

UTILIZAÇÃO DE ARGILAS SUBMETIDAS A CALCINAÇÃO *FLASH* COM VISTAS A
REDUÇÃO DOS IMPACTOS NEGATIVOS CAUSADOS PELA FABRICAÇÃO DE CIMENTO
PORTLAND

*Use of clays subjected to flash calcination with a view to reducing the negative impacts caused by the
manufacture of Portland cement*

Gustavo Gutierrez de Oliveira Rodrigues¹, Natália Salamoni², Abrahão Bernardo Rohden³,
Vinicyus Rodolfo Wiggers⁴

Resumo: O cimento Portland é um dos materiais mais importantes para o desenvolvimento da infraestrutura urbana. O seu uso ocorre nos mais variados tipos de obra, desde residências, edificações, pontes, viadutos, estradas, hidrelétricas, ou seja, é praticamente inimaginável construir sem o uso do cimento. Apesar da sua notória importância, a sua fabricação exerce efeitos adversos no meio ambiente, principalmente ao que concerne a emissão de gases de efeito estufa, em conjunto com a alta demanda energética. Neste sentido, buscar soluções para minimizar os impactos negativos é uma premissa necessária no mundo moderno. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de aplicação de uma argila submetida a calcinação flash, quando utilizada como material cimentício suplementar. Para tanto, selecionou-se uma jazida na cidade de Pomerode-SC e a amostra foi submetida a calcinação *flash*, a qual demanda menos energia para operação e dispõe de material calcinado em poucos segundos. Os resultados demonstraram a eficiência do tratamento térmico, o qual possibilitou o seu uso como pozolana.

Abstract: Portland cement is one of the most important materials for the development of urban infrastructure. Its use occurs in the most varied types of work, from homes, buildings, bridges, viaducts, roads, hydroelectric plants, in other words, it is practically unimaginable to build without the use of cement. Despite its notorious importance, its manufacturing has adverse effects on the environment, mainly regarding the emission of greenhouse gases, together with the high energy demand. In this sense, seeking solutions to minimize negative impacts is a necessary premise in the modern world. Therefore, the objective of this work was to evaluate the potential application of a clay subjected to flash calcination, when used as a supplementary cementitious material. To this end, a deposit was selected in the city of Pomerode-SC and the sample was subjected to flash calcination, which requires less energy for operation and has material calcined in a few seconds. The results demonstrated the efficiency of the heat treatment, which enabled its use as pozzolan.

Palavras-chave:

Calcinação Instantânea;
Pozolana; Material
Cimentício Suplementar.

Keywords:

Instant
Calcination; Pozzolana;
Supplementary
Cementitious Material.

¹ Doutorando em Engenharia Ambiental (2022-2026), Mestre em Engenharia Ambiental (2022) e Graduado em Engenharia Civil (2018).

² Doutoranda em Engenharia Ambiental (2023-2027), Mestre em Engenharia Ambiental (2023) e Graduada em Engenharia Civil (2020).

³ Professor Doutor em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade de Blumenau.

⁴ Professor Doutor em Engenharia Química do Departamento de Engenharia Química e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade de Blumenau.

1 INTRODUÇÃO

Um dos materiais mais utilizados no mundo é o cimento Portland. Constata-se que ao longo da história, a sua aplicação se desenvolveu nos mais variados aspectos, principalmente pelas características relacionadas aos vários ambientes em que pode ser aplicado em conjunto com a durabilidade apresentada. A sua utilização se dá nas mais variadas fases da construção, desde as etapas de infraestruturas até o acabamento. Neste sentido, conjecturar uma obra sem a presença de cimento é, praticamente, inimaginável na conjuntura atual.

Por se tratar de um material com aplicação em muitas esferas, o seu volume fabricado alcança grandes proporções em termos mundiais. Estima-se que anualmente são fabricadas cerca de 4,1 bilhões de toneladas em todo o mundo, o qual se trata de um dado de grande relevância. Em termos de Brasil, por se tratar de um país com dimensões continentais e figurar entre os 10 principais produtores de cimento no mundo, os dados de fabricação perpassaram 65 milhões de toneladas em 2022 (CEMBUREAU, 2022).

Ainda que se refira a um dos principais materiais para desenvolvimento da infraestrutura urbana, a fabricação de cimento demanda grandes quantidades de matéria-prima da natureza, em conjunto com um alto consumo energético, resultando em impactos ambientais negativos, principalmente em torno da emissão de gases de efeito estufa.

Diante das intercorrências vistas, sobretudo à cargo dos efeitos negativos, observa-se a necessidade de serem identificadas alternativas para minimizar estes impactos. Para identificação de soluções, a primeira premissa disposta foi a assimilação dos principais causadores dos respectivos impactos. Com base nas características dos materiais utilizados, observou-se que a descarbonatação da rocha calcária em conjunto com o uso de combustíveis fósseis são os principais responsáveis pelas repercussões ambientais da produção de cimento.

Desta forma, prover alternativas para reduzir estes impactos é uma das principais premissas para tornar a indústria do cimento mais limpa. Dentre as alternativas identificadas como propícias, substituir o clínquer por materiais cimentícios suplementares é vista como uma das principais ações frente a esta necessidade. Tal aspecto se dá, sobretudo, em compensar este subproduto essencial para formar o cimento, por opções com menor impacto ambiental. Acerca dos materiais que têm sido utilizados para este objetivo, destaca-se, principalmente, a argila calcinada, pois além de se tratar de um dos únicos materiais capazes de acompanhar a procura por cimento, demanda menos energia para a sua ativação térmica (SCRIVENER et al., 2018).

Arelado a utilização de materiais suplementares visando reduzir o impacto de emissão e a demanda energética causados pela produção de clínquer, o desenvolvimento de tecnologias para os fornos industriais de calcinação tem sido pautado como inevitável para os próximos anos. Um dos caminhos quem tem demonstrado viabilidade executiva de implantação é a substituição dos fornos convencionais (rotativos) por fornos de calcinação instantânea, os chamados calcinadores flash. Estes, por sua vez, demandam cerca de 80% menos energia quando comparado aos fornos convencionais, além de carecer de temperaturas mais baixas (500 – 700 °C), e dispor de baixos tempos de residência (BRIDSON; DAVIES; HARRISON, 1985).

Baseado no exposto, observa-se que o uso de argila calcinada tem se demonstrado como uma das principais alternativas frente a limitada disponibilidade de materiais suplementares na fabricação de cimento. Arelada a esta falta, utilizar a calcinação *flash* como tratamento térmico das argilas surge como um caminho viável de execução. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de aplicação de uma argila submetida a calcinação flash, quando utilizada como material cimentício suplementar.

2 MATERIAIS CIMENTÍCIOS E IMPACTOS AMBIENTAIS NEGATIVOS

Os materiais cimentícios suplementares são utilizados a mais de 4 mil anos com a aplicação em monumentos históricos da Grécia e Roma antigas (NEVILLE, 2016). No entanto, os materiais produzidos e utilizados à época, não seguiam padrões de fabricação aos que se têm ao contexto atual.

Inicialmente, utilizavam-se misturas de gesso calcinado, além de solos oriundos de lavas vulcânicas que endureciam quando em contato com água (PINTÉR; GOSSELIN, 2018). Neste sentido, constata-se que os principais aspectos considerados à época, permeavam o uso e aplicação de materiais que apresentavam poder de aglutinação entre os substratos.

Diante da necessidade de desenvolvimento de materiais que pudessem romper as barreiras de utilização impostas pelos já utilizados, os cientistas da época passaram a buscar o avanço quanto aos novos materiais. Neste sentido, encontrar técnicas viáveis de desenvolvimento e com poder de alcance das necessidades vislumbradas era uma das principais premissas vistas.

Considerado um dos pioneiros no aspecto de fabricação do cimento Portland, Joseph Aspdin concebeu um material oriundo da submissão de tratamento térmico de calcinação de rochas calcárias em agrupamento com argilas, as quais foram transformadas em um pó. Ao entrar em contato com água, esse pó demonstrava reação de solidificação e resistência quando em posterior contato com água. Desta forma, o cimento Portland surgiu, o qual rompeu as barreiras e limites na utilização dos materiais de construção (IGLINSKI; BUCZKOWSKI, 2017).

Com o desenvolvimento tecnológico e avanço na disponibilidade de cimento por todo o mundo, constatou-se que construir sem o uso de cimento é uma praticamente inconcebível, tendo em vista que este demonstra resistência nas mais variadas escalas de solicitação, além de poder ser conformado nas mais vastas geometrias. Desta forma, o cimento passou a ser utilizado em praticamente todas as obras de engenharia e o seu dado de fabricação super a faixa de 4 bilhões de toneladas por ano (CEMBUREAU, 2022).

Para possibilitar o alcance de 4 bilhões de toneladas de cimento é necessário que sejam retiradas toneladas de matéria-prima oriunda da natureza, além de demandar um inovador porte industrial para produção. Atrelado a este conjunto, constatou-se que a produção de cimento exerce inúmeros pontos positivos no desenvolvimento das cidades, contudo, também se observou que a sua produção contribui em considerada escala para degradação ambiental.

O principal degradante ambiental oriundo da fabricação de cimento é a emissão de gás carbônico (CO₂), onde esta respectiva indústria é responsável por cerca de 8 % de todo o mundo. Contudo, vale salientar que este dado pode superar 25 % em meantes de 2050, o que representaria cerca de aumentar em três vezes o percentual emitido dos dias atuais (AKHLAGHI et al., 2017; PROVIS, 2014).

Ao observar os potenciais dados de emissão é importante salientar que estes são vistos como contínuos e progressivos. Neste sentido, dispor de alternativas que podem minimizar os principais efeitos negativos que decorrem da fabricação de cimento é visto como uma vasta necessidade, aja vista os acordos ambientais assinados ao longo dos anos.

Neste sentido, agências internacionais para o desenvolvimento sustentável traçaram objetivos principais para redução da emissão de CO₂ da produção de cimento com o uso de estratégias no próprio campo de atuação. Acerca das atividades, destaca-se a busca por eficiência energética, o uso de combustíveis alternativos, captura e armazenamento de carbono e substituir o clínquer para materiais alternativos (IEA; WBCSD, 2009).

Quanto a eficiência energética, esta atividade é vista com grande desafio de ser implementada, com vista a produção de cimento requerer cerca de 1450 °C para sua produção, em virtude da necessidade de altas temperaturas para mudanças de fases no clínquer. No contexto atual, cerca de 15 % de toda

energia utilizada na indústria fica a cargo da produção de cimento (ALI; SAIDUR; HOSSAIN, 2011).

Vale salientar que este consumo é dividido em energia elétrica e térmica. Em termos de consumo elétrico, a produção atual de cimento demanda cerca de 110 kWh. Contudo, os documentos que preveem a redução no consumo de energia elétrica tratam que este dado deve se enquadrar em torno de 91 kWh. Quanto ao consumo térmico, este apresenta faixa de variação em torno de 3,2 a 6,3 GJ/t produzida. Este dado demonstrada um intervalo com considerada representatividade. Contudo, com a busca por reduzir o consumo, o dado encontrado como limiar de utilização ficou em torno de 3,1 GJ/t (SUPINO et al., 2016; IEA; WBCSD, 2009).

É inevitável tratar de eficiência energética para produção de cimento, contudo é importante considerar que é característico do material que origina o cimento que as suas transformações ocorrem química ocorrem sob altas temperaturas. Diante deste cenário, um dos melhores caminhos identificados é reutilizar o calor gerado durante o processo de calcinação, além da necessidade de as fábricas serem modernizadas ao longo do tempo.

Mediante o conceito de mudança, algumas alternativas tecnológicas têm surgido com o intuito de reduzir o consumo energético. Dentre elas, pode-se destacar a calcinação *flash*, a qual representa um consumo de até 80 % inferior em relação aos fornos rotativos e dispõe de material calcinado em intervalo de poucos segundos (SAN NICOLAS; CYR; ESCADEILLAS, 2013).

A aplicação de calcinação *flash* para produção de material cimentício suplementar tem ganhado destaque ao longo dos anos (SAN NICOLAS, 2011; TEKLAY; YIN; ROSENDAHL, 2016; RODRIGUES et al., 2024) o que demonstra se tratar de uma atividade com poder escalável. No entanto, para que esta demonstre maior poder de mudança, é necessário que sejam implementadas plantas de calcinação *flash* em diversas partes para coleta e minimização dos resultados adversos.

A substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis alternativos tem sido uma realidade na maior parte das plantas cimenteiras. Dentre as principais razões para substituir os combustíveis fósseis por alternativos converge para a ideia de reduzir a emissão de CO₂ causada por estes.

No contexto atual, com o uso de combustíveis fósseis para aquecimento dos fornos, do montante emitido de CO₂, 40 % ficam a cargo dos combustíveis, ou seja, trata-se de um dado de grande representatividade. Dentre as principais razões para o uso de combustíveis é o poder calorífico apresentado por estes, uma vez que os fornos necessitam de altas temperaturas.

Contudo, em virtude pressões para mudanças e reduções nos índices de emissão de gases de efeito estufa, tem-se utilizado os chamados combustíveis derivados de resíduos, ou seja, resíduos que seriam destinados a aterros industriais e que passaram a ser utilizados como combustíveis nos fornos de cimento. Dentre estes, pode-se destacar os resíduos têxteis, resíduos de pneus, plásticos, lodo de esgoto, biomassa, dentre outros (RAHMAN et al., 2015).

O uso de combustíveis alternativos é de grande importância, no entanto, é importante ponderar a respeito da possibilidade de contaminação do cimento quando em contato com tais produtos. A razão desta preponderância converge em os resíduos, por alguma razão de contaminação ou própria composição, liberar composições específicas que podem prejudicar o desempenho do cimento frente as suas solicitações.

Em relação a captura e armazenamento de carbono é vista como a principal alternativa mediante a sua aplicação, a qual se destaca por coletar na própria fonte o principal contribuinte. Contudo, maior parte dos países não dispõe de metodologia especificada para esta atividade, além de dispor de um custo de implantação superior a 354 bilhões de dólares e possibilitaria coletar 56 % do carbono gerado (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018; IEA/WBCSD, 2009).

Considerada como uma das atividades de implementação, a substituição do clínquer do clínquer por materiais alternativos é realizada desde as primeiras elaborações do cimento. A principal razão para esta atividade receber tanto destaque é que esta substitui o principal componente nos aspectos

de emissão de gás carbônico da fabricação do cimento. As normativas brasileiras estabelecem critérios específicos que devem ser atendidos para a sua aplicação, contudo, inúmeros materiais são utilizados com este objetivo, dentre os quais pode-se destacar a escória de alto forno e a cinza volante (ROY; ROYCHOWDHURY; MUKHERJEE, 2018).

No entanto, esses materiais não acompanham o dado crescente de produção de cimento, já que estes dependem de outras atividades industriais para sua existência. Neste sentido, as argilas calcinadas são vistas como um dos únicos materiais capazes de acompanhar o dado de fabricação do cimento (MARAGHECHI et al., 2018).

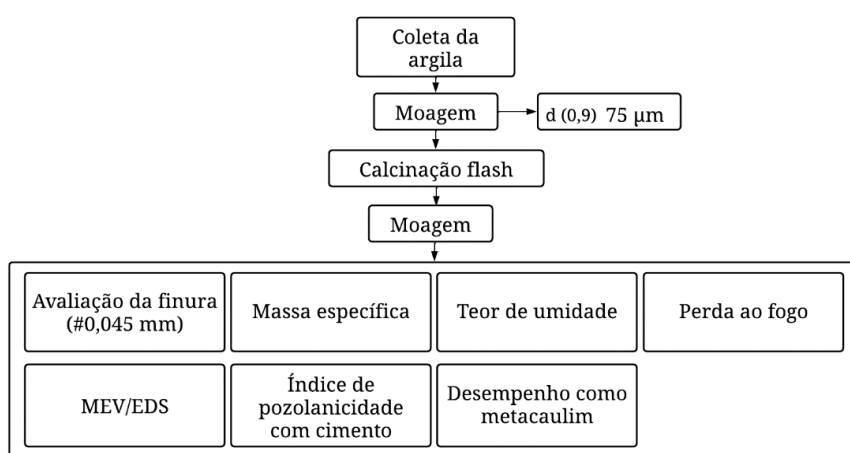
3 METODOLOGIA

Para alcance do objetivo proposto, foi estabelecido o seguinte fluxo de atividades (Figura 1).

Inicialmente, a amostra de argila foi coletada em uma jazida na cidade de Pomerode, no Estado de Santa Catarina. Em seguida, ela foi submetida a secagem em estufa à 100 °C durante 24 h, para remoção da umidade presente e propiciar melhor aproveitamento na fase de moagem, onde o diâmetro de entrada foi definido em d(0,9) igual a 75 µm (RODRIGUES et al., 2024).

Para realização do tratamento térmico, utilizou-se um calcinador flash em escala de bancada, o qual constitui-se de um pré-aquecedor que alcança até 1000 °C e está conectado a um reator tubular, conectado a uma serpentina, um alimentador e *hoopers* de coleta (Figura 2). A temperatura do pré-aquecedor foi definida em 970 °C, a qual refletiu em uma temperatura média no reator tubular em 470 °C, a vazão em 60 l/min, a razão kg de gás quente / kg de sólido igual a 5 e calculou-se o tempo de residência obtendo-se 2 segundos como resposta (RODRIGUES, 2022). Para o estudo em questão utilizou-se nitrogênio como gás para submissão das amostras diante da corrente de ar quente.

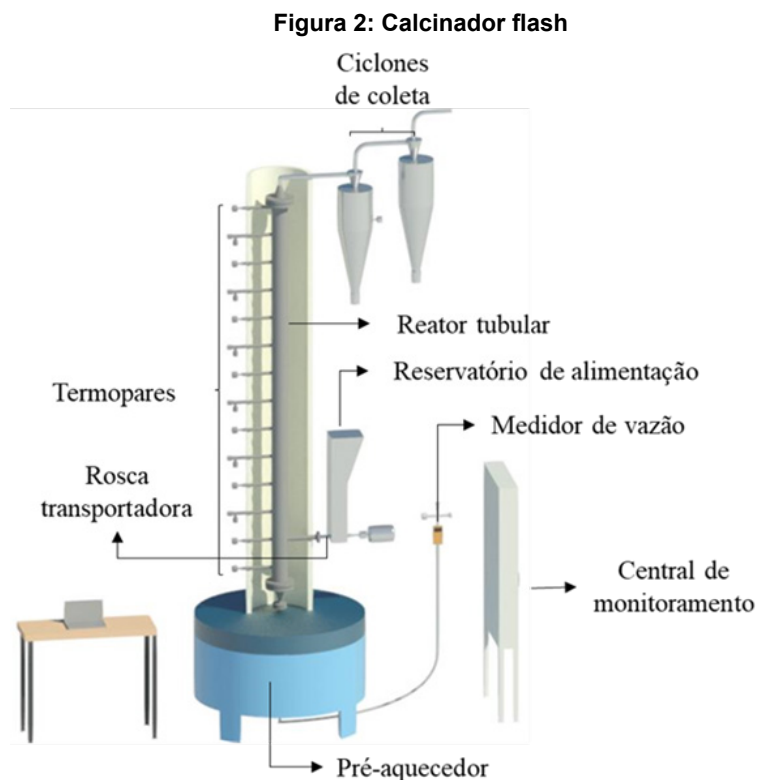
Figura 1: Fluxograma experimental



Fonte: Autores (2023)

Em virtude do aumento da granulometria pós-calcinação, o material calcinado foi submetido a moagem até o instante de atendimento dos limites estabelecidos pelas normas para uso como pozolanas e metacaulim. Em conjunto com a análise granulométrica, realizaram-se os ensaios de massa específica (DNER-ME 093 (MT, 1994)), perda ao fogo (NBR NM 18 (ABNT, 2012)), teor de umidade (NBR NM 24 (ABNT, 2003)), caracterização morfológica e semiquantitativa com o uso do MEV/EDS, pozolanicidade com cimento (NBR 5752 (ABNT, 2014)) e desempenho como metacaulim

(NBR 15894-2 (ABNT, 2010a)).



Fonte: Rodrigues (2022)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De posse dos resultados dos ensaios realizados, foi possível avaliar acerca da possibilidade de uso da argila estudada como material cimentício suplementar quando submetida a calcinação flash (Tabela 1). Em virtude de as normas apresentarem valores máximos que os materiais devem apresentar, os resultados foram avaliados conforme os requisitos normativos.

O atendimento aos requisitos tratados nas normativas vigentes é uma das principais exigências para possibilitação do uso dos respectivos materiais. Por se tratar de materiais que irão substituir o principal componente da produção de cimento, o atendimento dos princípios mínimos de características devem ser atendidos, principalmente em relação ao cimento se tratar de um material durável e utilizado em obras das mais vastas magnitudes.

Tabela 1: Resultados dos ensaios de caracterização

Ensaio	Amostra	Resultado	Pozolana*	Metacaulim*
Finura (#0,045 mm)	Argila calcinada	8%	≤ 20%	≤ 10%
Massa específica (g/cm ³)		2,53	-	-
Umidade (%)		1,80	≤ 3,0	≤ 2,0
Perda ao fogo (%)		2,81	≤ 10	≤ 4,0

*NBR 12653 (ABNT, 2015) para Pozolana; ** NBR 15894-1 (ABNT, 2010b) para Metacaulim

Fonte: Autores (2023)

Quanto aos requisitos previstos em norma, o grau de finura em análise na peneira 45 μm é um aspecto de grande relevância, principal por a área superficial do material contribuir sobremaneira no grau de hidratação da matriz (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Neste aspecto, as normativas estabelecem valores específicos, tanto para as pozolanas quanto para os materiais com possibilidade de uso como metacaulim.

Em relação ao percentual retido na peneira 45 μm , o material estudado em questão apresentou resultado possível de ser utilizado como pozolanas e metacaulim, pois o mesmo se encontrou inferior a 10 %, o qual representa que a moagem empregada foi eficiente. O resultado corrobora com outros trabalhos que propuseram o uso de argilas calcinadas como material cimentício suplementar (SHAH et al., 2018; MARTHO, 2016; TIRONI et al., 2014).

Acerca do resultado obtido para umidade, as normas brasileiras preveem requisitos de dados específicos para o percentual demonstrado e este não deve ser superior a 3 % para pozolana e 2 % para metacaulim. A argila calcinada estudada demonstrou um resultado de umidade igual a 1,80 %, ou seja, inferior aos determinados pelos critérios nacionais para usos em ambos os produtos. Vale ressaltar que, em comparação a trabalhos de semelhança proposição científica, os resultados foram similares (CHEN et al., 2021; ARSLAN et al., 2020).

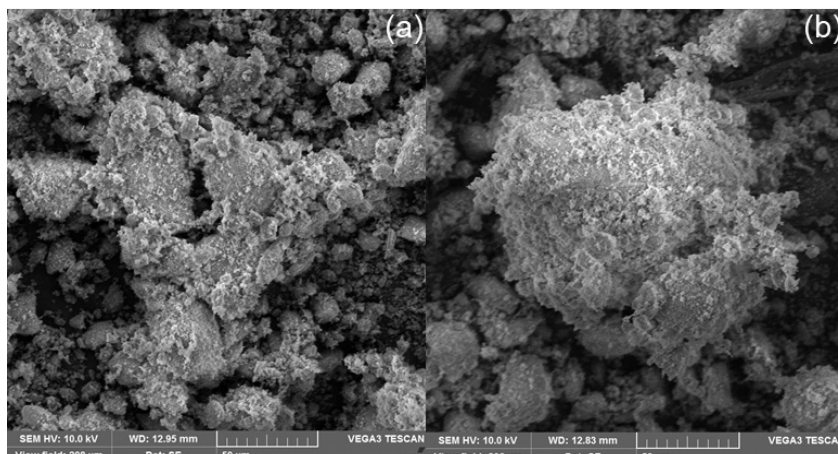
Ao observar os resultados de perda ao fogo, o qual as norma prevê dado inferior a 4 % para uso como pozolanas, a amostra calcinada demonstrou inferioridade, ou seja, tal resultado comprova que ocorreu reação química e demonstrou suficiência para atendimento, tanto para uso como pozolanas quanto para metacaulim.

Quanto a caracterização no MEV, pode-se observar as partículas das argilas antes e após a calcinação na Figura 3. Ao compará-las, constatou-se que as principais diferenças ficaram à cargo de maior aglomeração de partículas por parte da amostra calcinada. O aspecto de aglomeração é observado na literatura (MAIER; BEUTNER; THIENEL, 2021) e dentre as principais razões para essa ocorrência é a remoção forçada das hidroxilas contidas na argila, a qual promove pequenas explosões e facilita a relação de atração eletrostática entre elas. Salienta-se que com este efeito a área superficial altera, o que propicia a possibilidade de desenvolvimento de novos produtos de hidratação.

De forma conjunta as análises no MEV, realizou-se a composição semiquantitativa dos compostos químicos contidos na argila, através do EDS. Conforme retratado nos mais vastos trabalhos divulgados na literatura, os principais componentes contidos nas amostras são óxidos de silício (SiO_2), alumínio (Al_2O_3) e ferro (Fe_2O_3). Neste sentido, o resultado obtido correspondeu a 45% de SiO_2 , 37% de Al_2O_3 e 18% de Fe_2O_3 para ambas as amostras.

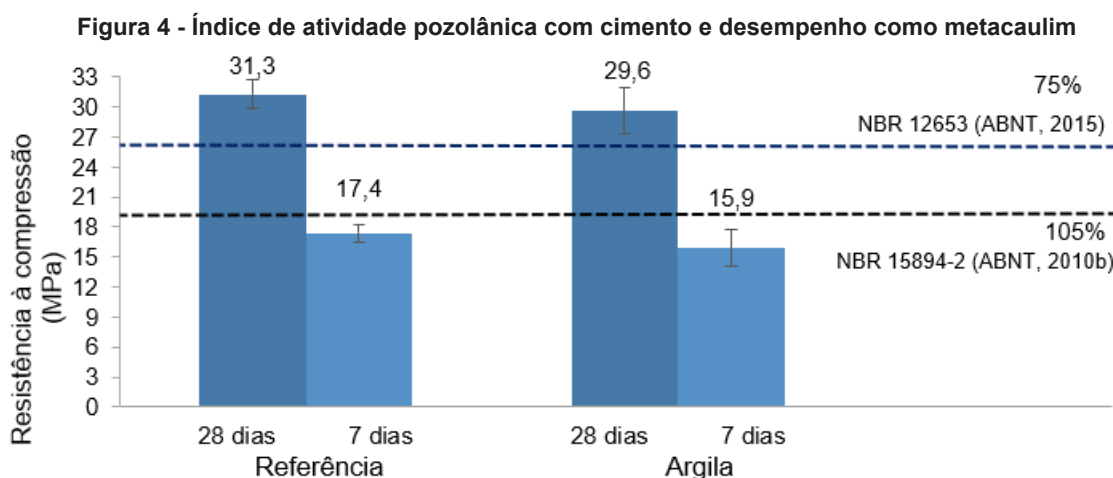
Os dados confirmam a possibilidade de uso como pozolanas, através do requisito trazido na NBR 12653 (ABNT, 2015) em relação a soma dos óxidos ser de no mínimo 70 %. Além destes aspectos, os trabalhos que utilizaram técnicas e materiais semelhantes, demonstraram similitudes aos resultados encontrados (RODRIGUES et al., 2024; MSINJILI et al., 2021; ARSLAN; BENLI; KARATAS, 2020).

Figura 3: MEV das argilas antes (a) e após calcinação (b)



Fonte: Autores (2023)

Por fim, em relação aos resultados mecânicos as NBR 12653 (ABNT, 2015) e 15894-2 (ABNT, 2010b) determinam que para o uso de materiais como pozolanas, os materiais devem apresentar no mínimo 75 % da resistência de referência aos 28 dias. Enquanto para o uso dos produtos com o intuito de aplicação como metacaulim, estes, por sua vez, devem alcançar no mínimo 105 % da resistência de referência aos 7 dias. Neste sentido, a Figura 4 representa os resultados obtidos após o rompimento dos corpos de prova.



Fonte: Autores (2023)

Para a resistência de referência aos 7 dias, constatou-se um dado igual a 17,4 MPa. Ao realizar-se a substituição 15 % da massa de cimento pela argila calcinada, observou-se que aos 7 dias a resistência obtido foi de 15,9 MPa, o que demonstrou o não alcance do mínimo previsto por norma. Resultados semelhantes são retratados na literatura (PAVESI, 2020), contudo, vale salientar que as reações pozolânica são tardias, ou seja, elas ocorrem em idades mais avançadas, o que pode aos 7 dias não ter permitido todo o tempo necessário para uso como metacaulim.

Vale salientar que, por se tratar de um material pozolânico, não obrigatoriamente ele deve atender aos requisitos de resistência para uso como metacaulim, principalmente por demonstrar reações tardias. Ressalta-se que não invalida a possibilidade de aplicação do material produzido, contudo, para a sua aplicação como metacaulim, demonstrou-se uma ineficiência nos aspectos mecânicos para o uso.

As principais aplicações para o uso de metacaulim são em obras que carecem a desforma em

curto intervalo de tempo e concretos de alto desempenho. Em usos cotidianos, não é requerido o desenvolvimento de resistências em pequenos intervalos de tempo, o que, por sua vez, pode tornar viável a aplicação de pozolanas sem tanto desempenho em pouco tempo.

Com relação ao desempenho da argila calcinada como possível aplicação como pozolana aos 28 dias, o resultado de referência foi levemente superior a 31 MPa. A amostra que obteve a substituição de 25 % alcançou 29,3 MPa, o que demonstrou superioridade ao mínimo de 75 % solicitado pela norma vigente para o uso como pozolanas.

O resultado encontrado demonstra singularidade com outros estudos publicados (RODRIGUES et al., 2024; MSINJILI et al. (2019); DANG, DU; PANG, (2020)) o que demonstra um bom caminho de utilização dos produtos. No contexto de aplicação é de grande relevância que os materiais alcancem os resultados mínimos previstos para possibilitar o seu uso, principalmente em decorrência da necessidade de desenvolvimento de novos materiais para substituir o cimento.

É importante salientar que, maior parte dos resultados encontrados em literatura são de argilas submetidas a calcinação em mufla, o que não representa de forma direta uma forma de tratamento escalável. Os resultados de trabalhos em que o principal forno é o calcinador flash estão ganhando destaque e que para comparação direta, necessita-se do desenvolvimento de mais trabalhos em condições propícias de comparação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de argilas calcinadas passou a ser como uma das principais alternativas frente a pouca disponibilidade de materiais cimentícios suplementares para substituir o cimento, mediante a necessidade de redução dos impactos ambientais negativos. Atrelado a isto, a calcinação flash passa a ser vista como uma necessidade conjunta de aplicação, tendo em vista que esta reduz o consumo energético na produção dos materiais cimentícios.

Desta forma e baseado nos resultados encontrados, é possível concluir que a argila utilizada em questão demonstrou potencial de aplicação como pozolanas aos 28 dias, a qual atendeu aos requisitos previstos em norma, tanto em aspectos físicos, químicos e de desempenho. Neste sentido, viu-se um caminho para aplicação deste material produzido na substituição do cimento.

Em relação a sua aplicação como metacaulim, constatou-se que esta não atendeu aos requisitos previstos para o desempenho mecânico. Em virtude de se tratar de uma considerada resistência para 7 dias, o desenvolvimento de produtos pozolânicos de hidratação nem sempre ocorrem a tempo de aplicação. Contudo, não se invalida o uso do material produzido como pozolanas aos 28 dias.

7 REFERÊNCIAS

ALI, M. B.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S.; A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 2252-2261, 2011.

AKHLAGHI, O.; AYTAS, T.; TATLI, B.; SEZER, D.; HODAEI, A.; FAVIER, A.; SCRIVENER, K.; MENCELOGLU, Y.; AKBULUT, O. Modified poly(carboxylate ether)-based superplasticizer for enhanced flowability of calcined clay-limestone-gypsum blended Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 101, p.114 – 122, 2017.

ARSLAN, F.; BENLI, A.; KARATAS, M. Effect of high temperature on the performance of self-compacting mortars produced with calcined kaolin and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 256, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2015. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-1**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010b. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-2**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 2: Determinação do índice de desempenho com cimento aos sete dias. Rio de Janeiro, 2010a. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012b. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 24**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

BRIDSON, D.; DAVIES, T. W.; HARRISON, D. P. Properties of flash - Calcined Kaolinite. **Clays and Clay Minerals**, v. 33, p. 258-260, 1985.

CEMBUREAU – THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION. **Activity Report 2022** (2022).

CHEN, Y.; HE, S.; ZHANG, Y.; WAN, Z.; OĞUZHAN, Ç.; SCHLANGEN, E. 3D printing of calcined clay-limestone-based cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 149, 2021.

DANG, J.; DU, H.; PANG, S. D. Hydration, strength and microstructure evaluation of eco-friendly mortar containing waste marine clay. **Journal of Cleaner Production**, v. 272, p. 122784, 2020.

IEA; WBCSD. Cement Technology Roadmap 2009 - Carbon emissions reductions up to 2050. **OECD/IEA; WBCSD**, 2009.

IGLINSKI, B.; BUCZKOWSKI, R. Development of cement industry in Poland e History, current state, ecological aspects. A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 702-720, 2017.

MAIER, M.; BEUNTNER, N.; THIENEL, K. Mineralogical characterization and reactivity test of common clays suitable as supplementary cementitious material. **Applied Clay Science**, v. 202, p. 105990, 2021.

MARAGHECHI, H.; AVET, F.; WONG, H.; KAMYAB, H.; SCRIVENER, K. Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC³) with various kaolinite contents with respect to chloride transport. **Materials and Structures**, v. 51, p. 1-17, 2018.

MARTHO, A. C. R. **Cimento Portland tipo Z: estudo comparativo de argilas calcinadas como material cimentício suplementar (MCS)**. 2016. Dissertação (Mestrado em Habitação) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MINISTÉRIOS DOS TRANSPORTES. **DNER-ME 093**: Determinação da densidade real. Brasília, 1994. 4 p.

MSINJILI, N. S.; GLUTH, G. J. G.; STURM, P.; VOGLER, N.; KÜHNE, H. Comparison of calcined illitic clays (brick clays) and lowgrade kaolinic clays as supplementary cementitious materials. **Materials and Structures**, v. 52, p. 1-14, 2019.

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

PAVESI, T. B. **Emprego de resíduos da construção civil de cerâmica vermelha (RCCCV) em substituição parcial do cimento Portland no concreto convencional**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2020.

PINTÉR, F.; GOSELIN, C. The origin, composition and early age hydration mechanisms of Austrian natural Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 110, p. 1-12, 2018.

PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? **Materials and Structures**, v. 47, p. 11-25, 2014.

RAHMAN, A.; RASUL, M. G.; KHAN, M. M. K.; SHARMA, S. Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. **Fuel**, v. 145, p. 84-89, 2015.

RODRIGUES, G. G. O. **Estudo da calcinação “flash” de argila ilítica para produção de material cimentício suplementar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2022.

RODRIGUES, G. G. O.; ROHDEN, A. B.; WIGGERS, V. R.; GARCEZ, M. R. **Construction and Building Materials**, Reactivity of flash-calcined illitic clays, v. 411, p. 134578, 2024.

SAN NICOLAS, R. **Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus por calcination flash**. 2011. Thèse (Doctorat génie civil) – Université de Toulouse, Toulouse, 2011.

SAN NICOLAS, R.; CYR, M.; ESCADEILLAS, G. Characteristics and applications of flash metakaolins. **Applied Clay Science**, v. 83–84, p. 253–262, 2013.

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

SCRIVENER, K.; MARTIRENA, F.; BISHNOI, S.; MAITY, S. Calcined clay limestone cements (LC³). **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 49-56, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884617302454>. Acesso em: ago. 2023.

SHAH, V.; BISHNOI, S. Carbonation resistance of cements containing supplementary cementitious materials and its relation to various parameters of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 219-232, 2018.

SUPINO, S.; MALANDRINO, O.; TESTA, M.; SICA, D. Sustainability in the EU cement industry: the Italian and German experiences. **Journal of Cleaner Production**, v. 122, p. 430-442, 2016.

TEKLAY, A.; YIN, C.; ROSENDAHL, L. Flash calcination of kaolinite rich clay and impact of process conditions on the quality of the calcines: A way to reduce CO₂ footprint from cement industry. **Applied Energy**, v. 162, p. 1218-1224, 2016.

TIRONI, A.; TREZZA M. A.; SCIAN A. N.; IRASSAR E. F. Thermal analysis to assess pozzolanic activity of calcined kaolinitic clays. **J Therm Anal Colorim**. 117:547-556, 2014.