

## INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE POLIMENTO E RETÍFICA DE PORCELANATO SOBRE O CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CLÍNQUER

### INFLUENCE OF THE ADDITION OF PORCELAIN POLISHING RESIDUE ON THE HYDRATION CLINKER'S HEAT

Breno Rabelo Jackecheski<sup>1</sup>  
Marcelo Dal Bó<sup>2</sup>  
Anderson Augusto Muller<sup>3</sup>

**Resumo:** O presente trabalho estudou a influência da adição de resíduo proveniente do polimento e retífica de porcelanato sobre o calor de hidratação do clínquer produzido em laboratório. O estudo buscou analisar o potencial de reaproveitamento desse resíduo de polimento e retífica de porcelanatos como material alternativo na formulação do clínquer, contribuindo para a sustentabilidade e redução de impactos ambientais nos setores de revestimentos cerâmicos e cimenteiro. Além do resíduo de polimento de porcelanato foram usados quartzo, alumina e calcita para as formulações do clínquer. Foram estudadas substituições entre 0% a 20% de resíduo. Granulometria a laser, fluorescência de raios X (FRX), calorimetria semi-adiabática, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão de energia (EDS) foram técnicas usadas na caracterização. Os resultados demonstraram que o resíduo de polimento apresenta partículas finas e composição química similar a massa do suporte cerâmico de porcelanato. As curvas calorimétricas indicaram elevação do calor de hidratação com o aumento do teor de resíduo, especialmente para 5% e 10%, que apresentaram comportamento semelhante ao cimento CPV-ARI. As análises microestruturais e químicas revelaram homogeneidade e densificação nas amostras com incorporação do resíduo, indicando uma distribuição uniforme dos elementos, sem alteração substancial no teor total de cálcio. Esses resultados demonstram possibilidade de aplicação do subproduto cerâmico como matéria-prima alternativa para o processamento de clínquer.

**Palavras-chave:** Clínquer; calorimetria; resíduo cerâmico; sustentabilidade; microestrutura.

**Abstract:** This study investigated the influence of adding waste from porcelain tile polishing and rectification on the heat of hydration of laboratory-produced clinker. The research aimed to analyze the reuse potential of this ceramic by-product as an alternative raw material in clinker formulation, contributing to sustainability and the reduction of environmental impacts in the ceramic and cement industries. In addition to porcelain polishing waste, quartz, alumina, and calcite were used in the clinker formulations. Substitution levels ranging from 0% to 20% waste were studied. Laser granulometry, X-ray fluorescence (XRF), semi-adiabatic calorimetry, scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive spectroscopy (EDS) were techniques employed for characterization. The results showed that the polishing waste presented

---

<sup>1</sup> Discente do curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina. breno.rj@aluno.ifsc.edu.br.

<sup>2</sup> Docente do curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina. marcelo.dalbo@ifsc.edu.br.

<sup>3</sup> Docente do curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina. anderson.muller@ifsc.edu.br.

fine particles and a chemical composition similar to the porcelain tile body mass. The calorimetric curves indicated an increase in the heat of hydration with higher waste content, especially at 5% and 10%, which exhibited behavior similar to CPV-ARI cement. Microstructural and chemical analyses revealed homogeneity and densification in the samples incorporating the waste, indicating a uniform distribution of elements without significant change in the total calcium content. These results demonstrate the possibility of applying polishing and grinding residue from porcelain tiles as an alternative raw material for clinker processing.

**Keywords:** Clinker; calorimetry; ceramic waste; sustainability; microstructure.

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento na geração de resíduos sólidos industriais constitui um dos principais desafios ambientais da atualidade, dentre eles, o setor cerâmico. O qual é responsável por grandes volumes de resíduos gerados durante as etapas de polimento e retífica de porcelanatos.

De acordo com Pelisser, Steiner e Bernardin (2012), apenas no sul de Santa Catarina são geradas aproximadamente 1000 toneladas desse tipo de resíduo por semana, o que evidencia a necessidade de estudos que objetivam encontrar alternativas de reaproveitamento industrial (Pelisser, Steiner & Bernardin, 2012).

Uma das alternativas é a incorporação deste resíduo na produção de cimento, por exemplo, adicionando-se cerca de 5% em massa ao clínquer, ou em produtos de maior valor agregado, como argamassas colantes (Pelisser, Steiner & Bernardin, 2012).

Em paralelo, a produção de clínquer, etapa fundamental na fabricação do cimento Portland, é reconhecida por seu elevado consumo energético e pela intensa emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera, devido à calcinação do calcário e à queima de combustíveis fósseis nos fornos. De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, [s.d.]), a fabricação de uma tonelada de clínquer pode gerar até 800 kg de CO<sub>2</sub>, além de demandar temperaturas próximas a 1450°C, necessitando de grande quantidade de energia.

Diante desse cenário, torna-se importante a busca por alternativas que conciliem desempenho técnico, viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental. Uma proposta promissora consiste na incorporação de resíduos industriais na formulação do clínquer, substituindo parcialmente matérias-primas naturais, como argila e calcário (PELISSER et al., 2012; RAMBALDI et al., 2007). Essa prática, além de reduzir o consumo de recursos não renováveis, favorece a economia circular e a valorização de subprodutos industriais, transformando resíduos em matérias-primas alternativas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

No entanto, ainda não existem estudos sobre o efeito da adição de resíduos de polimento de porcelanatos sobre propriedades fundamentais do clínquer, como o calor de hidratação. Esse parâmetro, segundo Neville (2016), está diretamente relacionado ao desempenho do cimento, uma vez que a liberação excessiva de calor no início da hidratação pode provocar fissuras térmicas em obras de grande volume, comprometendo a durabilidade e a integridade estrutural do material (GONÇALVES; ALMEIDA, 2015). Assim, estudar a influência da adição do resíduo de porcelanato, em substituição as matérias-primas convencionais é essencial para assegurar sua aplicação segura e eficiente.

## 1.1 Objetivo Geral

Estudar a influência da adição de resíduo de polimento e retífica de porcelanato, em substituição a matérias-primas naturais, como argila e calcário, sobre o processo de hidratação do clínquer, com ênfase no calor de hidratação.

## 1.2 Objetivos específicos

Definem-se os seguintes objetivos específicos:

- i. Selecionar, caracterizar e preparar as amostras de resíduo de porcelanato e matérias-primas naturais a serem utilizadas nos ensaios laboratoriais.
- ii. Estudar os efeitos da adição do resíduo nas propriedades termoquímicas e cinéticas da hidratação do clínquer, com foco no calor de hidratação.
- iii. Avaliar o desempenho do resíduo como substituto parcial das matérias-primas convencionais, considerando eficiência técnica e viabilidade ambiental.
- iv. Promover o reaproveitamento de resíduos sólidos industriais, visando alternativas sustentáveis para os setores cimenteiro e cerâmico.
- v. Estimular o avanço científico e tecnológico sobre o uso de resíduos industriais na construção civil e fomentar a transferência de conhecimento.

## 2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

### 2.1 Indústria cerâmica e produção de clínquer

A indústria de revestimentos cerâmicos brasileira é uma das mais representativas do setor de materiais de construção, sendo responsável por mais de 900 milhões de metros quadrados de revestimentos produzidos anualmente (ANFACER, 2023). Em paralelo, a produção de cimento, com destaque para o clínquer, seu principal componente ativo, movimenta cerca de 60 milhões de toneladas por ano no país (SNIC, 2022).

A fabricação do clínquer envolve o uso intensivo de recursos naturais, como argila e calcário, além de altas temperaturas no processo de queima, que podem ultrapassar 1450°C, gerando elevadas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (NEVILLE, 2016). Tais fatores tornam a indústria cimenteira uma das mais impactantes do ponto de vista ambiental, exigindo alternativas tecnológicas que reduzam os efeitos negativos da produção.

### 2.2 Resíduos da indústria cerâmica

Durante o processo de acabamento de porcelanatos, especialmente nas etapas de polimento e retífica, são gerados resíduos sólidos com granulometria fina, compostos majoritariamente por sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e feldspato. Estima-se que 3% a 5% da massa total processada nas indústrias cerâmicas se transforme em resíduo, representando mais de 300 mil toneladas por ano no Brasil (STEINER, 2014; PURIFICAÇÃO, 2009). Esse resíduo é resultado direto da remoção de aproximadamente 1 mm da superfície da placa cerâmica durante o polimento, procedimento realizado com abrasivos, em sistemas automatizados refrigerados por água (PELISSER, STEINER e BERNARDIN, 2012).

A lama gerada nesse processo consiste em uma mistura do próprio material do porcelanato e dos abrasivos utilizados, sendo posteriormente separada e armazenada para reaproveitamento ou descarte (PELISSER, STEINER e BERNARDIN, 2012). Esse resíduo normalmente não é reincorporado ao processo fabril devido à presença de impurezas, sendo em grande parte destinado a aterros sanitários (PELISSER, STEINER e BERNARDIN, 2012). O descarte desses materiais gera custos logísticos e ambientais significativos para as empresas.

Nesse contexto, diversas pesquisas têm buscado alternativas de reaproveitamento, como seu uso em argamassas, artefatos de concreto (PELISSER et al., 2012; PURIFICAÇÃO, 2009). Essa prática se alinha aos princípios da economia circular, pois transforma um rejeito industrial em insumo produtivo, contribuindo para a redução da emissão de CO<sub>2</sub> e para maior eficiência energética no processo de fabricação.

### **2.3 Clínquer e suas propriedades**

O clínquer é o principal constituinte do cimento Portland, sendo o responsável por suas propriedades aglomerantes. Sua composição química, predominantemente de silicatos e aluminatos de cálcio, influencia diretamente o desenvolvimento de resistência mecânica e a durabilidade do concreto (NEVILLE, 2016).

A qualidade do clínquer depende do equilíbrio entre os compostos formadores, principalmente C3S (silicato tricálcico), C2S (silicato dicálcico), C3A (aluminato tricálcico) e C4AF (ferroaluminato tetracálcico). Além disso, o controle das matérias-primas e da temperatura de queima é fundamental para garantir um produto homogêneo e estável. Qualquer variação na composição química ou nas condições de clínquerização pode alterar significativamente o comportamento térmico e mecânico do cimento resultante.

### **2.4 Calor de hidratação do clínquer**

O calor de hidratação corresponde à energia térmica liberada durante as reações exotérmicas que ocorrem entre os componentes do clínquer Portland e a água, sendo um dos principais parâmetros para compreender a cinética e a intensidade das reações de hidratação.

A quantidade de calor liberada está diretamente relacionada à composição mineralógica do clínquer, especialmente aos teores de alite (C3S) e aluminato tricálcico (C3A), fases responsáveis pelas reações iniciais e de maior liberação de energia. Conforme Neville e Brooks (2013, apud MÜLLER, 2023), a medição do calor de hidratação permite avaliar a reatividade do cimento e identificar variações associadas a adições minerais, aditivos e à temperatura de cura, sendo uma ferramenta fundamental na caracterização do comportamento térmico e mecânico de pastas e concretos.

De acordo com Müller (2023), o calor de hidratação pode ser determinado por métodos como a calorimetria isotérmica, a semi-adiabática e o calor de dissolução, que possibilitam registrar o perfil térmico do processo e correlacionar o comportamento calorimétrico com a evolução das fases hidratadas. Destaca-se ainda que a liberação de calor ocorre de forma não linear, com picos distintos associados às diferentes etapas de hidratação: dissolução inicial, período de indução, aceleração, desaceleração e fase de endurecimento final. Além disso, o uso de adições minerais

finas pode modificar essa curva, atuando como nucleadores e alterando o tempo de indução e a taxa de liberação de calor.

Pelisser et al. (2012) observaram que a incorporação de resíduos provenientes das etapas de polimento e retífica de porcelanatos reduz a taxa de liberação de calor, uma vez que as reações pozolânicas são mais lentas e consomem hidróxido de cálcio ao longo do tempo, promovendo uma liberação gradual de energia térmica. Essa característica é benéfica, pois diminui o risco de fissuração térmica em elementos de grandes dimensões e contribui para o ganho de resistência a longo prazo. Por outro lado, Santos et al. (2023), ao analisarem cimentos produzidos com resíduo de cimento-amianto (RCA), verificaram maior liberação de calor nas primeiras horas de hidratação, associada ao aumento do teor de alita (C3S) nos clínqueres modificados. Esse comportamento indica uma aceleração inicial do processo de hidratação e uma elevação do calor total acumulado em idades iniciais.

Conforme relatado por Müller (2023), parte da aceleração das reações pode ser atribuída ao efeito de nucleação de partículas finas, que favorece a precipitação dos produtos de hidratação e reduz o tempo de indução. Dessa forma, a análise calorimétrica não apenas permite compreender a intensidade das reações químicas do clínquer, mas também possibilita inferir o desempenho térmico, mecânico e a influência das adições minerais nos sistemas cimentícios. Em síntese, o estudo do calor de hidratação é essencial para o desenvolvimento de materiais mais estáveis, duráveis e energeticamente eficientes, principalmente quando se busca incorporar resíduos industriais ao processo de fabricação do cimento Portland.

## **2.5 Uso de resíduos cerâmicos na formulação do clínquer**

Diversos estudos têm investigado a viabilidade de incorporar resíduos industriais no processo de fabricação do cimento, visando reduzir o consumo de recursos naturais e mitigar impactos ambientais (RAMBALDI et al., 2007; WANG et al., 2021; KE et al., 2016). Embora muitos trabalhos analisem o uso desses resíduos como adição mineral ao cimento, poucos avaliam seu uso direto na formulação do clínquer (DAL BÓ et al., 2021).

Os resultados existentes demonstram efeitos relevantes: Andreola (2010) identificou aumento da resistência à compressão, Bignozzi e Bonduà (2011) observaram modificações na microestrutura e na difusão de cloretos, e Pelisser (2012) verificou reações pozolânicas que formam novos silicatos hidratados. Tais evidências reforçam o potencial técnico e ambiental do reaproveitamento do resíduo de polimento e retífica de porcelanato na indústria cimenteira.

## **2.6 Sustentabilidade e economia circular na indústria cimenteira**

A adoção de modelos produtivos sustentáveis é um dos grandes desafios do setor da construção civil. A aplicação dos princípios da economia circular, segundo a Ellen MacArthur Foundation (2015), busca manter o valor dos materiais e produtos pelo maior tempo possível, minimizando a extração de novas matérias-primas e o descarte de resíduos.

Na indústria do cimento, a substituição parcial de matérias-primas por resíduos cerâmicos reduz as emissões de gases de efeito estufa, promove a valorização de rejeitos industriais e contribui para uma produção mais limpa e eficiente (PELISSER et al., 2012). Dessa forma, o aproveitamento do resíduo de porcelanato não apenas

apresenta viabilidade técnica, mas também representa uma estratégia concreta para o desenvolvimento sustentável.

### 3 METODOLOGIA

As etapas metodológicas envolveram a coleta e preparo das amostras, a formulação dos clínqueres, a clinquerização, a conformação dos corpos de prova de pasta, a realização dos ensaios de caracterização microestrutural e calorimetria.

#### 3.1 Materiais utilizados

As matérias-primas utilizadas na formulação do clínquer foram definidas a partir da caracterização química preliminar do resíduo cerâmico por meio de Fluorescência de Raios X (FRX), ensaio empregado para identificar os teores de óxidos presentes no material e, assim, subsidiar a modelagem composicional das misturas experimentais.

O resíduo de polimento e retífica de porcelanato foi fornecido por uma empresa fabricante de porcelanatos da região sul de Santa Catarina. O resíduo foi submetido aos processos de dispersão e moagem a úmido, seguido de secagem em estufa até completa remoção da umidade, garantindo homogeneidade e estabilidade para as etapas subsequentes.

Além da caracterização química, realizou-se também a análise granulométrica por difração a laser, visando determinar a distribuição de tamanho das partículas do resíduo cerâmico e estabelecer sua adequação quanto à finura e comportamento reativo durante a clinquerização. O ensaio foi conduzido em um granulômetro Cilas 1064, equipamento de difração a laser amplamente utilizado na caracterização de materiais particulados, com faixa granulométrica de 0.04  $\mu\text{m}$  - 500.00  $\mu\text{m}$  / 100 classes, ultrassom 60 s e concentração 176 g/L. As amostras foram previamente dispersas em álcool e submetidas a ultrassom por 5 min para assegurar adequada desaglomeração.

Com base nos resultados obtidos via FRX, granulometria e considerando as proporções típicas dos óxidos formadores do clínquer Portland, optou-se pela utilização de calcário calcítico ( $\text{CaCO}_3$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de ferro ( $\text{FeO}$ ) como matérias-primas precursoras, além da adição posterior de 4% em massa de gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), empregado como regulador do tempo de pega.

Para definição das proporções ótimas dos componentes, realizou-se a modelagem composicional em planilha eletrônica usando a ferramenta *Solver*. Os teores mássicos dos óxidos presentes em cada matéria-prima foram expressos em percentual de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e  $\text{CaO}$ . Na sequência, aplicou-se as equações de Bogue para estimar teoricamente a formação das principais fases mineralógicas do clínquer, como a Alita (C3S), Belita (C2S), aluminato tricálcico (C3A) e ferroaluminato tetracálcico (C4AF), assegurando conformidade com as características químico-mineralógicas esperadas para clínquer tipo Portland.

O método de otimização visou minimizar a divergência entre os valores calculados e os valores-alvo dos percentuais de Alita (C3S), Belita (C2S), aluminato tricálcico (C3A), ferroaluminato tetracálcico (C4AF) e também dos módulos químicos: Índice de saturação da cal (LSF), módulo de sílica (SR) e módulo alumina-ferro (AR). Nessas simulações, os teores de substituição do resíduo de polimento foram fixados em 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. A Tabela 1 apresenta os valores-alvo utilizados, extraídos de Oliveira Júnior (2020).

Tabela 1: Parâmetros de otimização.

PARÂMETROS (Módulo ou Razão)	OBJETIVO
Índice de Saturação de Cal (LSF)	92
Módulo de Sílica (SR)	2,5
Módulo de Alumina-ferro (AR)	1,5
Alita (C3S)	56
Belita (C2S)	20
Aluminato Tricálcico (C3A)	9
Ferroaluminato Tetracálcico (C4AF)	10

Fonte: Adaptado de Oliveira Júnior (2020)

Após as simulações realizadas na planilha eletrônica as seguintes formulações finais são mostradas na Tabela 2:

Tabela 2: Composições das misturas com diferentes teores de resíduo cerâmico.

Matéria-prima / Percentual de resíduo	0%	5%	10%	15%	20%
Resíduo polimento porcelanato (g)	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0
Calcário calcítico (g)	162,2	161,4	160,6	159,8	159,8
Quartzo (g)	26,6	20,4	13,0	6,4	0,0
Alumina (g)	7,0	4,6	3,2	1,2	0,0
Óxido de ferro (g)	4,2	3,6	3,0	2,6	0,2

Fonte: O autor.

### 3.2 Processo de clinquerização

As matérias-primas foram pesadas em balança semi-analítica e homogeneizadas manualmente com auxílio de almofariz e pistilo, conforme figura 1, garantindo distribuição uniforme dos constituintes sólidos e minimizando heterogeneidades na fase de queima.

Figura 1 – Mistura homogeneizada de matérias-primas e pronta para o forno de clinquerização.



Fonte: O autor

Em seguida, a mistura foi submetida ao processo de clinquerização utilizando um forno ForteLab 1700 °C (Figura 2). O aquecimento foi realizado inicialmente com uma taxa de 15 °C/min desde a temperatura ambiente até 900 °C, permanecendo por 30 min nesta temperatura para garantir a completa calcinação. Posteriormente, aplicou-se uma taxa de aquecimento de 5 °C/min até atingir 1500 °C, com permanência adicional de 30 minutos na temperatura máxima. O resfriamento da amostra ocorreu dentro do próprio forno por convecção natural.

Figura 2 – Forno de clinquerização.



Fonte: O autor

Após o resfriamento, o material obtido, elucidado na figura 3, foi destorroado manualmente com o auxílio de almofariz e pistilo, e moído em moinho planetário a 400 rpm até atingir granulometria passante na peneira de malha #200 mesh, assegurando a granulometria adequada para o processo de hidratação subsequente

Figura 3 – Produto sólido obtido após o processo de clinquerização no forno.



Fonte: O autor

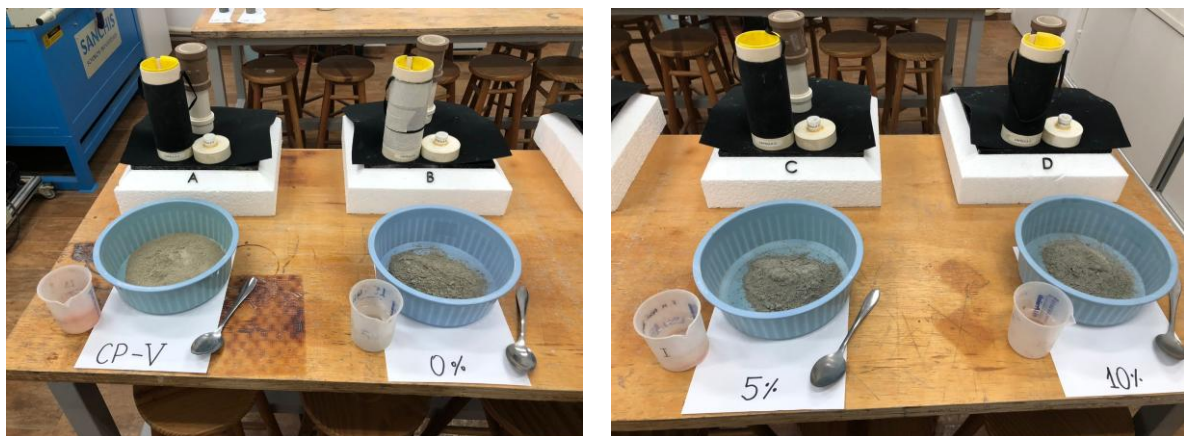
### 3.3 Ensaio de calor de hidratação

Uma fração de 4% em massa de gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) foi usada como regulador do tempo de pega. A homogeneização entre o clínquer e gesso consistiu em: mistura manual em almofariz, passagem do material em peneira de #60 mesh; moagem em moinho planetário durante 30 s; e nova passagem em peneira #60, a fim de garantir distribuição uniforme do sulfato de cálcio e evitar aglomerações.

Os parâmetros experimentais foram definidos com o objetivo de garantir padronização das condições de ensaio e reprodutibilidade dos resultados. Para a produção das pastas cimentícias, adotou-se relação água/cimento (a/c) igual a 0,50, valor usual em estudos de hidratação e adequadamente representativo para avaliação calorimétrica.

Após a preparação do clínquer, realizou-se o ensaio de calorimetria semi-adiabática com o objetivo de quantificar o calor de hidratação liberado ao longo do processo de hidratação. Esse processo se iniciou com a preparação, pesagem e organização dos materiais (Figura 4).

Figura 4 - Materiais prontos organizados para início do ensaio.



Fonte: O autor

Além dos clínqueres desenvolvidos nesse projeto, com 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, foram também realizadas as calorimetrias do cimento Portland comercial CP V-ARI e do cimento Portland CP III como referência.

Antes do início das medições, o calorímetro e os materiais foram mantidos em aclimatação por 24 h em ambiente controlado a  $23 \pm 2$  °C, garantindo condições térmicas estáveis e reprodutibilidade dos ensaios. Os clínqueres permaneceram armazenados em dessecador contendo sílica gel durante todo o período que antecedeu o ensaio de hidratação, com o objetivo de controlar a umidade e preservar suas características físico-químicas.

Para cada amostra, foi pesado clínquer 230 g de clínquer moído, assim como 115 g de água destilada, respeitando a relação a/c de 0,5. Após o contato inicial entre os componentes, procedeu-se à homogeneização manual da pasta (Figura 5), durante aproximadamente 2 min. Em seguida, pesou-se e ajustou-se a massa total da pasta homogênea, apresentada na figura 6, para 300 g, assegurando padronização entre as cápsulas.

Figura 5 - Processo homogeneização manual da pasta



Fonte: O autor

Figura 6 - Pasta após homogeneização.



Fonte: O autor

Imediatamente após a mistura, a pasta, ainda no estado fresco, foi inserida e adensada nas cápsulas (Figura 7). O peso e o tempo de processamento foram mantidos constantes, 300 g e 5 min. Em seguida as cápsulas foram depositadas, no calorímetro de modelo apresentado na figura 8, e em seguida as sondas, previamente calibradas, foram inseridas no centro das amostras. O tempo zero do ensaio foi registrado no momento da adição da água e, simultaneamente, no instante da inserção das sondas para garantir a rastreabilidade do início da hidratação.

Figura 7 - Pesagem da pasta para garantir padronização



Fonte: O autor

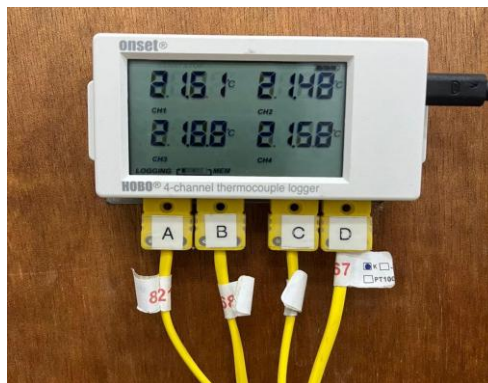
Figura 8 - Calorímetro semi-adiabático.



Fonte: O autor

A leitura das temperaturas no interior das amostras foi acompanhada por um Datalogger Onset, modelo é HOBO 4-Channel Thermocouple Logger, conforme figura 9, usado para registrar temperaturas a partir de até quatro termopares (indicados pelos canais A, B, C e D), permitindo monitorar simultaneamente diferentes pontos de medição com alta precisão. O registro foi feito durante 168 h (7 dias), permitindo a obtenção completa da curva de evolução do calor de hidratação.

Figura 9 - Datalogger



Fonte: O autor

### 3.4 Análise microestrutural

Após a conclusão do ensaio de calorimetria, os corpos de prova foram preparados para análise microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), acoplada à Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS), com o objetivo de caracterizar a morfologia das partículas hidratadas e identificar a distribuição elementar das fases formadas durante o processo de hidratação.

As análises foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura Hitachi TM4000Plus, equipado com fonte de elétrons de tungstênio (W) e operado com tensão de aceleração de 15 kV. Os aumentos empregados variaram entre 50x e 1500x.

Para a caracterização química elementar, utilizou-se um sistema de EDS Bruker, modelo XFlash, acoplado ao MEV. O equipamento permitiu a detecção qualitativa e semiquantitativa dos principais elementos presentes nas amostras, possibilitando a identificação das fases formadas e a correlação com os resultados calorimétricos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Composição química

A composição química obtida por Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) indicou que o resíduo cerâmico é constituído majoritariamente por sílica ( $\text{SiO}_2 = 65,8\%$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 18,9\%$ ), e teores de óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 5,2\%$ ) e potássio ( $\text{K}_2\text{O} = 1,8\%$ ), além de pequenas quantidades de  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{MgO}$ .

Tabela 3: Determinação da composição química do resíduo de polimento de porcelanato.

ÓXIDOS	TEOR (%)
SiO <sub>2</sub>	65,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,2
K <sub>2</sub> O	1,8
CaO	1,4
TiO <sub>2</sub>	0,8
MgO	0,7
Demais	0,5
P.F.*	5,0
<b>Total</b>	<b>100,0</b>

\*P.F.: Perda ao fogo a 1000°C.

Fonte: O autor

Essa composição é típica de materiais de natureza silico-aluminosa, com elevado teor de sílica e baixa concentração de cálcio, o que, segundo Pelisser et al. (2012) e Rambaldi et al. (2007), caracteriza materiais com potencial pozolânico. Pelisser, Steiner e Bernardin (2012, p. 2370) relataram que resíduos de polimento de porcelanato contendo mais de 60% de SiO<sub>2</sub> e cerca de 20% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> apresentam comportamento reativo quando incorporados a sistemas cimentícios, participando das reações de formação de C–S–H secundário.

Embora o resíduo cerâmico avaliado apresente esse potencial, sua efetiva participação nas reações depende das condições de queima e da presença de fases vítreas reativas. Segundo Andrade (2008), materiais predominantemente silicosos, quando finamente moídos, podem atuar tanto como adições pozolânicas, quanto como agentes fundentes, favorecendo o desenvolvimento de fases de alta reatividade durante a clinquerização.

#### 4.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica, realizada por difração a laser, permitiu avaliar a distribuição de tamanhos de partículas do clínquer comercial CPV e do resíduo cerâmico de polimento e retífica de porcelanato. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4: Determinação da distribuição de tamanho de partículas.

Parâmetro	Clínquer comercial CP-V	Resíduo de polimento
10% das Partículas (µm)	1,5	1,0
50% das Partículas (µm)	13,5	5,5
90% das Partículas (µm)	34,5	24,1
100% das Partículas (µm)	71,0	71,0
<b>Observação</b>	Amostras dispersas em álcool PA no ultrassom por 5 min	

Fonte: O autor

A granulometria do clínquer comercial CPV foi determinada com o objetivo de comparar o material adquirido comercialmente com o critério adotado no presente

estudo para a moagem laboratorial, partículas passantes na peneira #200 (75  $\mu\text{m}$ ), recomendação frequentemente adotada em pesquisas experimentais envolvendo clínquer sintetizado (NEVILLE, 2016). O valor máximo observado ( $\approx 71 \mu\text{m}$ ) confirma a compatibilidade entre o CPV e a metodologia usada neste trabalho para a elaboração dos clínqueres.

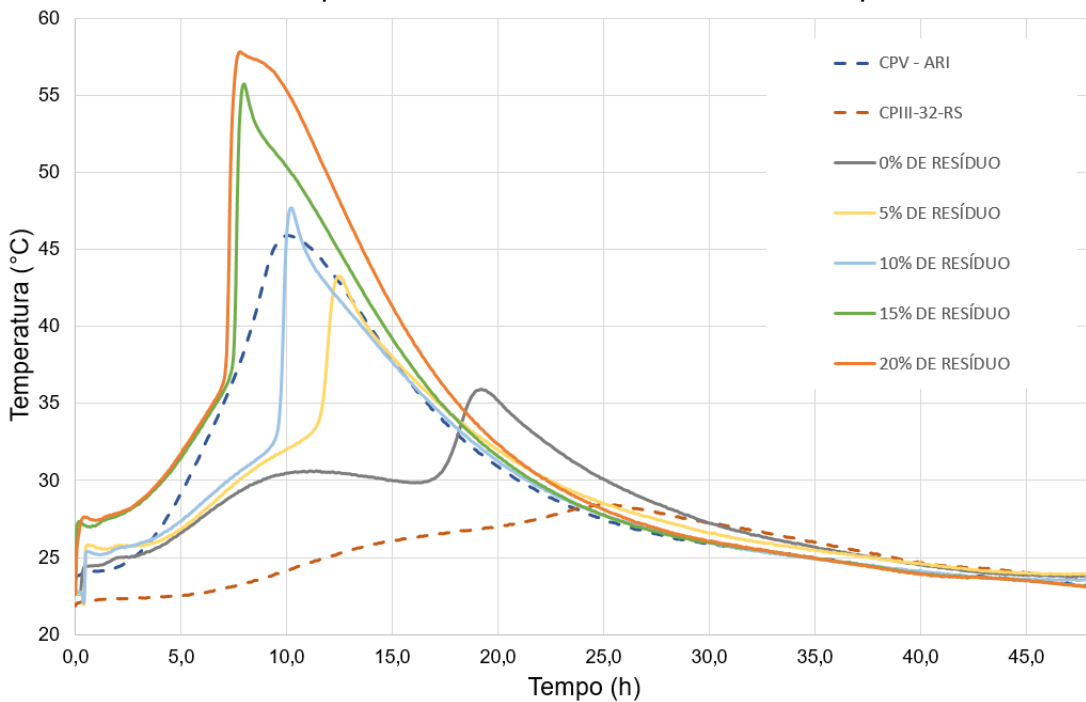
Por outro lado, a análise granulométrica do resíduo de polimento teve como finalidade estudar a sua distribuição granulométrica, fator este que está diretamente relacionado com a reatividade das partículas durante a clinquerização. O resíduo apresentou D50 igual a 5,5  $\mu\text{m}$ , caracterizando um material consideravelmente fino. Estudos prévios reportam valores semelhantes: Steiner (2014) encontrou D50 próximo de 6  $\mu\text{m}$  para resíduos de polimento; Purificação (2009) identificou partículas predominantemente abaixo de 10  $\mu\text{m}$ ; Pelisser, Steiner e Bernardin (2012) destacam que resíduos finos aumentam a superfície de contato entre os componentes, favorecendo o início das reações em matrizes cimentícias.

Assim, a avaliação granulométrica reforça que o resíduo utilizado neste estudo possui finura comparável à reportada na literatura, podendo influenciar a microestrutura final do clínquer e seu comportamento térmico durante a hidratação.

### **4.3 Calorimetria semi-adiabática**

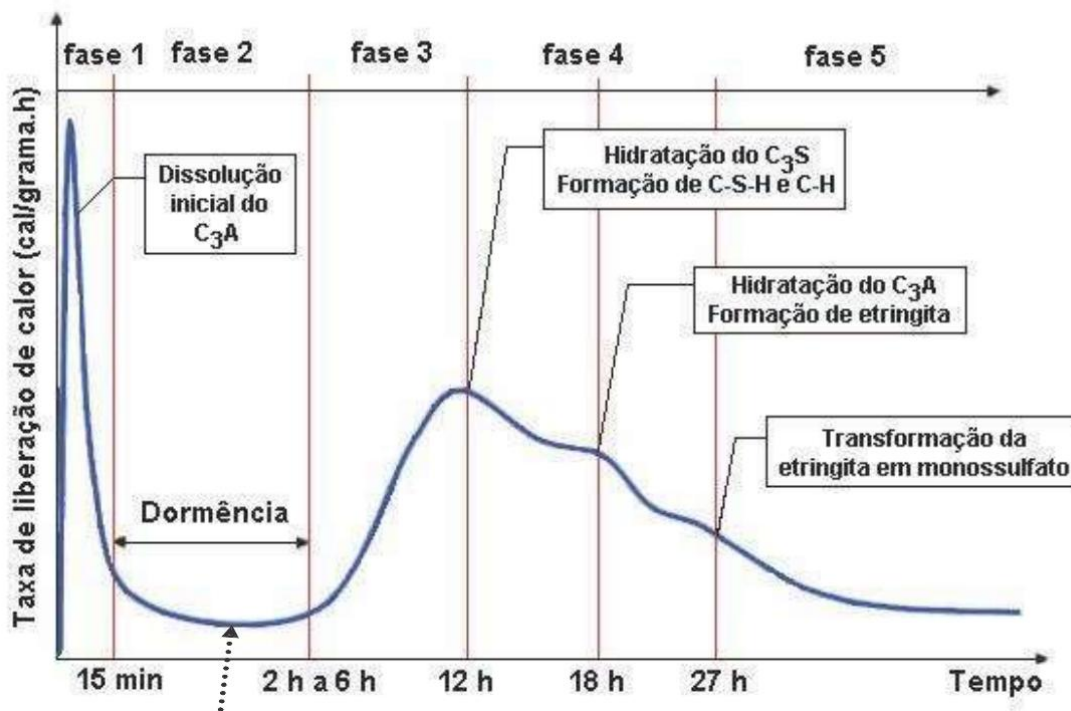
A análise calorimétrica semi-adiabática foi realizada com o objetivo de avaliar o comportamento térmico das reações de hidratação dos clínqueres produzidos em laboratório, contendo diferentes teores de resíduo cerâmico (0%, 5%, 10%, 15% e 20%). Para interpretação dos resultados, expressos na figura 10, utilizou-se como base o modelo cinético clássico descrito por Neville e Brooks (2013) e detalhado também por Andrade (2008), no qual a evolução térmica da hidratação do cimento é dividida em quatro fases principais: dissolução, indução, aceleração e desaceleração. Essas etapas encontram-se representadas na literatura conforme ilustrado na Figura 11 e descritas a seguir:

Figura 10: Comportamento da temperatura com o tempo de hidratação das amostras de clínquer com diferentes teores de resíduo porcelânico.



Fonte: O autor

Figura 11: Fases da hidratação do cimento.



Fonte: Adaptado de Neville e Brooks (2013) e Andrade (2008).

De acordo com Neville e Brooks (2013), a fase de dissolução corresponde a um pico muito rápido de liberação de calor, provocado pela dissolução imediata do C3A e pela reação inicial do C3S. Essa etapa ocorre em intervalo inferior a dez

minutos, tempo médio do processo de mistura a adensamento da pasta, que ocorre fora do calorímetro semi-adiabático. Assim, a porção inicial da curva, correspondente ao pico de dissolução, não pôde ser registrada experimentalmente. Desse modo, as curvas obtidas iniciam-se já na transição para a fase de indução, sem prejuízo para a análise global da cinética de hidratação.

A fase de indução, também denominada período de dormência, caracteriza-se pela estabilização temporária da taxa de calor, conforme descrito por Neville e Brooks (2013) e Andrade (2008). Esse comportamento foi observado nas curvas experimentais (Figura 10) como um trecho inicial de temperatura praticamente constante, indicando a reorganização dos íons em solução e a manutenção da trabalhabilidade da pasta.

A fase de aceleração é marcada pelo crescimento do gel C–S–H e pela intensificação das reações do C3S, resultando no pico principal de temperatura. Nos resultados obtidos (Figura 10), verificou-se que o aumento do teor de resíduo cerâmico promoveu um incremento progressivo do pico térmico, indicando maior taxa de hidratação. Esse comportamento difere do observado em adições pozolânicas tradicionais, que geralmente reduzem o calor liberado (PELISSER et al., 2012). Tal resultado sugere que o resíduo de polimento de porcelanato atuou favorecendo a reatividade inicial do sistema, possivelmente em função de sua elevada finura e da presença de óxidos fundentes ( $K_2O$  e  $Fe_2O_3$ ) identificados por FRX.

As amostras com 5% e 10% de resíduo apresentaram curvas muito próximas ao comportamento do cimento CPV-ARI, indicando cinética semelhante à de um cimento de alta reatividade. Por outro lado, as formulações com 15% e 20% exibiram picos térmicos superiores aos do CPV, evidenciando reações exotérmicas intensificadas. Essa tendência está alinhada com observações de Müller (2023), que indicam que partículas minerais finas podem favorecer o desenvolvimento acelerado das fases hidratadas, resultando em um processo de hidratação mais rápido.

Após o pico térmico, as curvas passam para a fase de desaceleração, caracterizada pela redução gradual da taxa de hidratação, resultante do espessamento progressivo das camadas de C–S–H que recobrem os grãos de clínquer. Esse comportamento é observado de maneira consistente em todas as curvas experimentais, indicando que, apesar da intensificação inicial promovida pelo resíduo cerâmico, o sistema retorna ao regime difusional típico dos processos de hidratação. Nota-se ainda que as formulações com teores mais elevados de resíduo apresentam uma desaceleração ligeiramente mais prolongada, possivelmente associada a maior disponibilidade inicial de núcleos reativos e à formação mais rápida de produtos de hidratação.

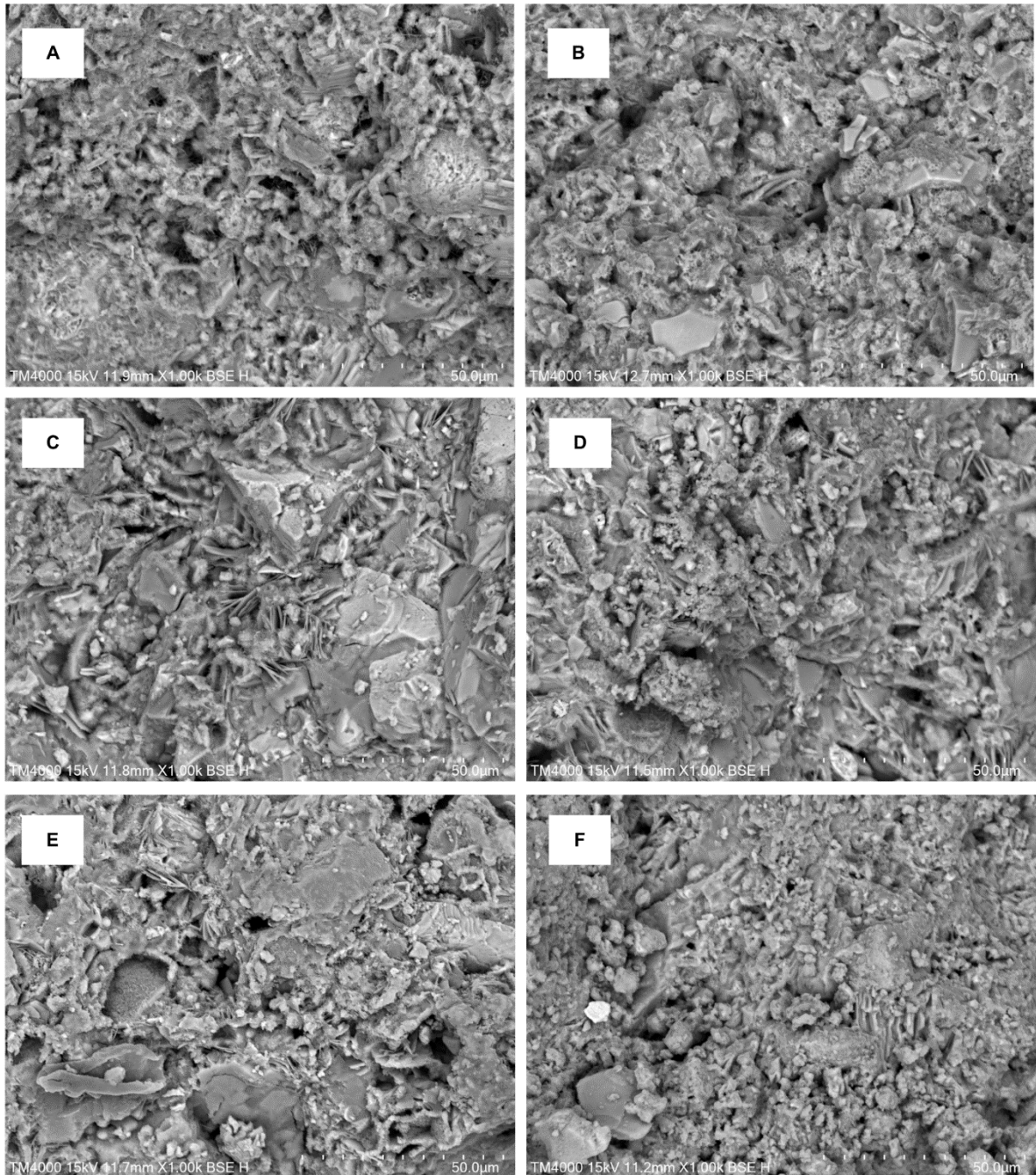
Por fim, ao relacionar o comportamento térmico com os resultados de FRX, observa-se que a presença de sílica e óxidos fundentes ( $K_2O$  e  $Fe_2O_3$ ) no resíduo de porcelanato pode ter influenciado tanto a etapa de formação do clínquer quanto sua resposta reativa durante a hidratação. Esses componentes favorecem a formação de fase líquida durante a clinquerização e a estabilização de fases cristalinas relevantes (como Alita e Belita), o que contribui para explicar o aumento da reatividade e a liberação de calor nas amostras com maior teor de resíduo.

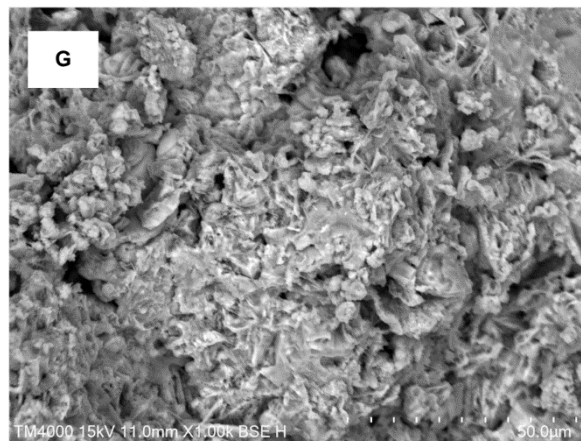
Dessa forma, os dados calorimétricos reforçam o potencial do resíduo cerâmico como material alternativo capaz de intensificar as reações iniciais de hidratação, sem comprometer o comportamento cinético global do clínquer.

#### 4.4 Análise microestutural das pastas

As análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permitiram observar a microestrutura das amostras com distintos teores de resíduo cerâmico. As micrografias apresentadas nas Figuras 12 mostram que, de modo geral, não houve diferenças microestruturais perceptíveis entre CPV, CPIII e as amostras com 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de resíduo analisados, indicados respectivamente pelas letras A, B, C, D, E, F e G. As superfícies analisadas apresentaram morfologia semelhante, característica de produtos de hidratação já formados, sem variações marcantes.

Figuras 12: Microestrutura das amostras de clínqueres fabricados com resíduo de porcelanato.





Fonte: O autor

Importante destacar que não foram observadas partículas remanescentes com composição típica do porcelanato. Isso indica que o resíduo incorporado reagiu completamente durante o processo de clínquerização, integrando-se às fases cristalinas formadoras do clínquer. Assim, a hipótese adotada é de que o resíduo tenha sido totalmente consumido na formação de fases cristalinas como a C3S, C3A e C2S, o que explica a ausência de fragmentos cerâmicos distintivos na microestrutura.

A análise elementar obtida por Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) permitiu quantificar os principais elementos presentes nas amostras, conforme apresentado na Tabela 5. Os resultados indicam aumento progressivo do teor de cálcio (Ca) com o aumento do teor de resíduo, variando de 35,3% (0% de resíduo) para 41,4% (20% de resíduo). Embora não tenham sido observadas diferenças microestruturais relevantes, essa variação química ajuda a explicar os comportamentos térmicos distintos registrados na calorimetria.

Tabela 5: Composição química semi-quantitativa em massa das amostras estudadas.

Elemento / Tipo clínquer	CPV	CPIII	0% Resíduo	5% Resíduo	10% Resíduo	15% Resíduo	20% Resíduo
O (% wt.)	58,3	58,6	54,4	53,1	56,0	52,9	50,7
Ca (% wt.)	30,3	30,4	35,3	34,8	33,6	39,8	41,4
Si (% wt.)	7,8	8,1	6,4	6,2	6,1	4,9	5,0
Al (% wt.)	2,2	2,4	2,4	3,5	3,0	1,5	2,5
Fe (% wt.)	1,4	0,6	1,6	2,5	1,3	0,9	0,5
<b>Total (% wt.)</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

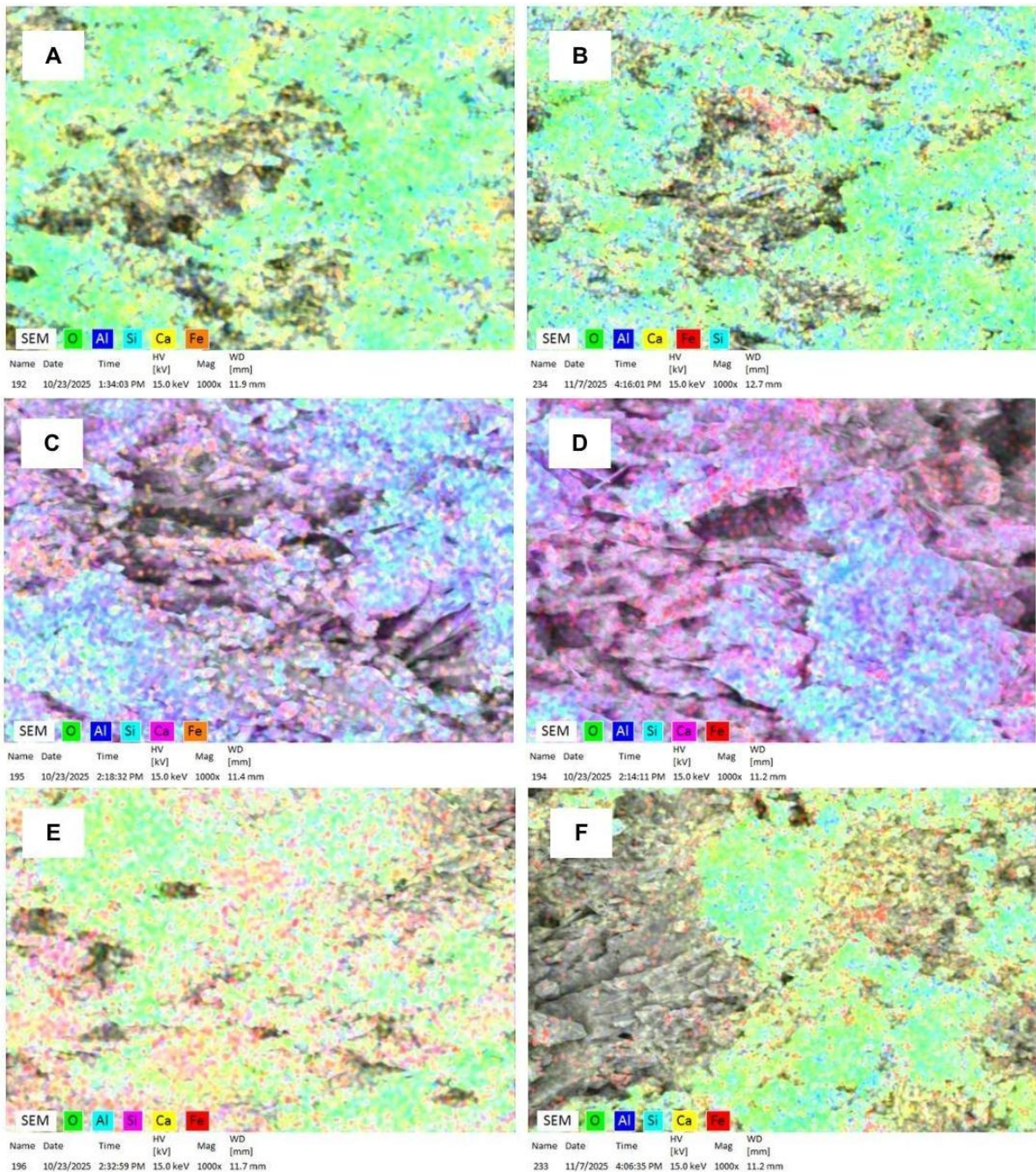
Fonte: O autor

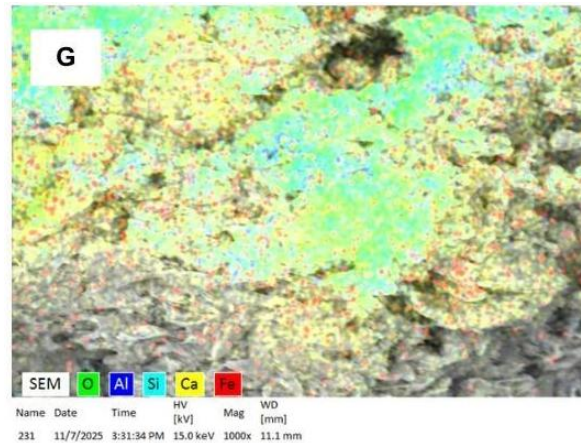
O silício (Si) apresentou tendência de redução à medida que o teor de resíduo aumentou. A razão Ca/Si, portanto, elevou-se de maneira consistente, sugerindo a formação de produtos de hidratação ligeiramente mais ricos em cálcio. Essa mudança química, embora não tenha sido suficiente para gerar diferenças visíveis no MEV, auxilia na interpretação dos resultados calorimétricos, uma vez que o aumento relativo

de Ca pode favorecer reações iniciais de hidratação mais intensas como o C3A e o C3S.

Esses resultados são compatíveis com os mapeamentos químicos realizados (Figura 13), que mostraram maior intensidade de Ca nas formulações com maiores teores de resíduo e distribuição relativamente homogênea de Si em todas as amostras. De modo semelhante, Pelisser, Steiner e Bernardin (2012) relataram variações químicas associadas ao uso de resíduos cerâmicos finos sem alteração significativa na microestrutura observada nas primeiras idades.

Figura 13 - Mapeamento químico obtido das amostras de clínquer com diferentes teores de resíduo cerâmico





Fonte: O autor

Por fim, os resultados deste estudo mostram que, embora a microestrutura obtida pelo MEV não apresente diferenças relevantes entre as formulações, as análises químicas e os ensaios de calorimetria semi-adiabática indicam variações na intensidade das reações iniciais de hidratação, especialmente nas amostras com maior percentual de resíduo. Assim, o comportamento térmico observado está mais relacionado às diferenças químicas entre as formulações, do que a variações microestruturais detectáveis por MEV nas primeiras idades.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho estudou o efeito da substituição de matérias-primas convencionais por resíduo de polimento e retífica de porcelanato sobre o comportamento calorimétrico e microestrutural de clínqueres produzidos em laboratório.

A análise química por FRX revelou predomínio de sílica ( $\text{SiO}_2 \approx 65,7\%$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 18,9\%$ ), indicando potencial para interação com as fases formadoras do clínquer e possível contribuição à reatividade, conforme apontado na literatura para resíduos cerâmicos finos.

Os ensaios de calorimetria semi-adiabática evidenciaram reações de hidratação mais exotérmicas nas amostras com 5% e 10% de substituição, cujos picos de temperatura se aproximaram de cimentos comerciais (CPV-ARI). Esse comportamento indica que o resíduo pode favorecer a reatividade inicial do clínquer, possivelmente associado à finura do material e à presença de óxidos fundentes. Embora não seja possível afirmar a formação específica de fases como alita (C3S) ou aluminato tricálcico (C3A) sem análise mineralógica complementar (como DRX), os resultados sugerem intensificação das reações de hidratação em períodos iniciais.

As análises microestruturais por MEV mostraram microestruturas semelhantes entre as formulações avaliadas, sem diferenças visuais marcantes. Entretanto, os resultados de EDS indicaram incrementos no teor relativo de cálcio e redução no silício conforme aumentou o teor de resíduo, elevando a razão Ca/Si. Essa variação química, mesmo sem alterações microestruturais evidentes nas imagens, auxilia na interpretação do comportamento calorimétrico, reforçando que mudanças químicas sutis podem influenciar a intensidade das reações iniciais de hidratação.

Dessa forma, conclui-se que a substituição de matérias-primas convencionais por resíduo de polimento de porcelanato proporciona comportamento térmico similar ao de clínqueres comerciais (CPV-ARI) para teores intermediários, especialmente 5%

e 10%. Isso reforça o potencial de valorização de resíduos cerâmicos como alternativa sustentável para a indústria cimenteira, contribuindo para redução do impacto ambiental e para o desenvolvimento de materiais alinhados ao conceito de economia circular.

Estudos futuros utilizando técnicas complementares, como difração de raios X e ensaios mecânicos, podem aprofundar a compreensão sobre a influência do resíduo na formação das fases e no desempenho do clínquer.

## REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Sustentabilidade na indústria do cimento**. São Paulo: ABCP, [s.d.]. Disponível em: <https://abcp.org.br>. Acesso em: 6 out. 2025.

ANDRADE, T. **Calorimetria aplicada à hidratação de cimentos Portland: princípios e métodos de análise**. São Paulo: IPT, 2008.

ANDREOLA, F. et al. **Reuse of solid industrial waste as alternative raw materials in Portland cement manufacturing**. *Waste Management*, v. 30, n. 2, p. 311–320, 2010.

BIGNOZZI, M. C.; BONDUÀ, S. **Hardened properties of concretes containing recycled porcelain as aggregate**. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 1, p. 107–114, 2011.

DAL BÓ, M. et al. **Avaliação de resíduos cerâmicos na formulação do clínquer Portland: efeitos termoquímicos e microestruturais**. *Cerâmica*, v. 67, n. 384, p. 1–9, 2021.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy**. London: Ellen MacArthur Foundation, 2015.

GARCIA, D.; OLIVEIRA, I. R.; PANDOLFELLI, V. C. **Reações de hidratação e mecanismos de nucleação no cimento Portland**. *Cerâmica*, v. 53, n. 327, p. 231–245, 2007.

GONÇALVES, J.; ALMEIDA, C. **Fissuração térmica em concretos de grandes volumes**. *Revista Concreto & Construções*, v. 85, p. 42–49, 2015.

KE, G. et al. **Use of ceramic tile polishing residue as supplementary raw material in clinker production**. *Construction and Building Materials*, v. 127, p. 691–700, 2016.

MÜLLER, Anderson Augusto. **Valorização de sólidos finos na produção de argamassas estabilizadas: avaliação termoquímica, reológica e microestrutural**. 2023. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2023.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete technology**. 2. ed. Harlow: Pearson, 2013.

OLIVEIRA JÚNIOR, André Luís de. **Produção e caracterização de eco-clínquer a partir do reaproveitamento de resíduos industriais**. 2020. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

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.

PEREIRA, A. M. **Gestão ambiental na indústria cerâmica: avaliação dos resíduos e destinação adequada**. Curitiba: UTFPR, 2017.

PURIFICAÇÃO, E. B. D. **Estudo do uso de agregados reciclados de concreto e substituição do cimento por resíduo de polimento de porcelanato na produção de piso intertravado de concreto**. 2009. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

RAMBALDI, E. et al. **Recycling of polishing porcelain stoneware residues in ceramic tiles**. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 27, n. 12, p. 3509–3515, 2007.

SANTOS, L. C. **Aproveitamento de resíduos cerâmicos na construção civil**. Florianópolis: UFSC, 2018.

STEINER, L. R. **Efeito do resíduo do polimento de porcelanato como material cimentício suplementar**. Criciúma: UNESC, 2014.

WANG, L. et al. **Recycling of ceramic tile polishing waste as raw material for sustainable clinker production**. *Journal of Cleaner Production*, v. 285, 2021.

## AGRADECIMENTOS

Ser grato é ter a capacidade de perceber o bem que se recebe; é agradecer, não por obrigação, mas por compreender o valor do gesto ou da graça. Convicto de que jamais chegaria a este momento sem pessoas que me apoiassem e me dessem todo o suporte de que necessitava, venho traduzir por meio de breves palavras a minha gratidão.

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, que me manteve firme, me sustentou quando precisei e me concedeu discernimento, sabedoria e persistência. Ele me deu a graça de viver tantos momentos, ao longo destes cinco anos, que levarei comigo por toda a vida.

Agradeço também à minha família e aos amigos. Sem o apoio, o carinho e a presença de cada um, eu não teria concluído a minha jornada acadêmica.

De modo especial, expresso meus agradecimentos aos professores que estiveram comigo nesta fase final, atuando e me auxiliando diretamente na elaboração deste trabalho de conclusão de curso. Minha gratidão à Prof<sup>a</sup>. Me. Giovana Leticia Schindler Milaneze e à Prof<sup>a</sup>. Me. Graziela Olivo Fermo, que conduziram lindamente a disciplina final do curso. Registro, igualmente, minha gratidão ao Prof. Me. Dr. Marcelo Dal Bó e ao Prof. Me. Dr. Anderson Augusto Muller, que não mediram esforços para me auxiliar no desenvolvimento desta pesquisa e deram o seu máximo para que eu também pudesse dar o meu.

Que minha gratidão se estenda, ainda, a todos os demais professores que contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação acadêmica. Serei eternamente grato pela dedicação de cada um de vocês. Nunca duvidem do quanto têm o poder de transformar vidas.

Com o coração repleto de gratidão, alegria e a sensação de missão cumprida, finalizo este trabalho e concluo o curso de Bacharelado em Engenharia Civil no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, instituição na qual estive por anos e onde recebi inúmeras oportunidades que me formaram como profissional e como pessoa.