilizada como suporte para deposição da amostra em pó a ser ensaiada.

**Figura 12** – Espectro EDS da amostra F20%CM.



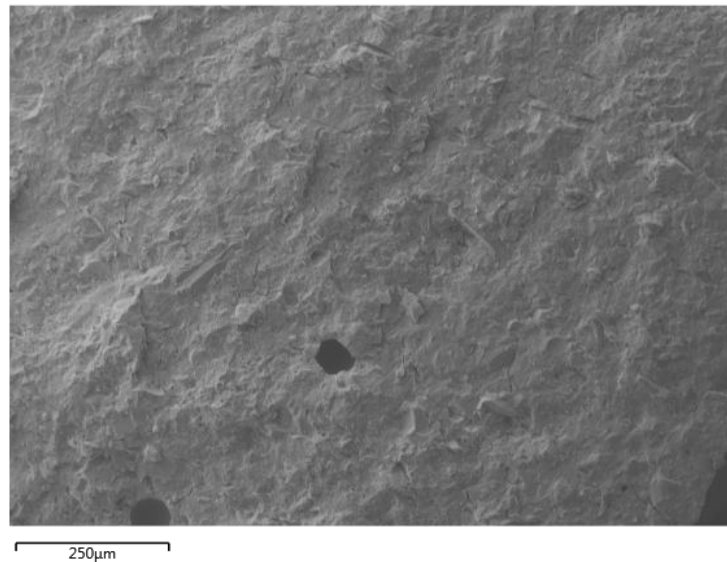
Fonte: o autor, 2025.

A análise de EDS do geopolímero de traço F20%CM, apresentada na Figura 12, revelou a presença dos elementos silício (Si), alumínio (Al), sódio (Na), potássio (K), ferro (Fe) e magnésio (Mg). O mapeamento do sódio (Na) foi novamente enfatizado, dada sua importância no processo de geopolimerização. Apesar da natureza qualitativa da análise, a presença desses elementos sugere que a formulação é viável para a produção de geopolímeros, embora ajustes nas proporções dos componentes possam ser necessários para otimizar as propriedades do material.

## 5.6 MAPEAMENTO DE ELEMENTOS QUÍMICOS

Pela da imagem utilizada para mapeamento dos elementos de interesse (figura 13) também é possível observar visualmente uma baixa porosidade. Além disso fica evidente a presença de saliências que podem ser decorrentes de concentrações de tensões geradas no momento da falha ou, de contornos definidos pelas arestas das partículas de CM que sofreram solubilização parcial e estão embebidas na matriz geopolimérica formada.

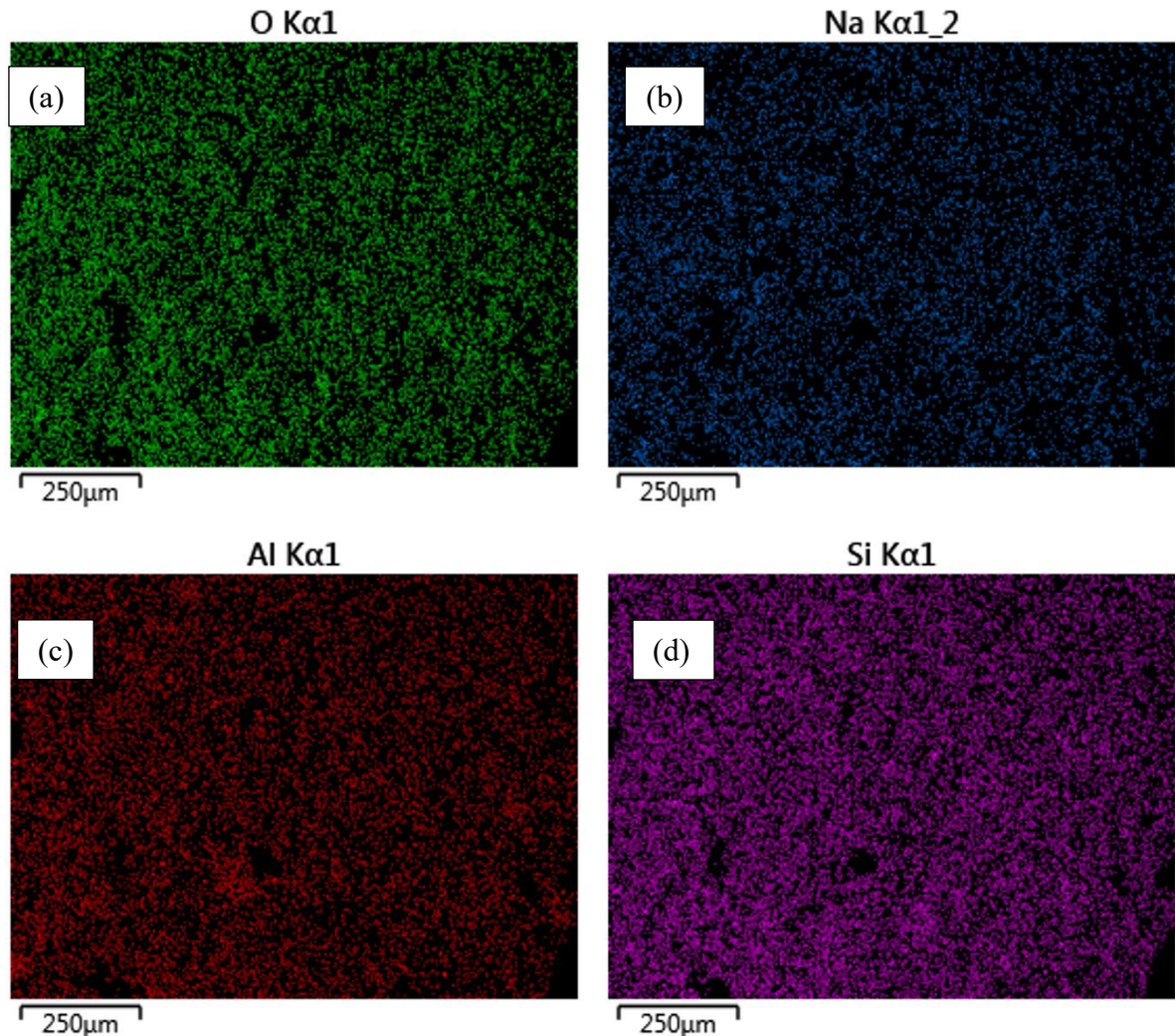
**Figura 13** – MEV para mapeamento de elementos no CP F20%CM.



Fonte: o autor, 2025.

No mapeamento realizado na figura 14 é possível observar uma elevada concentração de pontos sinalizadores dos elementos sílica, alumínio, sódio e oxigênio, elementos estes que compõem a microestrutura geopolimérica. Além disso fica evidenciado uma dispersão adequada dos elementos citados, sem a presença de regiões supersaturadas, reafirmando assim as boas práticas laboratoriais de fabricação e homogeneização da pasta estabelecidas por Pereira (2024).

**Figura 15** – Mapeamento da distribuição no CP F20%CM: (a)O, (b)Na, (c)Al, (d)Si.



Fonte: o autor, 2025.

Davidovits demonstra que o sódio exerce influência crítica nas propriedades mecânicas dos geopolímeros, onde concentrações excessivas não apenas promovem a formação de trincas através da migração iônica na microestrutura, criando zonas frágeis, como também comprometem sua integridade estrutural. Complementando esta visão, Provis e Bernal (2014) evidenciam que, em ambientes agressivos, a mobilidade dos íons de sódio intensifica processos de deterioração como a lixiviação - particularmente em contato com água ou meios ácidos - reduzindo significativamente a durabilidade da matriz geopolimérica. Esses achados conjuntos reforçam a dupla necessidade de: (1) dosagem precisa do ativador alcalino para controlar a concentração de sódio, e (2) dispersão homogênea dos íons na matriz, garantindo assim a estabilidade química e mecânica do material frente a condições adversas.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios de compressão demonstraram que a adição de 20% e 30% de chamote resultou em geopolímeros com resistências comparáveis ao cimento Portland, variando entre 40 e 50 MPa, com destaque para os traços I (56,35 MPa) e O (54,75 MPa). Esses valores evidenciam o potencial do chamote como substituto parcial do metacaulim em matrizes álcali-ativadas, contribuindo para a sustentabilidade no setor da construção civil tanto na substituição de matérias primas não renováveis, quanto na pesquisa e desenvolvimento da economia circular de um subproduto deste segmento.

A análise microestrutural por MEV revelou que as pastas geopoliméricas com chamote apresentaram uma matriz densa e homogênea, indicando a formação eficiente de uma estrutura coesa. Pelas observações sugere-se que as partículas de chamote que não foram completamente dissolvidas, aderiram bem à matriz, atuando como reforços inertes na forma de microagregados. O desgaste das arestas sugere a ocorrência da ativação alcalina e uma interação eficaz com a matriz geopolimérica.

A espectroscopia de dispersão de elétrons (EDS) complementou as informações obtidas nos ensaios de compressão e MEV, fornecendo dados sobre a composição elementar das matérias-primas e dos produtos geopoliméricos. A análise de EDS confirmou a presença de elementos como silício, alumínio, sódio e potássio, que são essenciais para a formação da estrutura geopolimérica. Além disso, os resultados de EDS demonstraram a dispersão dos elementos base (Si, Al, Na, O) na fase formada.

Em suma, a combinação dos resultados dos ensaios de compressão, MEV e EDS demonstrou que para os traços escolhidos do trabalho de Pereira (2024), existe a viabilidade da utilização do chamote como um material alternativo na produção de geopolímeros. A adição de chamote em teores adequados (20% e 30%) resultou em materiais com propriedades mecânicas promissoras e microestrutura favorável, boa adesão entre as interfaces, evidenciando o potencial dessa abordagem para a produção de materiais de construção mais sustentáveis e ecoeficientes.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

**Estudo de geopolímeros com chamote para reparo de trincas em concreto:** avaliar a aplicação desses materiais (40-50 MPa) como alternativa a reparos convencionais, testando adesão, resistência pós-reparo e durabilidade. O foco será comparar desempenho com métodos tradicionais e estabelecer protocolos para aplicação prática, considerando vantagens como cura rápida e compatibilidade com estruturas existentes.

**Análise da influência da variação da temperatura de cura nas propriedades dos geopolímeros com chamote:** investigar como a variação da temperatura de cura afeta a resistência mecânica, a microestrutura e a durabilidade dos geopolímeros com chamote, buscando otimizar o processo de cura.

**Avaliação da influência do tempo de cura nas propriedades mecânicas e microestruturais de geopolímeros com diferentes teores de chamote:** investigar como o tempo de cura afeta a resistência à compressão, a microestrutura e a durabilidade destes geopolímeros.

**Análise da viabilidade técnica e econômica da produção de geopolímeros com chamote em escala industrial:** avaliar os custos de produção, a disponibilidade de matéria-prima e a viabilidade de implementação da tecnologia em escala industrial, buscando identificar os principais desafios e oportunidades.

**Desenvolvimento de geopolímeros com chamote para aplicações específicas na construção civil:** investigar o uso de geopolímeros com chamote em diferentes aplicações na construção civil, como pavimentação, revestimentos e estruturas pré-moldadas, buscando otimizar a formulação e o processo de produção para cada aplicação específica.

**Avaliação do impacto ambiental da produção de geopolímeros com chamote:** comparar o impacto ambiental da produção de geopolímeros com chamote com o impacto da produção de cimento Portland, considerando o consumo de energia, a emissão de gases de efeito estufa e a geração de resíduos.

**Estudo da influência da granulometria do chamote nas propriedades dos geopolímeros:** investigar como a granulometria do chamote afeta a reatividade, a microestrutura e as propriedades mecânicas dos geopolímeros, buscando otimizar a granulometria do chamote para obter o melhor desempenho do material.

## REFERÊNCIAS

ANDREW, R. M. Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production. **Earth System Science Data**, v. 10, n. 1, p. 215 - 217, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>.

ANFACER - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES. Números do Setor Cerâmico. São Paulo. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/numeros-do-setor>. Acesso em: 24 mar. 2025.

ANICER - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. Dados do Setor. Rio de Janeiro. 2023. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/>. Acesso em: 24 mar. 2025.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 37, p. 1633-1656, 1991. Disponível em: [10.1007/BF01912193](https://doi.org/10.1007/BF01912193).

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry and Applications**. 3<sup>a</sup> ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2008.

GARCEZ, L. R. N. Cerâmica. Indaial: Grupo UNIASSELVI, 2011. Disponível em: <https://www.uniassevi.com.br/extranet/layout/request/trilha/materiais/livro/livro.php?codigo=8833>.

GOUVEIA, F. P. **Efeito da Incorporação de chamote (resíduo cerâmico queimado) em massas cerâmicas para a fabricação de blocos de vedação para o Distrito Federal-DF**. Um estudo experimental. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, 2008. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/33529417.pdf>.

GOUVEIA, F. P. *et al.* Incorporação de chamote em massa cerâmica para a produção de blocos. Um estudo das propriedades físico-mecânicas. *Cerâmica*, São Paulo, v. 55, n. 336, p. 415-419, 2009. Disponível em <https://www.scielo.br/j/ce/a/D3GJq3Bc6Y39c9CrmsSxWDJ/?format=pdf&lang=pt>.

LEDUR, N. **Síntese de geopolímeros a partir de resíduos industriais: uma abordagem sustentável utilizando rejeitos de ETA e de corte de rochas ornamentais**. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Foz do Iguaçu, 2024. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/8747>.

MELO, M. M. *et al.* Análise microestrutural de misturas cerâmicas de grês porcelanato com adição de chamote de telhas cerâmicas. *Cerâmica*, São Paulo, v. 55, n. 336, p. 356-364, 2009. Disponível em <https://www.scielo.br/j/ce/a/zsySvJQdZj5wwYB9KD8C6DF/?format=pdf&lang=pt>.

MENDES, B. C. *et al.* Evaluation of eco-efficient geopolymer using chamotte and waste glass-based alkaline solutions. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, jun. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521003624?via%3Dihub>.

Metacaulim do Brasil Ltda. **Metacaulim HP Ultra**, 2025. Disponível em: <http://metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>. Acesso em: 10 fev. 2025.

MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. **Nature Materials**, v. 16, n. 7, p. 698-699, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nmat4930>.

NEVES, K. P. L.; MELO FILHO, J. de A.. Produção de metacaulinita a partir de caulim da região de Presidente Figueiredo, AM. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA (CONTECC), 2018, Brasília. **Anais...** Brasília: CONFEA, 2018. Disponível em: [https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/166\\_pdma\\_pdcdrdpfa.pdf](https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/166_pdma_pdcdrdpfa.pdf).

PEREIRA, S. L. D. **Desenvolvimento de geopolímeros à base de metacaulim e biocarvão da casca de arroz para captura de CO<sub>2</sub>**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Latino Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Foz do Iguaçu, 2024. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/8695>.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 40-48, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and related alkali-activated materials. **Annual Review of Materials Research**, v. 44, p. 299-327, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009.

QUARTH, T. S. *et al.* Adição de Chamote à Massa de Porcelanato Técnico. **Cerâmica Industrial**, Criciúma, v. 18, n. 4, p. 26-29, jul./ago. 2013. Disponível em <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657527f8c9d6e028b47eb/pdf/ci-18-4-587657527f8c9d6e028b47eb.pdf>.

QUEIROZ NETO, M. L., et al. Geração de Resíduo Sólido Proveniente Sólido Proveniente de Resíduo Sólido Proveniente da Fabricação de Cerâmica Vermelha: Caso de Indústria Cerâmica na Região de Assú/RN. In: Congresso Brasileiro de

Gestão Ambiental. 7. 2016. Campina Grande. **Anais Eletrônicos [...]** Campina Grande: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2016. p. 1-5. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2016/II-011.pdf>.

REED, J. S. **Principles of Ceramics Processing**. 2. ed. New York: Wiley, 1995.

RIPOLI FILHO, F. A. Utilização do Rejeito Industrial Cerâmico - Chamote - como Fator de Qualidade na Fabricação de Elementos Cerâmicos: um Estudo Experimental. **Cerâmica**, São Paulo, v. 43, n. 281-282, p. 132-138, ago. 1997. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/jYcRbNGdNtmNGv5TDrb3Scs/?lang=pt>.

RISCADO, A. L. L. M *et al.* COMPARAÇÃO DE DIFERENTES PRECURSORES UTILIZADOS EM GEOPOLÍMEROS, p. 749-760. In: **76º Congresso Anual da ABM Internacional**, 2023, São Paulo. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5151/2594-5327-39425>.

SANTOS, D. S. C. dos; MESQUITA, R. C.; SAMPAIO FILHO, J. C. Desempenho dos ativadores alcalinos para produção de geopolímeros com solo laterítico em São Luís – MA. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 12, n. 3, out. 2020. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/15115>.

SINGH, B. *et al.* Geopolymer concrete: A review of some recent developments. **Construction and Building Materials**, v. 85, p. 78-90, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>.

VELASCO, D. C. R. *et al.* Incorporação de resíduos em revestimentos de tubulações industriais. In: ANAIS DO XIII CONGRESSO FLUMINENSE DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA / VI CONGRESSO FLUMINENSE DE PÓS-GRADUAÇÃO, 2021, Campos dos Goytacazes. **Anais eletrônicos...**, Galoá, 2021. Disponível em: <https://proceedings.science/confict-conpg/confict-conpg-2021/trabalhos/incorporacao-de-residuos-em-revestimentos-de-tubulacoes-industriais?lang=pt-br>.

ZHANG, Z.; YAO, X.; ZHU, H. Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete: II. Microstructure and anticorrosion mechanism. **Applied Clay Science**, v.49, p. 7-12, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.04.024>.