

ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO DO POLIMENTO E RETÍFICA DE PORCELANATOS COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A FABRICAÇÃO DE CLÍNQUER

Lara Teixeira de Oliveira¹
Marcelo Dal Bó²
Anderson Augusto Muller³

Resumo: Este trabalho estudou a incorporação de resíduos provenientes do polimento e da retífica de porcelanatos como matéria-prima alternativa na produção de clínquer com viés autossustentável. O clínquer é o componente principal do cimento, sendo responsável por até 100% da sua composição. Para isso, o resíduo de polimento e retífica de porcelanatos foi coletado em uma empresa fabricante do sul de Santa Catarina. As demais matérias-primas necessárias foram disponibilizadas por um colorifício da mesma região. As composições dos clínqueres foram definidas a partir da análise química das matérias-primas via Fluorescência de Raios-X e simuladas no software Microsoft Excel com auxílio da ferramenta Solver, visando otimizar a formação das fases alita (C₃S) e belita (C₂S). O processo de clínquerização ocorreu em forno de fusão a 1500 °C, com um patamar de 30 min nesta temperatura. As análises mineralógicas confirmaram a formação de alita (30–39%) e belita (25–32%), enquanto os ensaios de resistência mecânica à compressão das argamassas contendo até 5% de resíduo apresentaram resultados próximos aos da argamassa de referência produzida com cimento comercial CP II E-32. As análises microestruturais, realizadas por microscopia eletrônica de varredura, evidenciaram a presença das fases cristalinas desejáveis, como a alita e a belita. Por outro lado, em formulações com maior percentual de resíduo (20%), verificou-se a formação excessiva de portlandita, fase mineral que não contribui para o aumento da resistência mecânica. Os resultados indicam que o resíduo do polimento e retífica de porcelanatos apresenta potencial de aplicação na fabricação de clínquer, desde que utilizado em teores controlados, configurando-se como alternativa técnica, econômica e ambientalmente viável para o aproveitamento de um passivo industrial significativo.

Palavras-chave: resíduo de porcelanato; clínquer; sustentabilidade.

Abstract: This study investigated the incorporation of waste generated from the polishing and grinding of porcelain tiles as an alternative raw material for the production of clinker with a self-sustainable approach. Clinker is the main component of cement and can account for up to 100% of its composition. For this purpose, the polishing and grinding waste was collected from a manufacturing company located in southern Santa Catarina, Brazil. The remaining raw materials were supplied by a local ceramic color manufacturer. The clinker compositions were defined based on the chemical analysis of the raw materials obtained by X-ray fluorescence and were simulated in Microsoft Excel using the Solver tool, aiming to optimize the formation of the alite (C₃S) and

¹ Discente do curso de Graduação em Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).
E-mail: lara.do@aluno.ifsc.edu.br.

² Docente do curso de Graduação em Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).
E-mail: marcelo.dalbo@ifsc.edu.br.

³ Docente do curso de Graduação em Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).
E-mail: anderson.muller@ifsc.edu.br.

belite (C_2S) phases. The clinkerization process was carried out in a fusion furnace at 1500 °C, with a 30-minute holding time at this temperature. Mineralogical analyses confirmed the formation of alite (30–39 wt.%) and belite (25–32 wt.%), while the compressive strength tests of mortars containing up to 5% waste showed results comparable to those of the reference mortar produced with CP II E-32 commercial cement. Microstructural analyses conducted by scanning electron microscopy revealed the presence of the desired crystalline phases, such as alite and belite. On the other hand, formulations containing higher waste contents (20%) exhibited excessive formation of portlandite, a mineral phase that does not contribute to mechanical strength development. The results indicate that polishing and grinding waste from porcelain tiles has potential for application in clinker manufacture, provided it is used in controlled amounts, representing a technically, economically, and environmentally viable alternative for the valorization of a significant industrial by-product.

Keywords: waste; clinker; sustainability.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil consolidou-se como um dos grandes produtores mundiais de revestimentos cerâmicos, ocupando atualmente o terceiro lugar em produção e consumo (ANFACER, 2025). Esse destaque reflete-se no expressivo volume de resíduos gerados ao longo da cadeia produtiva. Somente em 2024, a produção nacional de porcelanatos alcançou aproximadamente 190 milhões de m² (Ceramics of Brazil, 2024), o que evidencia a relevância e o ritmo acelerado dessa indústria no cenário nacional. Contudo, esse crescimento, embora positivo do ponto de vista econômico, traz consigo desafios relacionados à sustentabilidade dos processos industriais.

Um dos pontos críticos é a etapa de retífica das bordas e polimento da superfície dos porcelanatos, essenciais para garantir acabamento e dimensões adequadas do produto. De acordo com a empresa “A”, localizada em Criciúma/SC, são geradas cerca de 9.600 toneladas desse tipo de resíduo por ano, o que demonstra a magnitude do problema em escala local. Em âmbito internacional, os impactos ambientais tornam-se ainda mais expressivos: segundo Zhao, Yao e Zhao (2024), a geração de resíduos provenientes do polimento de porcelanatos na China pode ultrapassar 4 milhões de toneladas anuais, reforçando a necessidade de práticas eficazes para a gestão adequada desses resíduos.

Além da preocupação ambiental, o descarte representa um ônus significativo para as indústrias cerâmicas. Classificados como resíduos Classe 2 pela NBR 100042 (ABNT, 2024), seu transporte e disposição final exigem infraestrutura adequada e licenciamento ambiental, elevando os custos operacionais. Esse cenário impulsiona a busca por alternativas que reduzam não apenas o volume de resíduos gerados, mas também os gastos relacionados à sua destinação correta, tornando o reaproveitamento uma solução economicamente atrativa.

Embora já existam pesquisas que investigam a incorporação do resíduo de polimento em argamassas (Fortunato *et al.*, 2023; Breitenbach *et al.*, 2017) e sua reinserção no próprio processo cerâmico (Rambaldi *et al.*, 2007; Ke *et al.*, 2016), há uma lacuna significativa quanto à sua aplicação na formulação do clínquer, principal componente do cimento. Estudos ainda são limitados sobre o uso desses resíduos na fabricação de materiais à base de cimento (Andreola *et al.*, 2010; Pelisser *et al.*, 2012),

o que dificulta o avanço de soluções sustentáveis e tecnicamente viáveis.

Entre os materiais com potencial de reaproveitamento, destaca-se o resíduo de polimento e retífica de porcelanato (RPP), que apresenta elevada finura e composição química rica em óxidos essenciais à formação das fases minerais do clínquer, como sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Essas características conferem compatibilidade física e química com matérias-primas tradicionalmente utilizadas na produção de cimento, como as argilas (forte fonte de sílica e alumina). Devido a essa similaridade, o RPP apresenta potencial para ser empregado como substituto parcial de recursos naturais para a produção do clínquer. Reduzindo, dessa forma, a extração de argila e, conseqüentemente, o consumo de recursos naturais não renováveis. Essa utilização está em consonância com os princípios da economia circular, que busca não apenas reduzir o descarte em aterros, mas também oferecer soluções que minimizem a extração de recursos não renováveis (ABDALLA; SAMPAIO, 2018). Assim, além de contribuir para o uso mais eficiente de recursos, a incorporação desse resíduo auxilia na redução de custos e no fortalecimento de práticas sustentáveis na indústria.

Diante desse cenário, este estudo se justifica pela relevância técnica, ambiental e econômica de estudar a influência da substituição de matérias-primas naturais pelo RPP na fabricação de clínquer. Isso contribui para o avanço da sustentabilidade na construção civil e para a inovação nos processos industriais. Nesse contexto, o objetivo geral da pesquisa é estudar a viabilidade da incorporação do resíduo do polimento e retífica de porcelanatos na fabricação de clínquer. Para tanto, os objetivos específicos consistem em: promover um destino adequado para esse resíduo industrial; avaliar a resistência mecânica à compressão de corpos de prova de argamassa produzidos com clínqueres contendo diferentes adições de resíduo (0%, 5%, 10%, 15% e 20%); analisar suas estruturas cristalinas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV); e identificar as proporções ideais de resíduo que viabilizem a produção de um clínquer com desempenho técnico satisfatório.

1.1 Produção de porcelanatos

O porcelanato é um tipo de revestimento cerâmico amplamente utilizado em pisos e paredes devido à sua resistência, durabilidade e acabamento estético. Ele é produzido a partir de uma mistura de argilas e outras matérias-primas inorgânicas,

sendo submetido a um processo industrial que resulta em um material com baixa absorção de água, no máximo 0,5% em massa, conforme estabelece a norma ISO 13006 (2020).

De acordo com Steiner (2014), o processo de produção do porcelanato é composto por diversas etapas, que incluem:

- Extração das matérias-primas;
- Armazenamento e secagem dos materiais;
- Mistura dos componentes;
- Secagem da massa;
- Silagem (armazenamento temporário em silos);
- Conformação, decoração e queima das placas;
- Polimento e retífica (ajuste das dimensões e acabamento);
- Classificação do produto final;
- Estocagem.

Esse conjunto de etapas, quando realizado com controle técnico e uso de tecnologias apropriadas, assegura que o porcelanato atenda aos padrões de desempenho exigidos pelo mercado consumidor.

1.2 Polimento e retífica dos porcelanatos

Uma das etapas do processo de fabricação do porcelanato, e que constitui o foco deste trabalho, é o polimento e a retífica do material. O polimento tem como objetivo conferir um acabamento mais liso e brilhante à superfície da placa cerâmica. Já a retífica é realizada para corrigir dimensões e esquadros das peças, garantindo maior precisão e regularidade. Esses efeitos são alcançados por meio de um processo de abrasão, no qual um material de alta dureza entra em atrito com a superfície do porcelanato, desgastando-a de forma controlada (Soares Filho *et al.*, 2020).

Esse processo é realizado por um equipamento composto por várias unidades polidoras, cada uma contendo materiais abrasivos, geralmente à base de magnésio, carbeto de silício e/ou diamante industrial. As partículas abrasivas são organizadas em diferentes níveis de granulação, que vão ficando progressivamente mais finas ao longo do processo. Em alta rotação, essas unidades entram em contato com a superfície da peça, removendo uma fina camada, cerca de 1 mm de espessura, até

atingir o acabamento desejado (Matos, 2019).

O polimento e a retificação do porcelanato são divididos em vários estágios e etapas (Pedrassani, 2002):

- Aplanamento e Calibragem: têm como finalidade padronizar a planaridade e a espessura das placas cerâmicas;
- Polimento: proporciona à superfície da placa um acabamento com brilho intenso, semelhante ao de um espelho;
- Levigadura: confere uma textura fosca à superfície da placa, resultando em um acabamento sem brilho;
- Esquadrejamento: garante que as peças estejam com os lados paralelos e os ângulos retos bem definidos;
- Biselamento: realiza o desbaste em ângulo de 45° nas bordas superiores das placas;
- Lappatura: aplica à superfície da cerâmica um aspecto de desgaste natural, simulando o envelhecimento do material.

Durante esse processo de polimento e retificação das placas cerâmicas do porcelanato, é essencial o uso de água com baixo teor de sólidos. Isso porque a água ajuda a reduzir o atrito entre os abrasivos e a peça, resfria a área de contato e remove os resíduos que poderiam arranhar a superfície (Steiner, 2014).

1.3 Porcelanato técnico e esmaltado

O porcelanato pode ser classificado em dois tipos principais: porcelanato técnico (PT) e porcelanato esmaltado (PE). O porcelanato técnico é formado exclusivamente pela massa cerâmica, sem aplicação de camadas superficiais, o que resulta em um produto com uma coloração homogênea e um aspecto visual mais natural. Por outro lado, o porcelanato esmaltado passa por etapas adicionais de produção, recebendo camadas de engobe, esmalte ou esmaltobe (mistura de esmalte com engobe), além da possível aplicação de pigmentos por impressão digital, possibilitando uma ampla variedade de cores, texturas e acabamentos (Schmitt, 2019).

Essa diferenciação é particularmente importante no contexto do processo de polimento, pois nesse processo apenas uma fina camada superficial (cerca de 1 mm)

é removida da peça. No caso do porcelanato técnico, os resíduos gerados correspondem diretamente à composição da massa cerâmica. Já no porcelanato esmaltado, os resíduos removidos são provenientes principalmente das camadas de engobe e esmalte (vidrados), o que confere a esses materiais composições químicas completamente distintas. Essa diferença impacta diretamente no comportamento e no reaproveitamento desses resíduos em outros processos industriais.

1.4 Caracterização do resíduo de polimento e retífica

Os resíduos gerados durante o processo de polimento de porcelanatos técnicos possuem composição química semelhante à da massa cerâmica original e das partículas desprendidas da ferramenta abrasiva (Steiner, 2014). A Tabela 1 apresenta a composição química do resíduo proveniente do polimento de porcelanatos.

Tabela 1: Composição química do resíduo (% em massa).

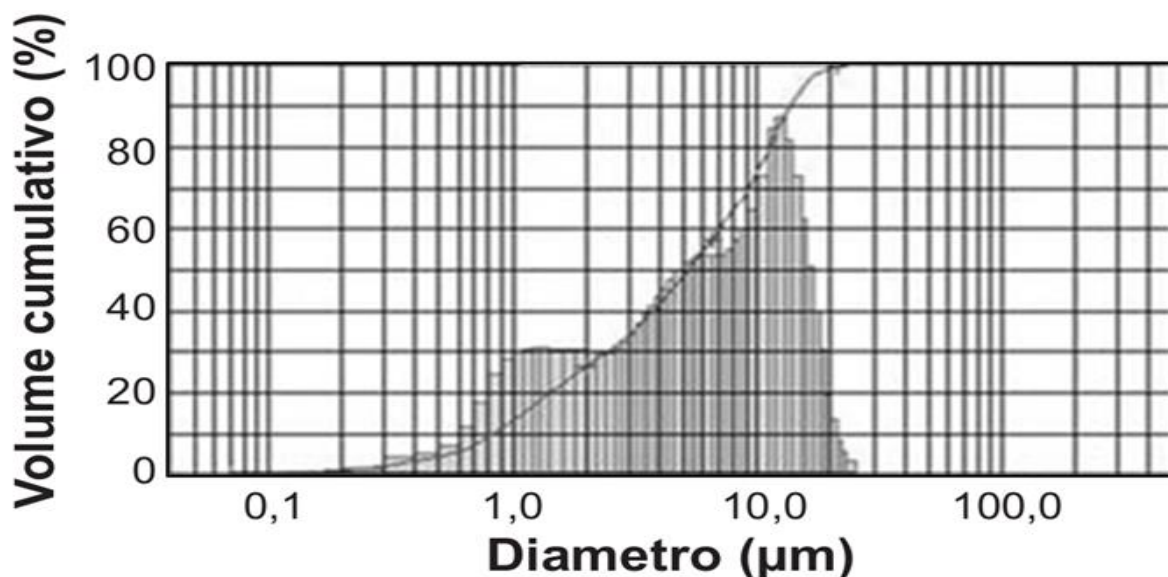
Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Outros
Quantidade	64,0	21,7	5,4	2,6	2,0	1,8	1,0	0,5

Fonte: Breitenbach *et al.*, (2017).

A partir da Tabela 1, percebe-se que o resíduo contém uma grande quantidade de sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e óxidos de elementos metálicos alcalinos e alcalinos terrosos. Essa composição é parecida com a das argilas usadas para fazer o porcelanato. Os resultados mostrados na Tabela 1 foram obtidos por uma técnica chamada Fluorescência de Raios-X (FRX), que mostra os componentes do material em forma de óxidos (Breitenbach *et al.*, 2017).

Segundo os dados apresentados por Breitenbach *et al.* (2017), o tamanho das partículas dos resíduos utilizados variaram de 1 a 44 µm, com tamanho médio de 5,93 µm. Os valores de D₁₀, D₅₀ e D₉₀ foram 1,27 µm, 5,44 µm e 11,27 µm, respectivamente. Esses resultados confirmam que o resíduo é um material considerado fino, o que favorece seu uso como matéria-prima na produção de materiais cimentícios devido a sua alta área superficial e conseqüentemente, alta reatividade. A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica do material.

Figura 1: Granulometria do resíduo.



Fonte: Breitenbach *et al.*, (2017)

1.5 Produção de clínquer

O clínquer é o principal componente do cimento, podendo representar de 25% a 100% da sua composição, conforme estabelece a NBR 16697 (ABNT, 2018). Para sua fabricação, utilizam-se principalmente calcário e argila, além de minério de ferro, areia e bauxita (Santos *et al.*, 2021). O processo de produção do clínquer envolve as seguintes etapas:

- Extração das matérias-primas (como calcário e argila)
- Moagem e homogeneização dos materiais;
- Queima da mistura em fornos (clínquerização);
- Resfriamento do material formado;
- Moagem final do clínquer.

As matérias-primas principais (calcário e argila) são extraídas diretamente da natureza, e por isso, as indústrias cimenteiras costumam se instalar próximas às jazidas, visando reduzir custos logísticos e facilitar o abastecimento. Após a extração, os materiais passam por uma preparação inicial, sendo dosados, misturados e moídos até formar um pó fino e uniforme, conhecido como farinha ou cru (Santos *et al.*, 2021).

Entre os principais métodos utilizados para a dosagem do clínquer estão: o diagrama de fases ternário, os módulos químicos e o método de Bogue. Este último,

desenvolvido por Bogue, é amplamente utilizado por estimar o percentual das principais fases mineralógicas do clínquer com base em análises químicas expressas na forma de óxidos. O método utiliza equações para calcular as quantidades teóricas de C3S (silicato tricálcico ou alita), C2S (silicato dicálcico ou belita), C3A (aluminato tricálcico) e C4AF (ferroaluminato tetracálcico), considerando as proporções dos óxidos presentes na mistura (Mariani, 2018). As equações de Bogue estão expostas a seguir (Santos *et al.*, 2021):

$$C3S = 4,071.CaO - 7,602.SiO_2 - 6,719.Al_2O_3 - 1,430.Fe_2O_3 \quad (\text{Equação 1})$$

$$C2S = 2,868.SiO_2 - 0,754.C3S \quad (\text{Equação 2})$$

$$C3A = 2,650.Al_2O_3 - 1,692.Fe_2O_3 \quad (\text{Equação 3})$$

$$C4AF = 3,043.Fe_2O_3 \quad (\text{Equação 4})$$

As equações de Bogue quantificam a formação das fases cristalinas do clínquer com base na reação entre os quatro principais óxidos da farinha: CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ e SiO₂. Assumindo condições ideais de queima, com temperatura de 2000 °C e reações completas, o que nem sempre ocorre na prática. Mesmo com essas limitações, é muito utilizado por ser simples e depender apenas da composição química obtida por FRX (Winter, apud Santos *et al.*, 2021).

Após a extração e dosagem, as matérias-primas são misturadas e homogeneizadas de forma precisa. Em seguida, essa mistura, conhecida como farinha, é moída em moinhos de bolas ou de rolos verticais até atingir uma granulação fina. A finura da farinha é um fator crucial, pois quanto mais finas forem as partículas, maior será sua reatividade durante o processo de queima (Santos *et al.*, 2021).

Com a farinha devidamente preparada, o material segue para o forno onde finalmente ocorrerá o processo de clínquerização. É nesse momento que os constituintes principais da farinha (CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ e SiO₃) formam as fases cristalinas do clínquer: C3S, C2S, C3A, C4AF (Maringolo, 2001). Após atingir a temperatura ideal de 1450°C e posterior resfriamento brusco, o clínquer é obtido (Mariani, 2018).

1.6 Fases do Clínquer

A seguir, são apresentadas as principais fases minerais do clínquer.

1.6.1 Silicato Tricálcico (C3S)

O Silicato Tricálcico, também chamado de Alita (C3S), é um dos principais componentes do clínquer, representando de 40% a 70% em massa na sua composição. Ele é o responsável pelo endurecimento e pela resistência mecânica do cimento nos primeiros dias e pode aparecer em diferentes formas (polimorfos), com pouca variação na estrutura cristalina (Mariani, 2018; Santos *et al.*, 2021).

1.6.2 Silicato Dicálcico (C2S)

O Silicato Dicálcico, conhecido como Belita (C2S), representa entre 5% e 30% da massa no clínquer, segundo De la Torre (Apud Santos *et al.*, 2021). Ele contribui para o ganho de resistência mecânica do cimento em idades mais avançadas.

1.6.3 Aluminato Tricálcico (C3A)

O Aluminato Tricálcico (C3A) corresponde a cerca de 5% a 10% em massa das fases cristalinas do clínquer e é o componente mais reativo. Ele influencia diretamente o tempo de pega do cimento e suas propriedades reológicas, como a trabalhabilidade da pasta (Santos *et al.*, 2021).

1.6.4 Ferroaluminato Tetracálcico (C4AF)

O Ferroaluminato Tetracálcico, também chamado de brownmillerita, compõe de 10% a 12% do clínquer. Apesar de ter baixa reatividade hidráulica, ele ajuda a aumentar a resistência do cimento à corrosão química. Além disso, é responsável pela coloração acinzentada do cimento, devido à presença de ferro em sua composição (Gobbo, 2003).

1.7 Parâmetros químicos

Variados conjuntos de índices químicos são utilizados para acompanhar o comportamento da mistura crua e do clínquer ao longo de toda a produção. Esses índices auxiliam na estabilidade do processo e no atendimento aos padrões de desempenho do produto final. Entre os parâmetros mais reconhecidos estão o Fator de Saturação de Cal (FSC), o Módulo de Sílica (MS) e o Módulo de Alumina (MA), conforme discutido por Gobbo (2003).

A obtenção das fases minerais adequadas no clínquer depende diretamente da forma como a farinha é composta. Para isso, é necessário ajustar cuidadosamente as proporções dos óxidos majoritários, CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃. O equilíbrio entre esses constituintes químicos é essencial para que, durante o processo de queima, se desenvolva a mineralogia esperada (Mariani, 2018). Os valores mais comuns desses parâmetros no Brasil e suas respectivas equações estão expostas na Tabela 2.

Tabela 2: Módulos químicos utilizados na composição da farinha para produção de clínquer.

Parâmetros químicos	Fórmulas	Valores Usuais
FSC	$FSC = \frac{CaO \times 100}{2,8SiO_2 + 1,2Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3}$	92 a 99%
MS	$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$	2,2 a 3,0%
MA	$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$	1,2 a 2,5%

Fonte: Taylor, (1997).

O FSC mostra quanto de cal reage para formar os principais minerais do clínquer. Quando esse valor aumenta, cresce a quantidade de alita e diminui a de belita. O MS indica o equilíbrio entre os silicatos do clínquer e a fase líquida formada no forno; valores maiores produzem mais alita e belita, mas menos fase líquida. Já o MA controla como a fase líquida se comporta durante a queima, influenciando a temperatura necessária para formar o clínquer. Com o aumento de MA, menor os teores de alita e C4AF e maior o teor de belita e C3A (Costa, 2013; Centurione, 1993).

2 MATERIAIS

2.1 Preparação dos materiais

2.1.1 Resíduo

O resíduo proveniente do polimento e da retífica de porcelanatos técnicos (RPP) foi disponibilizado em forma de lama por uma empresa de revestimentos cerâmicos localizada em Criciúma/SC. Para viabilizar sua utilização, o material passou por etapas de preparação. Inicialmente, foi submetido à moagem em moinho de bolas de alumina por 10 min, posteriormente foi seco em estufa a 110 °C por 24 h e, por fim, peneirado em malha #200, de modo a garantir maior uniformidade. Após esses procedimentos, o resíduo foi acondicionado em recipiente fechado para controle da umidade. A forma como o RPP foi recebido da indústria está apresentada na Figura 2.

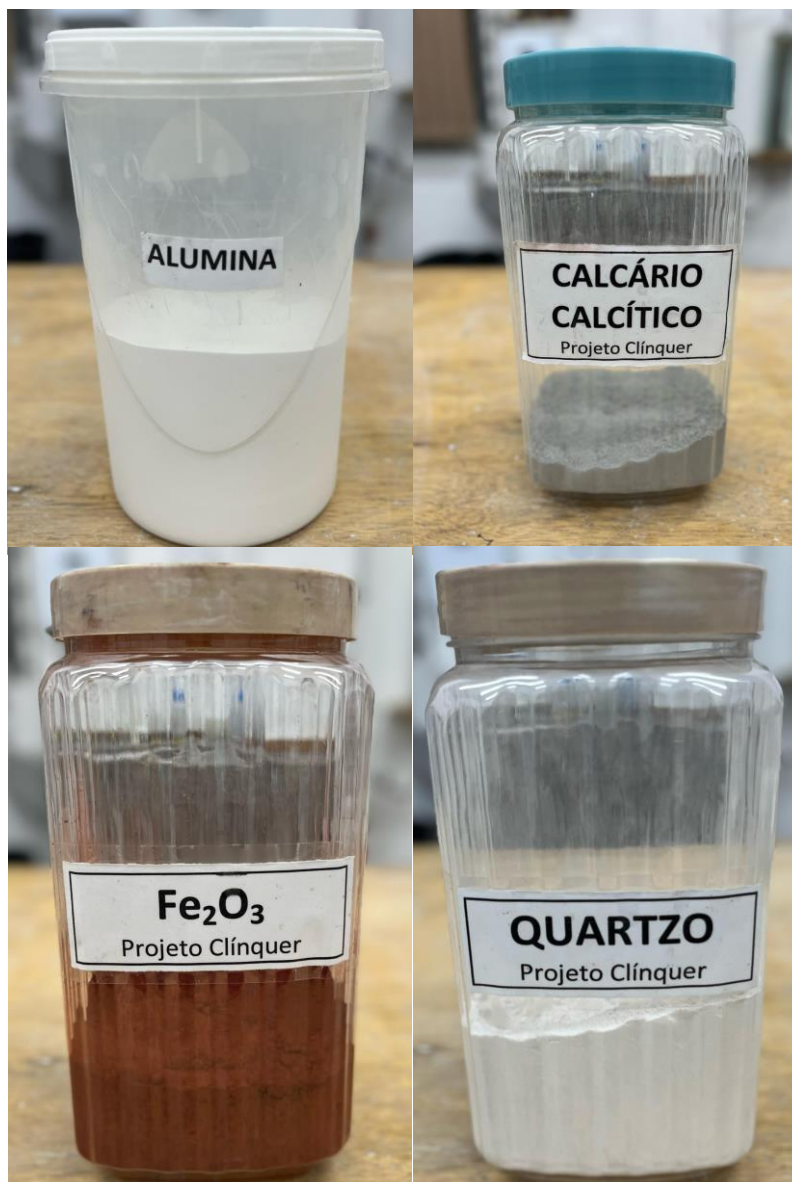
Figura 2: Lama do resíduo de porcelanatos técnicos.



Fonte: Autora, 2023.

2.1.2 Demais matérias-primas

As demais matérias-primas utilizadas para formulação do clínquer foram fornecidas por uma empresa de coloríficos da mesma região, sendo elas: calcário calcítico, alumina, óxido de ferro e quartzo. Para sua utilização, as matérias-primas passaram pelo mesmo processo de preparação do resíduo. O armazenamento dos materiais, após o procedimento de preparação, está representado na Figura 3.

Figura 3: Matérias-primas.

Fonte: Autora, 2025.

2.1.3 Agregado miúdo

Para testar as propriedades físicas e mecânicas do clínquer, foram elaboradas argamassas. Dessa forma, o agregado miúdo utilizado no presente trabalho foi extraído na região sul de Santa Catarina. Antes de sua incorporação, o material foi seco em estufa a 110 °C por aproximadamente 24 h, assegurando a remoção da umidade superficial e aumentando a precisão na dosagem dos componentes. O agregado passou por ensaio de granulometria, sendo separado em quatro frações: grossa, média grossa, média fina e fina, conforme estabelecido pela NBR 7215/2025.

3 MÉTODOS

3.1 Caracterização dos materiais

3.1.1 Fluorescência de raios-X

Após a preparação prévia do resíduo e das matérias-primas, estes foram submetidos ao ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX). O equipamento utilizado foi o modelo EDX 7000, da marca Shimadzu, empregando um método para amostras sólidas em pó. A preparação da amostra incluiu o teste de perda ao fogo, realizado conforme a norma ASTM D7348-07. Esse ensaio permite determinar a composição química dos materiais em base óxidos, informação essencial para a formulação dos clínqueres. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Composição das matérias-primas e do resíduo (% em massa).

Óxidos	CaCO ₃	Quartzo	Resíduo de porcelanato
	(% wt.)	(% wt.)	(% wt.)
CaO	52,148	0,076	2,222
MgO	2,744	0,000	4,820
SiO ₂	1,408	98,687	61,414
K ₂ O	0,257	0,075	2,586
SO ₃	0,195	0,000	0,086
SrO	0,136	0,000	0,023
Fe ₂ O ₃	0,078	0,072	1,482
Al ₂ O ₃	0,000	0,608	22,945
Outros	0,034	0,023	0,442
P.F	43,00	0,460	3,980
Total (%)	100,00	100,00	100,00

Fonte: Autora, 2025.

3.2 Formulação dos clínqueres

Com os resultados obtidos no ensaio de FRX foi possível dar início à formulação dos clínqueres com base na fórmula de Bogue e nos parâmetros químicos: Fator de Saturação de Cal (FSC), Módulo de Sílica (MS) e Módulo de Alumina (MA). Inicialmente, fixou-se variações de resíduos em 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, com o intuito de utilizar a maior quantidade possível de resíduo que resultasse em um clínquer com bom desempenho.

A partir desses pressupostos, desenvolveu-se uma planilha eletrônica no software Microsoft Excel, destinada ao cálculo do percentual das matérias-primas para cada formulação. Para os cálculos, utilizou-se a ferramenta Solver, com o objetivo de maximizar os teores das principais fases do clínquer: alita (C3S), belita (C2S), aluminato tricálcico (C3A), ferroaluminato tetracálcico (C4AF) e respeitar os parâmetros FSC, MS e MA. Os limites de cada parâmetro usado na ferramenta Solver são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4: Limites de cada parâmetro usado na ferramenta Solver para o cálculo das formulações de clínqueres.

Parâmetro	Objetivo Solver
Fator de Saturação de Cal (FSC)	99,0%
Módulo de Sílica (MS)	2,5%
Módulo de Alumina (MA)	1,4%
C3S	70%
C2S	10%
C3A	9%
C4AF	10%
Fase líquida*	23%

*A fórmula comumente utilizada para estimar o percentual de fase líquida é: $F.L = 3Al_2O_3 + 2,25Fe_2O_3 + MgO$. A faixa normal da fase líquida é de 22 a 27% (Cementindusneed, 2025).

Com base nas restrições impostas a ferramenta Solver e na caracterização química das matérias-primas, as formulações dos clínqueres desenvolvidos são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Formulações.

Matéria-prima	Formulação				
	0% de resíduo	5% de resíduo	10% de resíduo	15% de resíduo	20% de resíduo
Calcário	81,1	80,7	80,3	79,9	79,9
Quartzo	13,3	10,2	6,5	3,2	0,0
Alumina	3,5	2,3	1,6	0,6	0,0
Minério de ferro	2,1	1,8	1,6	1,3	0,1
RPP	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0
Total (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: Autora, 2025.

3.3 Difração de raios-X (DRX)

Foi realizado um ensaio de Difração de Raios-X (DRX) para cada clínquer produzido. O objetivo do ensaio foi identificar e caracterizar as estruturas mineralógicas presentes nas amostras desenvolvidas.

A quantificação das fases cristalinas foi realizada pelo Método de Rietveld, apresentando valores de ajuste $GOF = 1,84$ e $Rwp = 21,13$. O equipamento utilizado foi um Difratorômetro Bruker D8, com goniômetro do tipo theta–theta. A radiação empregada foi $K\alpha$, gerada em tubo de cobre, sob condições de 40 kV e 40 mA. A varredura do goniômetro foi conduzida entre 4° e 72° (2θ), com incremento de $0,02^\circ$ e tempo de contagem de 8 segundos por passo.

3.4 Processo de clinquerização

Com as formulações finalizadas, iniciou-se o processo de clinquerização em forno de fusão. Para cada formulação, as matérias-primas foram pesadas em balança semi-analítica e homogeneizadas em almofariz com pistilo até a obtenção de uma mistura uniforme. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em cadinhos refratários do sistema ZAS (Zircônia, Alumina e Sílica) e encaminhadas ao forno de fusão.

O processo de clinquerização foi realizado com taxa de aquecimento de 15 °C/min desde a temperatura ambiente até 900 °C, mantendo-se essa temperatura durante 30 min, seguido de aquecimento a 5 °C/min até 1500 °C, também com patamar de 30 min. O processo de resfriamento ocorreu no interior do forno. Após, os clínques foram retirados, destorroados em almofariz com pistilo e submetidos à moagem a seco em moinho planetário com bolas de alumina, visando a diminuição da granulometria e maior homogeneização. Posteriormente, o material foi peneirado na malha #200, de modo a obter granulometria compatível à do cimento comercial, e em seguida encaminhado ao dessecador para controle de umidade até se obter a quantidade necessária de clínquer para a moldagem dos corpos de prova. Ressalta-se que para cada formulação, foram realizadas cinco clinquerizações, totalizando 624 g de material destinados à moldagem dos corpos de prova em argamassa. A configuração do clínquer logo após a saída do forno está apresentada na Figura 4.

Figura 4: Clínquer pós-clinquerização.



Fonte: Autora, 2025.

3.5 Moldagem e cura dos corpos de prova em argamassa

Os corpos de prova foram moldados conforme a NBR 7215 (ABNT, 2025), utilizando moldes cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A superfície interna dos moldes recebeu aplicação de desmoldante, a fim de facilitar a retirada das peças após o endurecimento. A mistura foi preparada em argamassadeira eletromecânica da marca Pavitest, seguindo a sequência: água, clínquer ou cimento e agregado miúdo, respeitando o tempo e a velocidade de mistura estabelecidos em norma.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada com auxílio de soquete de adensamento, aplicando-se o número de golpes previsto na norma para garantir o adensamento adequado. Para cada formulação de clínquer, foram produzidos quatro corpos de prova. Além destes, foram confeccionados corpos de prova utilizando cimento comercial CP II E-32, com o objetivo de servir como referência para comparação dos resultados. Para a moldagem dos quatro corpos de prova de cada formulação, foi utilizado uma relação a/c de 0,55. Os materiais empregados e suas respectivas quantidades estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Materiais para a formulação da argamassa.

Material	Quantidade (g)
Clínquer ou Cimento CP II E-32	624,0
Água	343,2
Areia normal	-
Fração grossa	468,0
Fração média grossa	468,0
Fração média fina	468,0
Fração fina	468,0

Fonte: Autora, 2025.

Imediatamente após a moldagem, os corpos de prova foram encaminhados à câmara úmida para cura inicial, com a face superior protegida contra eventual gotejamento, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Corpos de prova em câmara úmida.



Fonte: Autora, 2024.

Após 24 h os corpos de prova foram desmoldados e transferidos para um tanque de cura submersa em água saturada com cal, onde permaneceram por 28 dias. Decorrido esse período, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

3.6 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados após 28 dias de cura submersa em solução de água e cal, em conformidade com os procedimentos estabelecidos pela NBR 7215 (ABNT, 2025). Antes do ensaio, as faces superiores e inferiores dos corpos de prova foram retificadas, de modo a assegurar um carregamento axial uniforme durante o teste. O rompimento dos corpos de prova foi efetuado em uma máquina universal de ensaios Emic, modelo DL 30 kN, equipada com célula de carga TRD29. A velocidade de aplicação da carga foi mantida constante em 0,25 MPa/s ao longo de todo o ensaio, conforme estabelecido na NBR 7215 (ABNT, 2025).

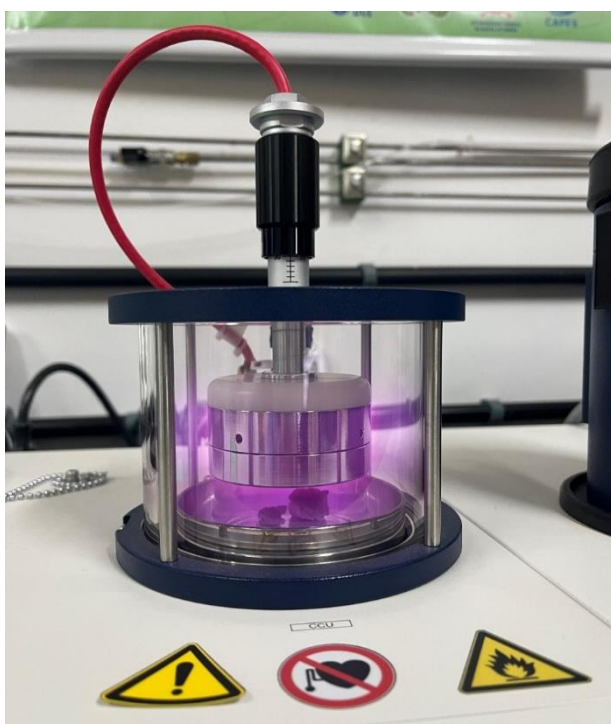
3.7 Análise microestrutural

A análise da microestrutura das amostras foi realizada por meio do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com o objetivo de identificar as fases cristalinas formadas após a hidratação e compará-las com o cimento comercial. Para o ensaio, foi retirada uma amostra da seção transversal do centro dos corpos de prova cilíndricos. Os parâmetros empregados no recobrimento foram: duas aplicações de ouro a 30 mA por 120 s, com altura de recobrimento de 30 mm.

Um sistema de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS), acoplado ao MEV, foi usado para a análise química pontual. O equipamento utilizado foi um microscópio eletrônico de bancada da marca Hitachi, modelo TM4000Plus (Tabletop Microscope).

Os equipamentos de recobrimento com ouro, MEV e EDS estão apresentados nas Figuras 6 e 7.

Figura 6: Recobrimento com ouro.



Fonte: Autora, 2025.

Figura 7: MEV de bancada com EDS.

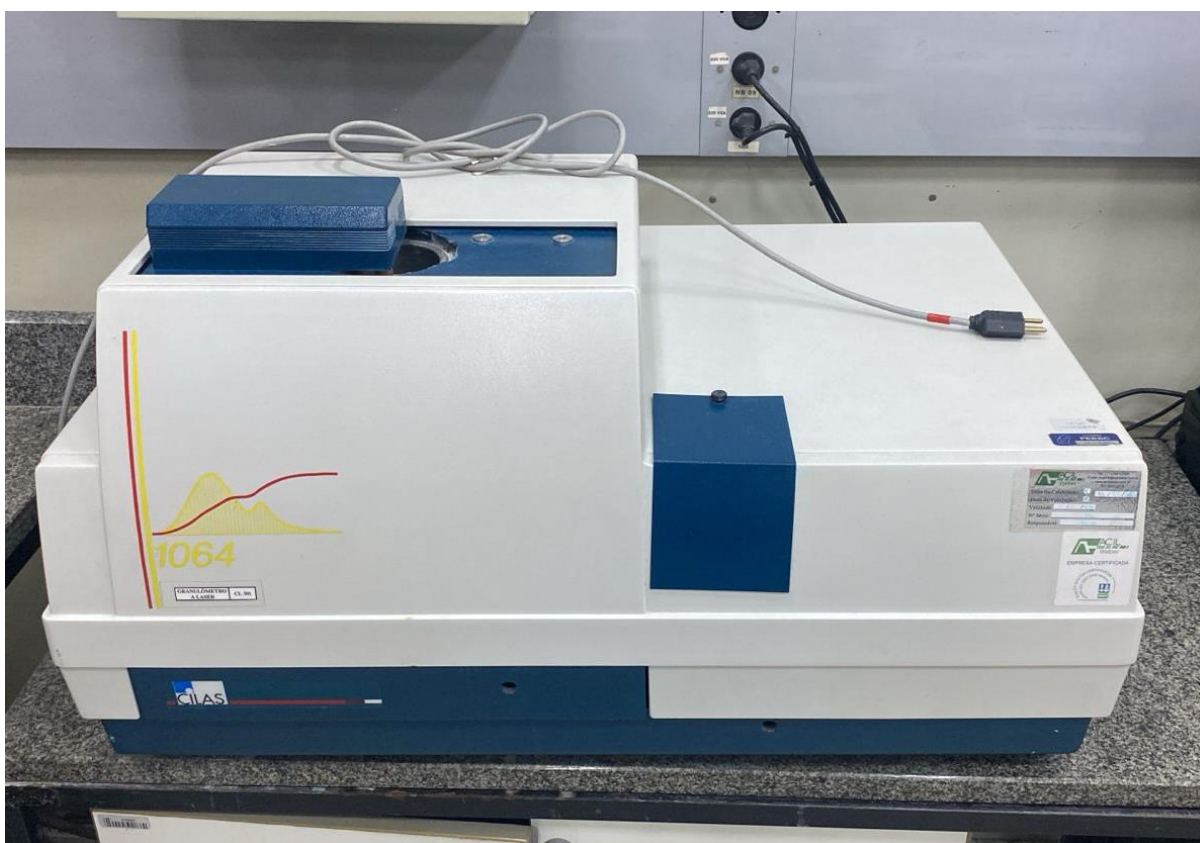


Fonte: Autora, 2025.

3.8 Granulometria a laser

Para determinar a granulometria média do resíduo, foi realizado um ensaio de granulometria a laser. A amostra foi dispersa em água e submetida a tratamento em ultrassom por 5 min, utilizando-se 30 g de resíduo passante na #200. O ensaio foi conduzido em um analisador de partículas a laser da marca Cilas, modelo 1064, permitindo obter com elevada precisão a distribuição granulométrica média do resíduo. A Figura 8 apresenta o equipamento utilizado no ensaio.

Figura 8: Analisador de partículas a laser.



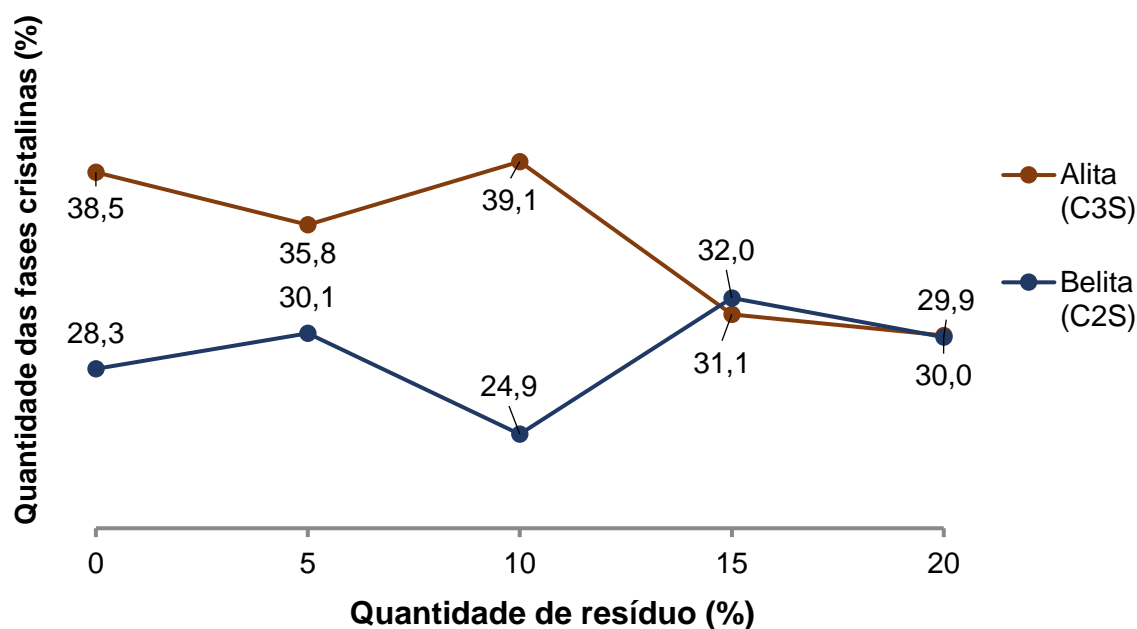
Fonte: Autora, 2025.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Difração de raios-X (DRX)

Os resultados do ensaio de DRX referentes a cada formulação de clínquer em relação as quantidades das principais fases cristalinas, Alita (C3S) e Belita (C2S), estão apresentados no Gráfico 1.

Gráfico 1: Percentual de Alita e Belita nas formulações de clínquer.



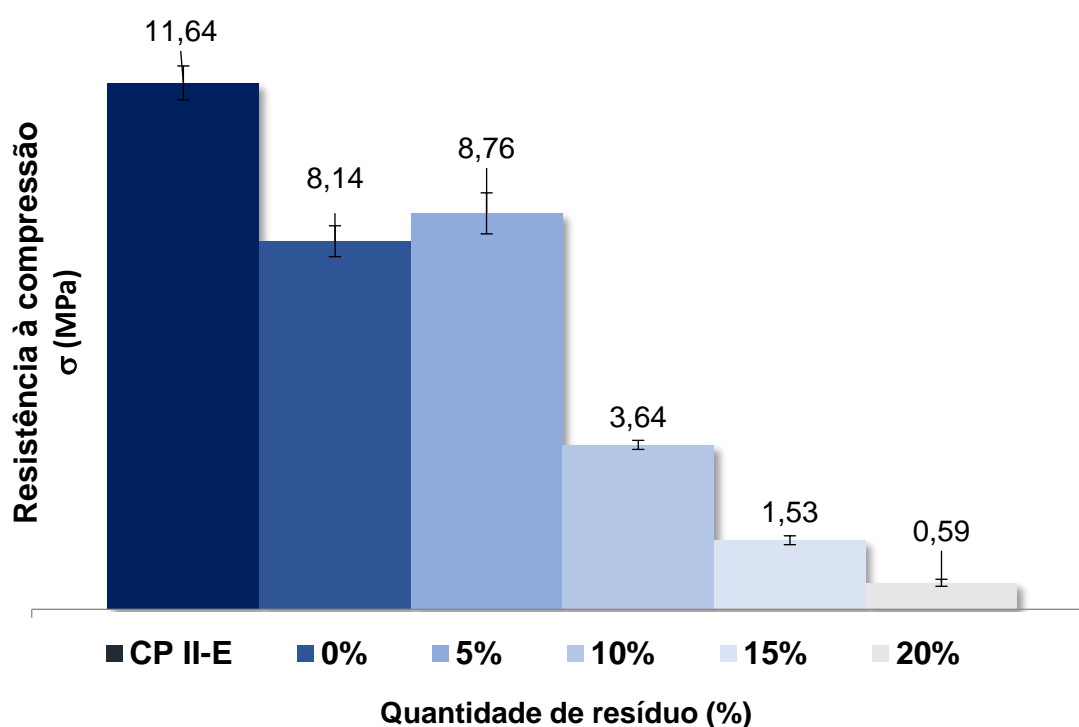
Fonte: Autora, 2025.

A análise dos resultados de DRX (Gráfico 1) evidencia que a formação real das fases do clínquer não corresponde às estimativas teóricas obtidas pela fórmula de Bogue. À medida que o percentual de resíduo aumenta, observa-se uma redução na quantidade de alita e um aumento na formação de belita. Isso ocorre porque a fórmula de Bogue considera condições ideais de reação, normalmente atingidas apenas quando se utilizam matérias-primas puras e homogêneas.

4.2 Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova em argamassa estão representados no Gráfico 2.

Gráfico 2: Resistência à compressão dos corpos de prova em argamassa.



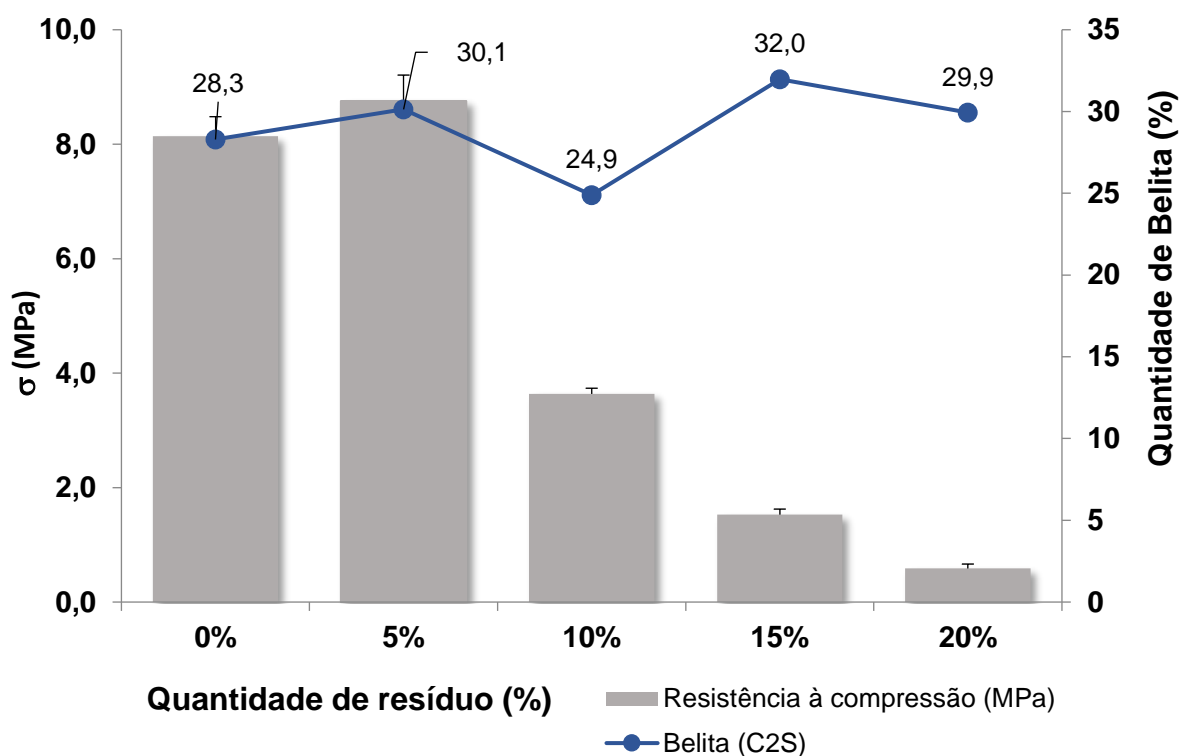
Fonte: Autora, 2025.

O Gráfico 2 apresenta os resultados de resistência à compressão média das argamassas produzidas com o cimento comercial CP II E-32, bem como dos corpos de prova contendo diferentes percentuais de adição de resíduo. Observa-se que a formulação com 0% de resíduo apresentou uma redução em relação à argamassa de referência com CP II E-32. Já a argamassa com 5% de resíduo não apresentou perda de resistência em comparação à argamassa com 0% de resíduo. Em contrapartida, os teores de 10%, 15% e 20% resultaram em redução expressiva da resistência à compressão, evidenciando diferença considerável em relação à argamassa de referência. Esses resultados indicam que a incorporação excessiva de resíduo compromete o desempenho do material, tornando-o inadequado para aplicações que demandam resistências próximas às da argamassa produzida com cimento comercial.

Por outro lado, as formulações com 0% e 5% de resíduo não apresentaram uma redução expressiva na resistência à compressão em relação ao cimento de referência. Esses resultados evidenciam o potencial de utilização do RPP como matéria-prima alternativa na produção de clínquer.

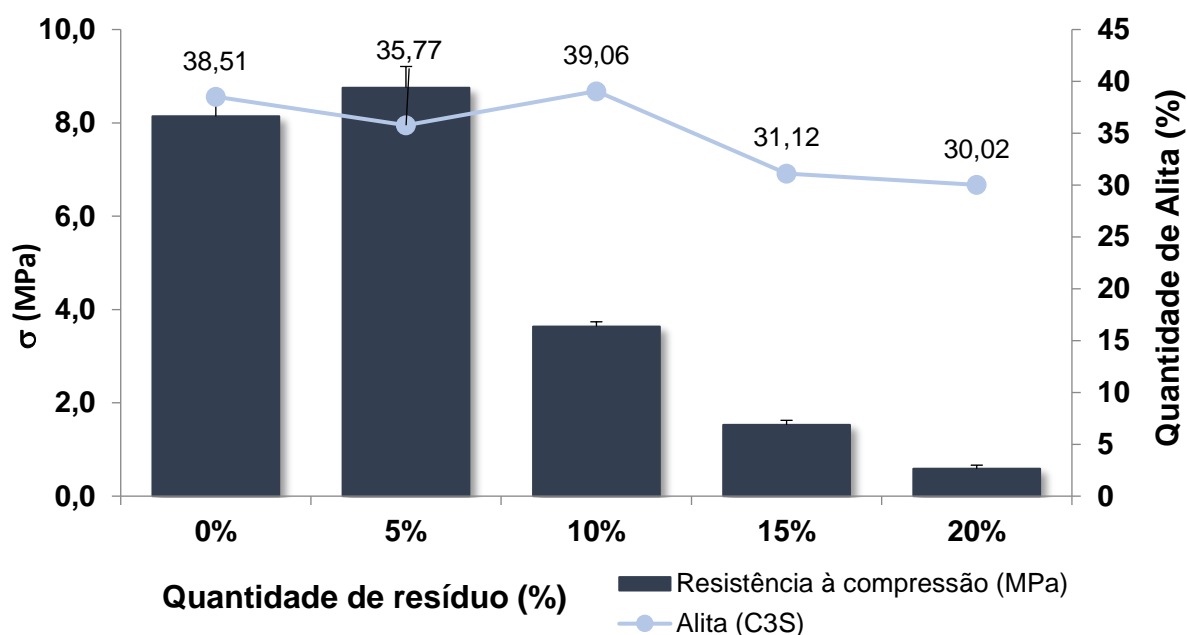
A seguir, os gráficos 3 e 4 apresentam os resultados da resistência mecânica em função dos percentuais de belita e alita, respectivamente, permitindo analisar os aumentos ou decréscimos na resistência em relação aos valores obtidos.

Gráfico 3: Resistência à compressão em relação aos percentuais de belita.



Fonte: Autora, 2025.

Gráfico 4: Resistência à compressão em relação aos percentuais de alita.



Fonte: Autora, 2025.

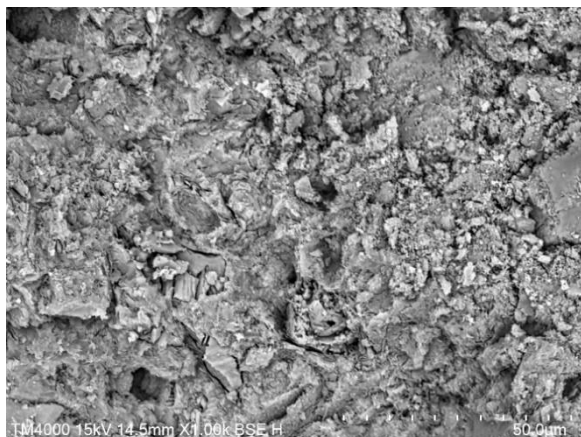
4.3 Análise das microestruturas das amostras de argamassa

A análise microestrutural realizada por MEV nas amostras de argamassa contendo o CP II E-32, 0%, 5%, 10% e 15% de resíduo não revelou alterações significativas na microestrutura da argamassa, apresentando fases cristalinas e porosidade semelhantes. Essa característica está diretamente associada à resistência mecânica do material, uma vez que maior porosidade tende a reduzir sua capacidade estrutural.

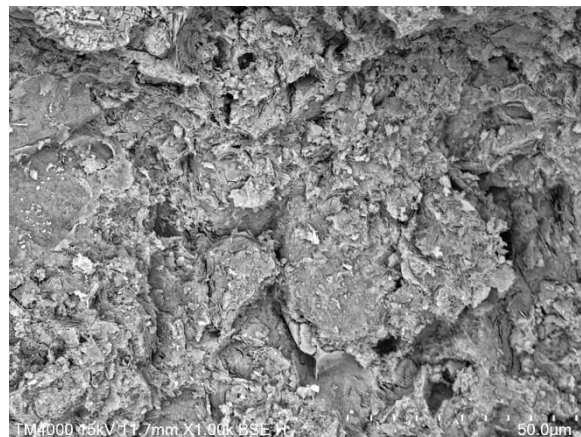
Em contraste, a amostra com 20% de resíduo apresentou alteração microestrutural significativa, evidenciando a presença de estruturas cristalinas identificadas como Portlandita (Ca(OH)_2), fase que compromete a durabilidade e desempenho dos materiais (Costa, 2020). Além disso, verificou-se visualmente um incremento de porosidade nessa amostra, indicando menor densidade microestrutural. Esses resultados corroboram com os valores de resistência mecânica apresentados no Gráfico 2, evidenciando que a incorporação excessiva de resíduo compromete a performance estrutural da argamassa. Na Figura 9 está apresentado as imagens obtidas através do ensaio MEV de todas as formulações, incluindo o corpo de prova com o cimento CP II E-32.

Figura 9: Microestrutura das amostras com ampliação de 1000x.

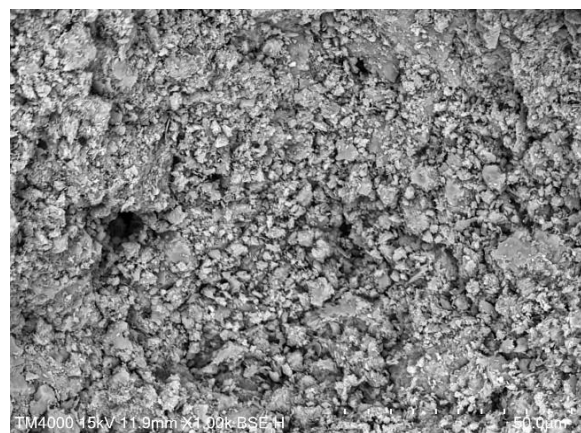
a) 0% de resíduo.



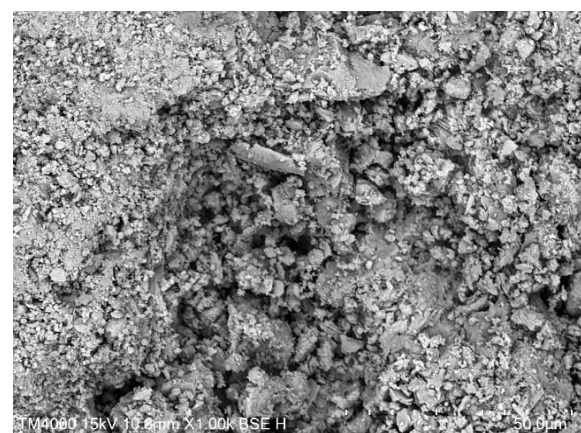
b) 5% de resíduo.



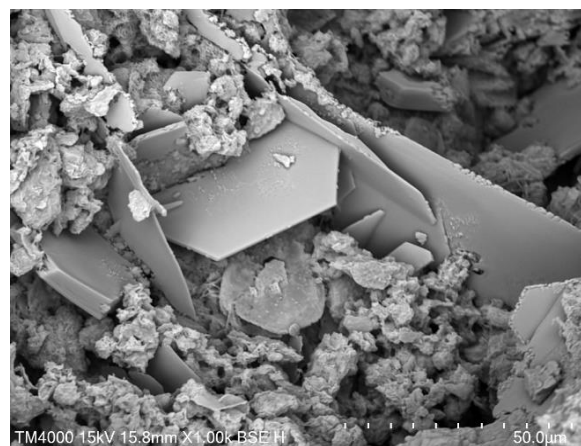
c) 10% de resíduo.



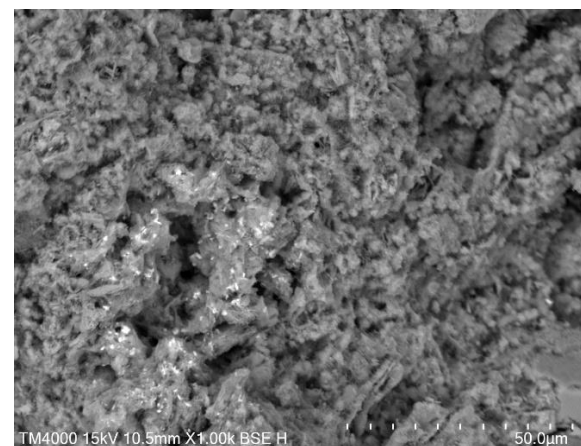
d) 15% de resíduo.



e) 20% de resíduo.



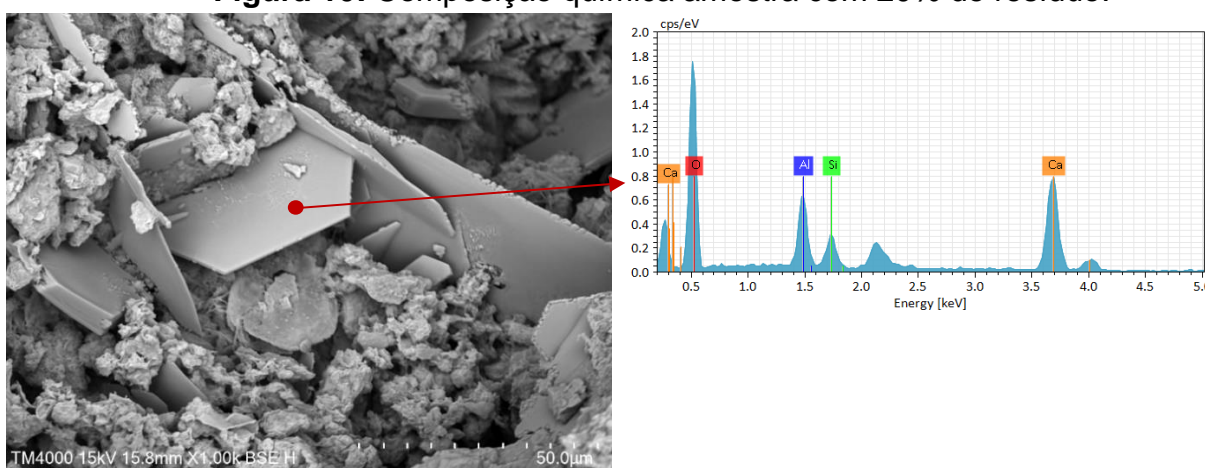
f) CP II E-32.



Fonte: Autora, 2025.

Além do MEV, realizou-se a análise química pontual da amostra com 20% de resíduo para confirmar a ocorrência de Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). A Figura 10 apresenta os resultados obtidos dessa análise.

Figura 10: Composição química amostra com 20% de resíduo.

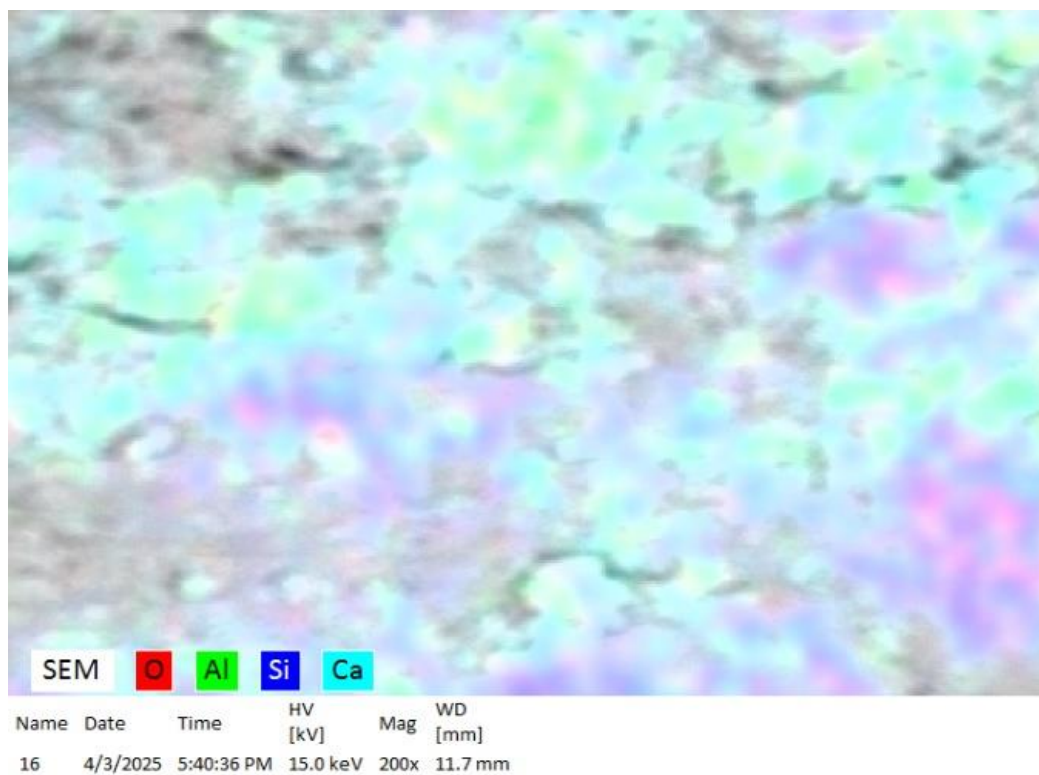


Fonte: Autora, 2025.

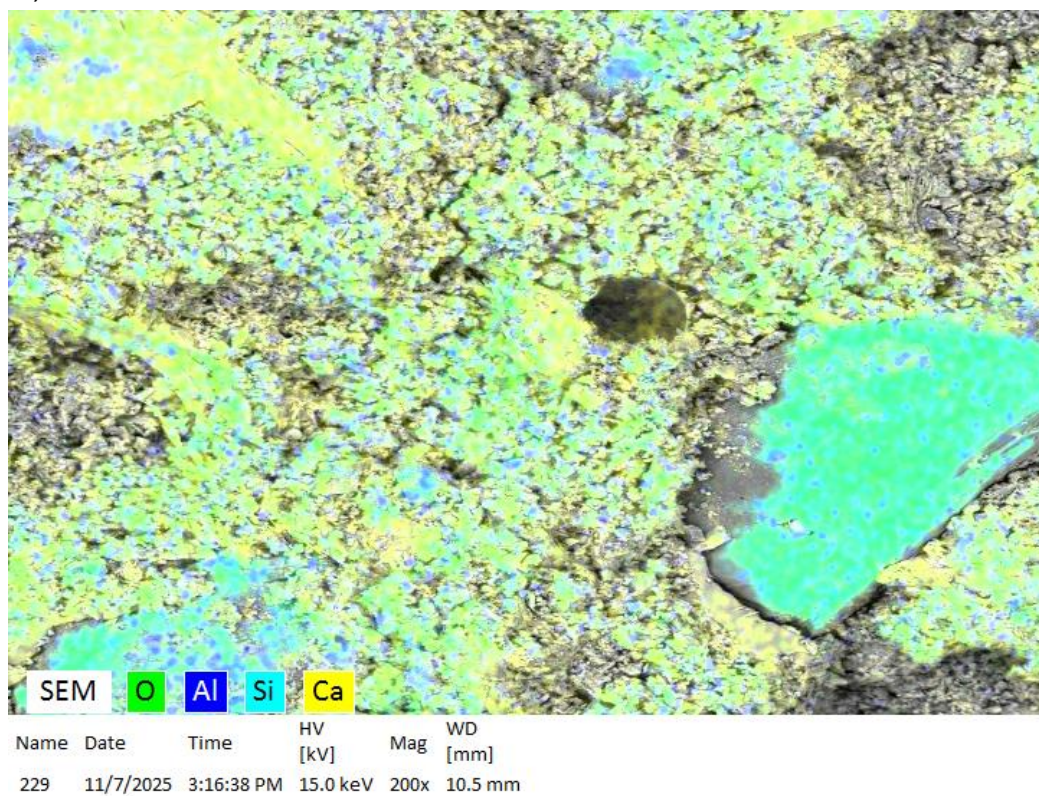
No ensaio de EDS, observou-se que as amostras contendo o cimento CP II E-32 e 0% de adição de resíduo, apresentaram composição química uniforme, especialmente quanto aos elementos Cálcio (Ca), Silício (Si), Alumínio (Al) e Oxigênio (O). Esses elementos são característicos do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), principal produto da hidratação do clínquer e responsável pela coesão da matriz cimentícia. O C-S-H desempenha papel essencial no desenvolvimento das propriedades físicas e mecânicas do material em seu estado endurecido, contribuindo diretamente para sua resistência e durabilidade (YU; GENG, 2024). Na figura 11 está apresentado o mapa composicional das amostras com CP II E-32 e 0% de resíduo.

Figura 11 – Mapa composicional das amostras com ampliação de 200x.

a) 0% de resíduo.



b) CP II E-32.

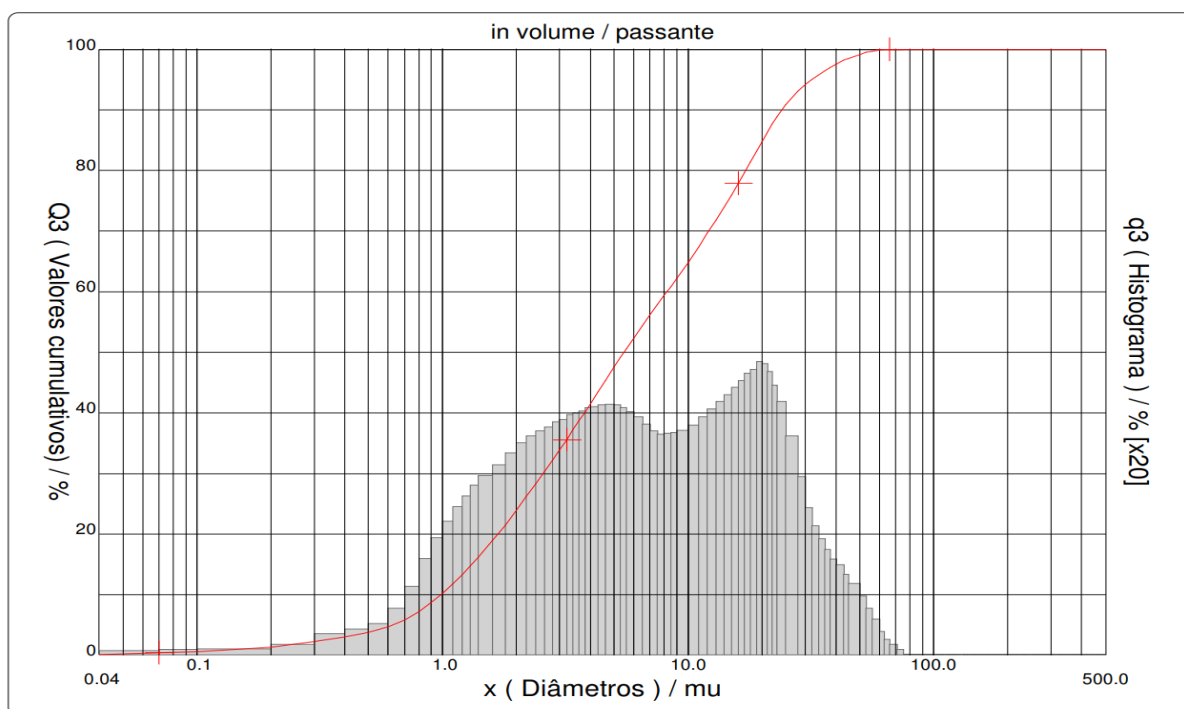


Fonte: Autora, 2025.

4.4 Granulometria a laser

Os resultados da granulometria a laser do resíduo (RPP) indicam que se trata de um material de elevada finura. Essa característica é especialmente relevante em materiais cimentícios, pois partículas menores apresentam maior área superficial específica, o que tende a intensificar as reações e a interação com os demais componentes da mistura. No presente estudo, os valores obtidos para D_{10} , D_{50} e D_{90} foram $0,98 \mu\text{m}$, $5,48 \mu\text{m}$ e $24,12 \mu\text{m}$, respectivamente, resultando em um diâmetro médio de $9,82 \mu\text{m}$. Esses resultados são compatíveis com os apresentados por Breitenbach *et al.* (2017), que observaram partículas variando entre 1 e $44 \mu\text{m}$, com diâmetro médio de $5,93 \mu\text{m}$, e valores de D_{10} , D_{50} e D_{90} iguais a $1,27 \mu\text{m}$, $5,44 \mu\text{m}$ e $11,27 \mu\text{m}$, respectivamente. A Figura 12 apresenta a distribuição granulométrica obtida no ensaio a laser.

Figura 12: Granulometria resíduo.



Fonte: Autora, 2025.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade da utilização do resíduo proveniente do polimento e retífica de porcelanatos técnicos como matéria-prima alternativa na produção de clínquer. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização físico-química e mineralógica, bem como análises de desempenho mecânico das formulações desenvolvidas.

Os resultados obtidos evidenciaram que o resíduo apresenta composição química e granulometria adequadas a produção de clínquer, características que favorecem sua reatividade e interação com os demais constituintes da mistura cimentícia.

Os ensaios de resistência à compressão mostraram que as formulações contendo até 5% de resíduo apresentaram valores próximos ao cimento comercial CP II E-32, demonstrando que a substituição parcial é tecnicamente viável em termos de desempenho mecânico. Entretanto, teores superiores a esse limite ocasionaram redução expressiva na resistência, restringindo sua aplicação em condições que demandam desempenho estrutural mais elevado.

As análises de DRX e MEV (acoplado com EDS) confirmaram a formação de fases cristalinas características do clínquer. Nas amostras com 0% de adição de resíduo, por exemplo, observou-se o surgimento do C-S-H, principal produto da hidratação do clínquer, desempenhando papel crucial na resistência do material. Além disso, o ensaio de MEV evidenciou que teores elevados de resíduo (20%) aumentaram a porosidade e a presença de portlandita, fatores que comprometeram o desempenho mecânico da amostra.

Dessa forma, conclui-se que a incorporação do resíduo em até 5% na produção de clínquer apresenta potencial de aplicação prática, conciliando desempenho técnico e principalmente contribuição ambiental, uma vez que promove a valorização de um resíduo industrial e reduz a demanda por matérias-primas naturais.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, Fernando Antônio; SAMPAIO, Antônio Carlos Freire. **Os novos princípios e conceitos inovadores da economia circular**. Revista Entorno Geográfico, n. 15, p. 82–102, fev./jun. 2018.

ANDREOLA, F.; BARBIERI, L.; LANCELLOTTI, I.; BIGNOZZI, M. C.; SANDROLINI, F. **New Blended Cement from Polishing and Glazing Ceramic Sludge**. v. 7, n. 4, p. 546-555, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004-2: Resíduos sólidos – Classificação – Parte 2: Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR)**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES (ANFACER). **Números do Setor Cerâmico**. Disponível online: <https://www.anfacer.org.br/sobre/numeros-do-setor>. Acessado em 18/10/2025.

BOGUE, R. H. *The Chemistry of Portland Cement*. 2. ed. New York: Reinhold Publishing Corporation, 1955.

BREITENBACH, S. B. *et al.* **Adição de resíduo do polimento de porcelanato em argamassas de restauro à base de cal**. Cerâmica, São Paulo, v. 63, n. 367, p. 395–401, 2017.

CEMENTINDUSNEED. **Clinkerization. Cement Plant Optimization**. Disponível em: <https://www.cementindusneed.com/clinkerization/>. Acesso em: 16 nov. 2025.

CENTURIONE, S. L. **Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland**. (Dissertação de Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1993. 154 p.

COSTA, Eugênio B. **Aproveitamento do resíduo de anodização do alumínio na produção do cimento sulfoaluminato de cálcio belítico**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

COSTA, P.R. **Hidratação e reologia de clínquer Portland com diferentes fontes brasileiras de sulfato de cálcio (gipsita e fosfogesso)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

CERAMICS OF BRAZIL. **Números do Setor**. Disponível online: <https://www.ceramicsofbrazil.com/setor-ceramico/numeros-do-setor>. Acessado em 03/06/2025.

FORTUNATO, Morgana; MARTINS, Ben-Hur Raíra; COLLODETTI, Giovana; BETIOLI, Andrea Murillo. **Avaliação da adição de resíduo de polimento de porcelanato (RPP) em argamassa autoadensável**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS – SBTA, 13., 2023, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: ANTAC, 2023. p. 545–553. ISSN 1984-8757.

GOBBO, Luciano de Andrade. **Os compostos do clínquer Portland: Sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. USP: São Paulo, 2003.

ISO. 13006: **Ceramic tiles – Definitions, classification, characteristics and marking**. 2020.

KE, S.; WANG, Y.; PAN, Z.; NING, C.; ZHENG, S. Recycling of polished tile waste as a main raw material in porcelain tiles. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 238-244, 2016/03/01/ 2016.

MARIANI, Bruna Bueno. **Produção de clínquer Portland com baixa emissão de CO₂ a partir da incorporação de minério não reagido (MNR) advindo da produção de TiO₂**. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

MARINGOLO, V. **Clínquer co-processado: produto de tecnologia integrada para a sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento**. 2001. 99 p. Tese (Doutorado em Geociências). Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2001.

MATOS, R. P. **Estudo do uso de resíduo do polimento de Porcelanato em concreto autoadensável**. 2019. (Doutor). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, SC.

PEDRASSANI, J. **O Grês Porcelanato: manual de fabricação e técnicas de emprego**. São Paulo: Faenza Editrice do Brasil, 2002.

PELISSER, F.; STEINER, L. R.; BERNARDIN, A. M. Recycling of Porcelain Tile Polishing Residue in Portland Cement: Hydration Efficiency. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 4, p. 2368-2374, 2012.

RAMBALDI, E.; ESPOSITO, L.; TUCCI, A.; TIMELLINI, G. Recycling of polishing porcelain stoneware residues in ceramic tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 27, n. 12, p. 3509-3515, 2007.

SANTOS, Bruna S. *et al.* **Princípios da ciência dos Materiais Cimentícios: Produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos.** 1. ed. Curitiba: Ed. Appris, 2021.

SCHIMITT, A. L. **Porcelanato técnico colorido em massa – avaliação da influência do percentual de pigmento nas propriedades tecnológicas e estéticas.** 2019. Graduação em Engenharia de Materiais, UFSC, Blumenau, SC.

SOÁRES FILHO, J. E. *et al.* Polishing performance of eco-friendly porcelain stoneware tiles reusing bricks and roof tiles wastes. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 256, n. 120362, 2020.

STEINER, L. R. **Efeito do resíduo do polimento de porcelanato como material cimentício suplementar.** 2014. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, UNESC, Criciúma, SC.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry.** Thomas Telford Publishing, 2 ed., 480p. London, 1997.

YU, Y.; GENG, G. Does nano basic building-block of C-S-H exist? - A review of direct morphological observations. **Materials & Design**, v. 238, art. 112699, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112699>. Acesso em: 19 out. 2025.

ZHAO, Liang; YAO, Shuang; ZHAO, Jiayu. **Optimization of hydrothermal autoclaving parameters for the synthesis of porous ceramics from porcelain tile polishing residue.** **Scientific Reports**, v. 14, n. 15144, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-66125-7. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-66125-7>. Acesso em: 28 jun. 2025.