

Análise do potencial de uso do filer basáltico como substituição parcial do cimento Portland

Analysis of the potential use of basaltic filler as a partial replacement of Portland cement

Alice Helena Meinhart 
Rodrigo Brunetti Macedo 
Tayná Thomaz Guterres 
Daiana Cristina Metz Arnold 

Resumo

Devido aos impactos ambientais gerados pela indústria da construção civil, pesquisadores têm voltado sua atenção à reinserção de resíduos dentro da própria indústria da construção, entre os quais se encontra o filer basáltico (FB). Para isso, avaliou-se a composição mineralógica e química do FB, além de aferir o potencial do material passante na peneira de abertura de malha 45 μ m como substituição parcial do cimento através da NBR 12653 (ABNT, 2015a). Por conseguinte, foram preparadas argamassas com substituição parcial do cimento Portland por FB nos teores de 0% (REF), 5%, 10%, 15%, 20% e 25% e verificada a resistência à compressão axial aos 28, 63, 90 e 180 dias. Além disso, verificou-se consistência normal e tempos de pega de pastas contendo o fino basáltico. Quanto ao potencial de substituição, conclui-se que FB atendeu aos requisitos químicos avaliados, mas apresentou resultados inferiores aos limites normativos aceitáveis quando avaliada a atividade com cal aos 7 dias – apresentou resultado 89% inferior ao valor de referência – e resistência à compressão axial aos 180 dias – o teor de substituição de 25% apresentou resultado 41,8% inferior comparado a REF. Ademais, o FB mostrou-se uma rocha de caráter básico, cuja morfologia não apresenta material amorfo.

Palavras-chave: Filer basáltico. Cimento Portland. Substituição parcial do cimento.

Abstract

Due to the environmental impacts generated by the construction industry, researchers have turned their attention to the reinsertion of waste within the construction industry itself, among which is basaltic filler (FB). For this, the mineralogical and chemical composition of FB was evaluated, in addition to measuring the pozzolanic potential of the material passing through the 45 μ m mesh opening sieve, through NBR 12653 (ABNT, 2015a). Therefore, mortars were prepared with partial replacement of Portland cement by FB in the contents of 0% (REF), 5%, 10%, 15%, 20% and 25%, evaluating the compressive strength at 28, 63, 90 and 180 days. In addition, normal consistency and setting times of pastes containing basaltic material were verified. As for the substitution potential, it is concluded that FB met the chemical requirements evaluated, but presented results below the acceptable limits in regulations when the activity with lime was evaluated at 7 days - it presented a result 89% lower than the reference value - and resistance to compression to 180 days – the replacement content of 25% presented a result 41.8% lower compared to REF. Furthermore, FB proved to be a basic rock, whose morphology does not present amorphous material.

Keywords: Basaltic filler. Portland cement. Partial cement replacement.

¹Alice Helena Meinhart
¹Universidade Feevale
Novo Hamburgo - RS - Brasil

²Rodrigo Brunetti Macedo
²Universidade Feevale
Novo Hamburgo - RS - Brasil

³Tayná Thomaz Guterres
³Universidade Feevale
Novo Hamburgo - RS - Brasil

⁴Daiana Cristina Metz Arnold
⁴Universidade Feevale
Novo Hamburgo - RS - Brasil

Recebido em 13/12/22
Aceito em 02/05/23

Introdução

A construção civil representa considerável influência na economia brasileira, com contribuição através da indústria de transformação de materiais, intimamente ligada à cadeia de extração de minérios (FEDERAÇÃO..., 2014; QUEIROZ FILHO; AMORIM NETO, 2018). A vasta utilização desses insumos vem sendo motivo de preocupação ambiental, uma vez que, em suma, são recursos não renováveis, além de possuir processos fabris poluentes e geradores de resíduos (GARTNER; MACPHEE, 2011). À vista disso, é necessário repensar a utilização desses materiais para otimizar seu uso, buscando minimizar impactos ambientais advindos de sua extração e produção (WILBERT; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2017).

O processo fabril do cimento Portland, material utilizado em larga escala pela indústria da construção civil, acarreta efeitos danosos ao meio ambiente devido ao grande volume de matéria-prima não renovável extraída de jazidas naturais e alta emissão de poluentes, principalmente o CO₂ (dióxido de carbono), um dos principais gases causadores do efeito estufa (MEHTA, 2002; UZAL; TURANLI; MEHTA, 2007; WANSOM; JANJATURAPHAN; SINTHUPINYO, 2009; MALHOTRA, 2010; QIAO *et al.*, 2019; ADESINA, 2020). Nesse contexto, estima-se que a produção de 1 tonelada de clínquer, material base do cimento Portland, é acompanhada pela emissão de aproximadamente 1 tonelada de CO₂ (UZAL; TURANLI; MEHTA, 2007; ASHRAF *et al.*, 2009; MEHTA; MONTEIRO, 2014; CARVALHO *et al.*, 2017; BINICI *et al.*, 2019).

Um estudo publicado por *Energy Technology Perspectives* (2020) aponta que a produção de cimento representa uma taxa considerável de cerca de 8% do total de CO₂ gerado no planeta. Em consequência, pesquisadores voltam seus esforços para incentivar o uso de resíduos de construção e subprodutos industriais como aditivos ou substitutos do cimento e agregados (HOSSAIN, 2003; UZAL; TURANLI; MEHTA, 2007; CHINDAPRASIRT; RUKZON, 2008; KANNAN *et al.*, 2017; BICINI *et al.*, 2019). Topçu e Ugurlu (2003) e Nunes, Kautzmann e Oliveira (2014) explicam que o processamento mineral do basalto gera grande quantidade de resíduos de pó de rocha, partículas emitidas na forma de poeira, denominadas fíler, através da trituração do material ou da separação dos sólidos durante o peneiramento (NUNES; KAUTZMANN; OLIVEIRA, 2014). Considerável volume desse fíler basáltico é gerado durante o processo de britagem, terminando por ficar estocado, apresentando problemas quanto à destinação correta (TOPÇU; UGURLU, 2003; INGRAO *et al.*, 2014; NUNES; KAUTZMANN; OLIVEIRA, 2014; KAZMIERCZAK; ROSA; ARNOLD, 2016; GOZI; COUTO; MORALES, 2018).

A inclusão de fíler de origem basáltica como substituição parcial do cimento Portland é considerada uma abordagem eficaz para amenizar os impactos ambientais ocasionados por sua produção e disposição (QIAO *et al.*, 2019). Diante disso, Laibao *et al.* (2013), Saraya (2014), El-Didamony *et al.* (2015), Gozi, Couto e Morales (2018), Amin *et al.* (2019), Binici *et al.* (2019), Dobiszewska, Pichór e Szoldra (2019) e Qiao *et al.* (2019) estudaram as propriedades de cimentos com substituição parcial por FB, avaliando, de forma majoritária, a resistência à compressão das misturas, além de propriedades relacionadas a efeito pozolânico ou efeito fíler. Devido a diferenças químico-mineralógicas dos basaltos utilizados, cuja origem está descrita no próximo capítulo, os autores supracitados discordam sobre os resultados encontrados. Sendo assim, torna-se necessário analisar a composição química e mineral do basalto disponível na região onde foi realizada a presente pesquisa (Vale do Rio dos Sinos, sul do Brasil).

Diante desse contexto, esta pesquisa justifica-se pela possibilidade de substituição parcial do cimento Portland pelo FB, contribuindo para a redução do consumo de cimento, além de reaproveitar um resíduo da própria indústria da construção, com contribuição científica na formação de banco de dados para comparação entre basaltos de diferentes partes do mundo.

Revisão bibliográfica

A fundamentação teórica deste artigo foi elaborada através das premissas de uma revisão sistemática com dados quantitativos publicados na última década, bem como normativas vigentes e autores consagrados que abordam conceitos já consolidados. O Quadro 1 apresenta, em resumo, autores que utilizaram FB em suas pesquisas, demonstrando o quão relevante é sua utilização como material de enchimento e/ou propriedades cimentícias. Parte-se, portanto, de estudos como os destacados no Quadro 1, para realização das análises comparativas.

Quadro 1 - Estudos de misturas cimentícias com teores de substituição do cimento Portland pelo fíler basáltico

Autores	Origem do material basáltico	Finura e processo de moagem	Teores de substituição do cimento Portland pelo FB	Metodologias aplicadas
Laibao <i>et al.</i> (2013)	China	Não mencionam processo de moagem, apenas que 7,7% do material é passante na peneira de abertura de malha 45 µm, estando de acordo com a C618 (ASTM, 2019) que estipula valor máximo de 34%.	5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%	DRX, MEV, análise do índice de desempenho à compressão e à flexão, índice de consistência e tempo de pega. Relação a/c das argamassas de 0,30.
Saraya (2014)	Egito	Menciona apenas que 0,9% do material é passante na peneira de abertura de malha 45 µm, estando de acordo com a C618 (ASTM, 2019) que estipula valor máximo de 34%.	20%	DRX, análise do índice de desempenho à compressão e porosidade total. Relação a/c das pastas de 0,33.
El-Didamony <i>et al.</i> (2015)	Cidade do Cairo, Egito	Não mencionam processo de moagem. Utilizaram material passante na peneira de abertura de malha 90 µm.	5%, 10%, 15% e 20%	DRX, FRX, análise da densidade aparente, porosidade total e índice de desempenho à compressão. Relação a/c das pastas não identificada.
Amin <i>et al.</i> (2019)	Indonésia	Previamente esmagado em britador de mandíbulas, sendo moído em moinho de bolas por 4 horas. Utilizaram material passante na peneira de abertura de malha 45 µm.	5%, 10%, 15% e 20%	DRX, FRX, análise da absorção de água, porosidade total, índice de desempenho à compressão e verificação do índice de atividade pozolânica. Relação a/c das argamassas entre 0,4 e 0,5.
Dobiszewska, Pichór e Szoldra (2019)	Não mencionam	Material foi moído em moinho de bolas, sem relatar tempo de moagem. Não mencionam parâmetros quanto à finura.	5%, 10%, 15% e 20%	DRX, análise do índice de desempenho à compressão e à flexão. Relação a/c das argamassas de 0,50.
Qiao <i>et al.</i> (2019)	Não mencionam	Não mencionam processo de moagem e finura do material basáltico.	10%, 15%, 20%, 25% e 30%	Análise do índice de desempenho à compressão e à flexão. Relação a/c das argamassas de 0,5.

Os resultados da pesquisa de El-Didamony *et al.* (2015) apontam que amostras contendo FB apresentaram resistência à compressão inferior nas idades de 28 e 90 dias em comparação a REF: aos 28 dias, amostras com 10% e 15% de substituição apresentaram resistência 6,1% inferior e, aos 90 dias, os respectivos teores apresentaram 9,6% e 10,8% inferior a REF. A partir dessas informações, os autores constataram que ao incrementar os teores de substituição a resistência à compressão correspondente diminui, resultado da liberação de cal livre sem que ocorra reação pozolânica. O cimento utilizado pelos autores supracitados é do tipo OPC (*Ordinary Portland Cement*) tipo I pela C150 (AMERICAN..., 2015), que no Brasil pode ser

assimilado com os cimentos CP I, conforme explica Mehta e Monteiro (2014). Em síntese, El-Didamony *et al.* (2015) concluíram através do ensaio de resistência à compressão, que o FB utilizado não possui atividade pozolânica, mas se comporta como material de enchimento. Relatam diminuição do teor de cal livre das pastas com substituição de 15% do cimento pelo FB e cogitam possível atividade pozolânica apenas em idades tardias.

Saraya (2014) também sugere que o ganho de resistência tardio acontece devido às reações pozolânicas. O autor analisou pastas com 20% de substituição e obteve, aos 7 dias, resistência à compressão cerca de 11,5% menor que a pasta sem substituição; aos 28 dias, cerca de 7,7% menor; aos 90 dias, cerca de 5,4% menor; aos 360 dias, em torno de 2,8% superior à pasta sem FB. Saraya (2014) utilizou relação água/cimento de 0,3. Alguns autores, como Saraya (2014) e Jamshaid e Mishra (2015), consideraram o FB uma relevante substituição parcial do cimento Portland, graças às propriedades estruturais que o basalto possui. Quanto mais finas forem as partículas do material de enchimento, maior é a resistência à compressão da mistura, devido ao preenchimento dos vazios da pasta, atuando como fíler (NOAMAN; KARIM; ISLAM, 2019).

Em contraponto, os resultados expostos por Dobiszewska, Pichór e Szoldra (2019) e Laibao *et al.* (2013) indicam que quanto mais FB adicionado, menor a resistência à compressão alcançada em todas as idades de cura (7, 28, 90 e 180 dias). Os autores indicam que a adição de FB como substituição parcial do cimento leva à deterioração da resistência à compressão de todas as argamassas em todas as idades. O aumento do teor de fíler basáltico de 5%, 10%, 15%, 20% diminui o índice de desempenho à compressão em cerca de 3,6%, 6,6%, 8,9%, 11,8%, respectivamente, aos 28 dias de idade nos estudos de Laibao *et al.* (2013). Portanto, nenhuma amostra produzida com substituição obteve desempenho superior à REF. Dobiszewska, Pichór e Szoldra (2019) utilizaram OPC tipo I 42.5 R, conforme os requisitos da EN 197-1 (EUROPEAN..., 2011), com proximidade da composição do CP I conforme NBR 16697 (ABNT, 2018a) e Laibao *et al.* (2013) não especificaram o tipo de cimento utilizado.

Qiao *et al.* (2019) também explicam que a substituição do cimento Portland pelo FB influencia de forma negativa as propriedades mecânicas de argamassas, principalmente aos 28 dias. Com o decorrer do processo de cura, as argamassas com FB apresentaram, de forma geral, decréscimo de resistência em comparação à amostra de referência. Aos 90 dias, a amostra com 15% de FB ilustrou a menor resistência à compressão encontrada, seguida pelos teores de 20% e 25%, enquanto que o teor 10% FB atingiu resistência à compressão mais próxima à argamassa de referência, apenas 1,3% abaixo do valor de referência, sem FB. O autor não especificou o tipo de cimento utilizado na pesquisa.

Contudo, Saraya (2014) explica que a redução na resistência à compressão ocorre nas primeiras idades devido à lentidão de prováveis reações pozolânicas. Pozolanas são materiais ricos em sílica e alumina, que por si só não possuem propriedades cimentícias, mas quando finamente divididos, na presença de água e hidróxido de cálcio, em temperaturas comuns, reagem para formar compostos com propriedades cimentantes, assim ocorrendo atividade pozolânica (MEHTA; MONTEIRO, 2014; SARAYA, 2014; ABNT, 2015a). As pozolanas apresentam amorfismo, ou seja, a reatividade é diretamente influenciada pelo teor de material amorfo – uma estrutura vítrea – existente na amostra. A cinza da casca de arroz e o metacaulim são exemplos de materiais altamente reativos, sendo pozolanas de uso consolidado (GOBBI, 2014).

Ao produzir argamassas moldadas em corpos de prova com base na C618 (AMERICAN..., 2022), Amin *et al.* (2019) utilizaram traço cimento/areia de 1:2,75. Seguindo a análise de índice de desempenho à compressão, os autores afirmam que a maior resistência à compressão das argamassas contendo FB foi de 24,97 MPa aos 28 dias, com teor de substituição de 5%, em comparação a 19,5 MPa da amostra sem FB, assinalando possível reação pozolânica existente assim como descrito por Saraya (2014).

A reação pozolânica também se caracteriza por possuir taxas de liberação de calor e desenvolvimento da resistência mais lentos. Ogawa *et al.* (1980) e Jun-Yuan, Scheetz e Roy (1984) concordam, afirmando que materiais com atividade pozolânica quando adicionados ou substituídos em misturas cimentícias, geralmente resultam em atraso do processo de hidratação. Por isso, partindo do princípio de que a composição do cimento, relação água/cimento, temperatura ambiente e aditivos são os principais fatores que controlam o tempo de pega (MEHTA; MONTEIRO, 2014), Laibao *et al.* (2013) avaliaram fenômeno da pega de suas pastas, afirmando que pastas que contêm FB apresentaram tempos de início e fim de pega prolongados quando comparados à pasta sem FB, possivelmente devido à redução gradual de C₃S, responsável por conferir dureza e resistência à pasta em idade precoce, devido à retirada de porcentagem em massa do cimento na mistura. Os autores ainda supuseram que FB não possui atividade pozolânica, apenas se comporta como material de enchimento.

Em concordância, está El-Didamony *et al.* (2015). Os autores explicam que o tempo de início e fim de pega de pastas contendo FB como substituição parcial ao cimento alongam-se linearmente de acordo com o teor de basalto presente na mistura. Isso se deve, principalmente, devido às propriedades hidráulicas limitadas que possui quando comparado ao cimento Portland. Com o basalto não há um processo de hidratação inicial semelhante ao que acontece com o cimento: à medida que o teor de cimento diminui, os tempos de pega elevam-se, ou seja, ocorre a diluição do cimento com basalto, resultando no retardo da reação de hidratação. Esse processo também é citado por Lawrence (1998). O autor explica que o efeito da diluição do cimento desacelera o processo de hidratação, sendo que a substituição parcial do clínquer – ou seja, a redução dos grãos de clínquer na mistura – causa a redução da reatividade do cimento.

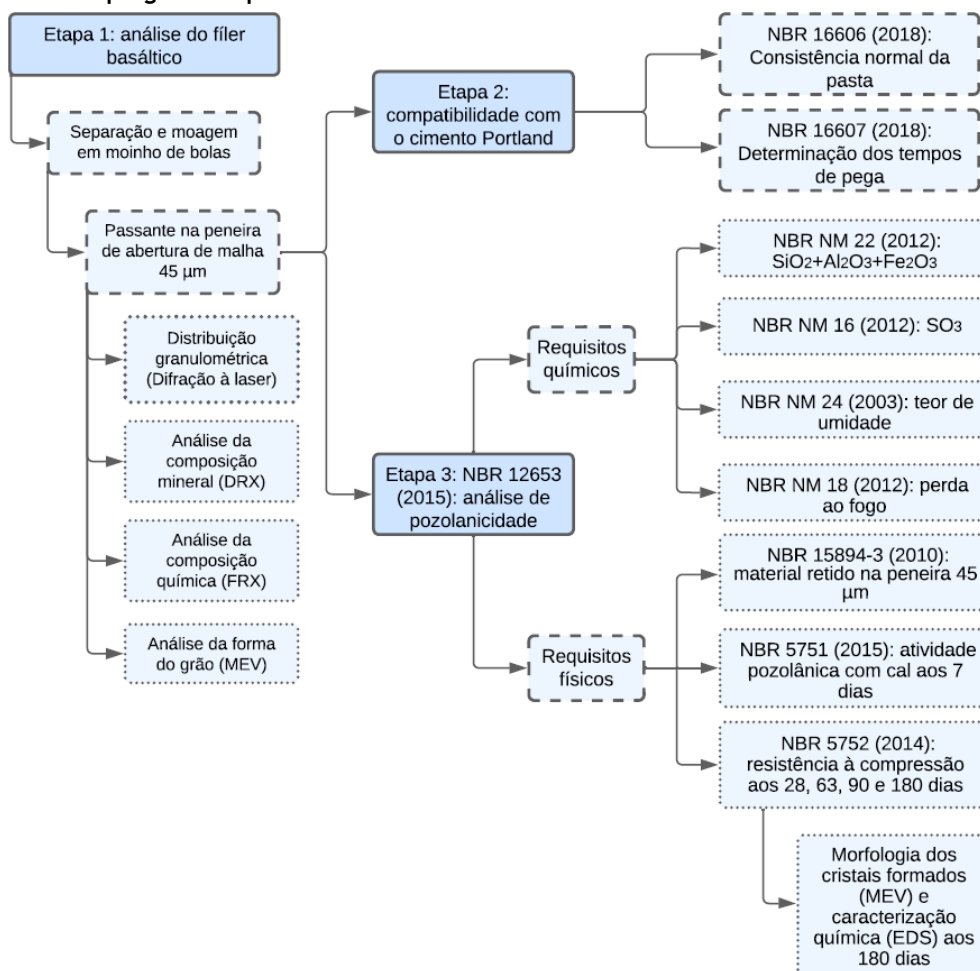
Findada a revisão bibliográfica o próximo capítulo aborda o programa experimental, com o objetivo de verificar o potencial de substituição parcial do cimento e o comportamento de argamassas contendo fíler basáltico.

Programa experimental

A pesquisa foi estruturada a partir da definição de três etapas: análise do FB, compatibilidade do FB com cimento e análise do potencial como material substituto parcial ao cimento Portland através da NBR 12653 (ABNT, 2015a), conforme Figura 1.

A abordagem dos resultados foi realizada de forma qualitativa e quantitativa comparativa, a partir das seguintes verificações estatísticas: Teste-T, que avalia uma média amostral com um valor hipotético ou valor alvo, e Correlação de Pearson, cujo objetivo é indicar como as duas variáveis associadas estão entre si. O software utilizado para as análises foi o SPSS *Statistics* 26. As idades de avaliação estão indicadas na Figura 1.

Figura 1 - Matriz programa experimental



Materiais

Para execução do programa experimental foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland, FB, água, agregado miúdo, hidróxido de cálcio P.A e hexametáfosfato de sódio para ensaios específicos. Estes são detalhados a seguir.

A escolha do cimento utilizado foi baseada na normativa NBR 5752 (ABNT, 2014), que cita o cimento Portland tipo II-F-32 para avaliar o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. A caracterização deste, segundo fornecedor, apresenta-se na Tabela 1. Esse cimento contém teor entre 11% e 25% de fíler calcário sendo o restante constituído de clínquer de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018a), coloração clara e secagem rápida.

Ao comparar as características químicas e físicas fornecidas pelo fabricante com as especificações da NBR 16697 (ABNT, 2018a), percebe-se que o cimento se encontra de acordo com os parâmetros exigidos pela normativa. Quanto à composição química, o cimento utilizado pela presente pesquisa possui porcentagem de CaO próxima aos valores encontrados por Saraya (2014) e El-Didamony *et al.* (2015), 61,58% e 60,63%, respectivamente. O FB foi obtido através de britador do tipo mandíbula, proveniente de jazida situada na região do Vale dos Sinos, Rio Grande do Sul, disponibilizado por empresa parceira em forma de areia de britagem. Com relação à amostragem do basalto, enfatiza-se que não foi possível estabelecer um padrão de profundidade de coleta das amostras no maciço rochoso, já que este foi obtido já beneficiado.

Para produção das argamassas, utilizou-se agregado miúdo proveniente do Rio Jacuí, em uma adaptação dos parâmetros exigidos pela NBR 7214 (ABNT, 2015c), já que esta indica uso da areia normal. Também se utilizou água potável, para produção das pastas e argamassas, proveniente de poço artesiano da Universidade Feevale, em conformidade com a NBR 15900-1 (ABNT, 2009); hidróxido de cálcio, comumente chamado cal, com teor mínimo de pureza 95%, seguindo as indicações da NBR 5751 (ABNT, 2015b), cuja caracterização fornecida pelo fabricante informa pH (potencial hidrogeniônico) variando entre 12,4 e 12,6; e, por fim, hexametáfosfato de sódio P.A de pureza 99% conforme informado na embalagem.

Métodos

Por possuir cunho experimental, para obtenção do FB, não foram seguidos procedimentos padrão e/ou normativas, porém se assemelha ao realizado por Amin *et al.* (2019). O resíduo basáltico seguiu as seguintes etapas (Figura 2).

Como visto na Figura 2, o processo de obtenção deu-se início pelo recebimento da areia de britagem disponibilizada por empresa parceira. Em seguida, a areia foi seca em estufa (Figura 2 – Etapa A) e segregada em agitador mecânico de peneiras (Figura 2 – Etapa B), sendo selecionado e armazenado apenas o material passante na peneira de abertura de malha 75 μm (Figura 2 – Etapa C). Após obtidos cerca de 10 kg, destinou-se o material obtido após a Etapa C ao moinho de bolas modelo CT-241 *Servitech* por 30 minutos (Figura 2 – Etapa D). Após retirado do moinho, e segregado em peneira de abertura de malha 45 μm de forma manual, exercendo força mecânica com auxílio de um pincel em movimentos circulares (Figura 2 – Etapa E), o material passante foi reservado e seco em estufa a 100 ± 5 °C por 24 horas (Figura 2 – Etapa F). Ao retirar da estufa, o material passou aproximadamente 24 horas no dessecador para arrefecer (Figura 2 – Etapa G) e então reservado em embalagens herméticas.

Tabela 1 - Caracterização do cimento Portland CP II-F-32

Parâmetro	Resultado	Parâmetro	Resultado
SiO ₂	17,78	Expansão à quente (mm)	0,23
Al ₂ O ₃	4,22	Tempo de pega início (min)	216
CaO	61,31	Tempo de pega fim (min)	271
MgO	3,19	Consistência normal (%)	27
SO ₃	2,52	Finura Blaine (cm ² /g)	3266
Fe ₂ O ₃	2,80	Resistência à compressão – 1 dia (MPa)	15
Perda ao fogo	6,71	Resistência à compressão – 3 dias (MPa)	28,9
CaO livre	1,09	Resistência à compressão – 7 dias (MPa)	33,3
Resíduo insolúvel	1,31	Resistência à compressão – 28 dias (MPa)	42,1

Fonte: adaptada do fabricante, lote 08/2020 (2023).

Figura 2 - Etapas de obtenção do FB



Após beneficiado, três amostras seguiram para análise de difração a laser em difratômetro a laser modelo CILAS 1180, difração de raios-X (DRX) em equipamento *Empyrean Panalytical*, e fluorescência de raios-X (FRX) em equipamento *Epsilon 1 Panalytical*. Destaca-se que a técnica DRX, no caso do presente artigo, possui intuito de verificar presença de halo amorfo, premissa para pozolanas. A forma do grão foi analisada com MEV modelo *JSM-6510LV*, marca *JEOL*, assim, finalizando os ensaios da Etapa 1.

Para análise de compatibilidade (Etapa 2), determinou-se a consistência normal das pastas conforme a NBR 16606 (ABNT, 2018c) com os teores de substituição descritos na Tabela 2. A partir das pastas produzidas, seguiu-se o ensaio para determinação dos tempos de pega, de acordo com a NBR 16607 (ABNT, 2018b).

A terceira etapa aborda os requisitos químicos e físicos da NBR 12653 (ABNT, 2015a). Quanto aos requisitos químicos, analisou-se a quantidade de SO_3 presente no FB e a soma dos compostos $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, estes foram obtidos através dos resultados de FRX. Também se avaliou perda ao fogo (descrito na NBR NM 18 (ABNT, 2012)) e teor de umidade do FB (conforme NBR NM 24 (ABNT, 2003)).

Dos requisitos físicos listados pela NBR 12653 (ABNT, 2015a), partiu-se aferição do material retido na peneira de abertura 45 µm, conforme NBR 15894-3 (ABNT, 2010). Para execução do ensaio previsto na NBR 5751 (ABNT, 2015b), primeiramente determinou-se a massa específica do FB, hidróxido de cálcio e cimento Portland através da NBR 16605 (ABNT, 2017), que obtiveram resultados de 2,93 g/cm³ (gramas por centímetro cúbico), 2,25 g/cm³ e 2,99 g/cm³, respectivamente. Com relação ao FB, a massa específica encontrada é maior do que trazem Rosa (2013), Wilbert, Kazmierczak e Kulakowski (2017) e Gozi, Couto e Morales (2018) – estes obtiveram valores de 2,70 g/cm³, 2,63 g/cm³ e 2,87 g/cm³, respectivamente. Após, deu-se início ao ensaio da determinação do índice de atividade pozolânica com cal descrito pela NBR 5751 (ABNT, 2015). O processo de cura seguiu o recomendado pela normativa assim como rompimento executado aos 7 dias.

Para finalizar a avaliação dos requisitos físicos, determinou-se o índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland, conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014). Essa normativa estabelece o teor de 25% de substituição do cimento pelo material que se deseja testar; porém, conforme revisão bibliográfica, optou-se também por analisar outros teores, com menor valor de substituição. A partir disso, estabeleceu-se teores complementares de 5%, 10%, 15% e 20%, além do teor de 25%, conforme estabelece a NBR 5752 (ABNT, 2014). A Tabela 3 traz a quantidade, em massa, de cada insumo utilizado para preparar as argamassas.

Manteve-se a relação água/aglomerante constante, ou seja, em princípio, considerou-se aglomerante a soma da massa de cimento Portland e de FB, no intuito de avaliar o FB como possível material com propriedades aglomerantes. Já a relação água/cimento, conseqüentemente, aumentou conforme se elevou o teor de substituição. A mistura dos materiais ocorreu em misturador mecânico modelo *AG-5 2005* e os corpos de prova foram moldados em corpos cilíndricos (50 X 100 mm). Ao total, foram moldadas 108 unidades: 18 corpos de prova de cada teor de substituição. A cura foi realizada em câmara úmida com temperatura ambiente em torno de 23 °C e umidade mínima relativa de 95%. A prensa utilizada para ensaio de compressão cilíndrica é marca *EMIC* modelo *PC200*, com capacidade máxima de 300 kN.

Tabela 2 - Dosagem das pastas

Material	REF	Pastas com fíler basáltico				
		5%	10%	15%	20%	25%
CP II-F-32 (g)	500 ± 0,5	475 ± 0,5	450 ± 0,5	425 ± 0,5	400 ± 0,5	375 ± 0,5
FB (g)	-	25 ± 0,5	50 ± 0,5	75 ± 0,5	100 ± 0,5	125 ± 0,5

Tabela 3 - Dosagem das argamassas

Material	REF	Argamassas com fíler basáltico				
		A05%	A10%	A15%	A20%	A25%
CP II-F-32 (g)	624 ± 0,4	593 ± 0,4	562 ± 0,4	530 ± 0,4	499 ± 0,4	468 ± 0,4
Fíler basáltico (g)	-	31 ± 0,2	62 ± 0,2	94 ± 0,2	125 ± 0,2	156 ± 0,2
Agregado miúdo (g)	1872	1872	1872	1872	1872	1872
Água (g)	300 ± 0,2	300 ± 0,2	300 ± 0,2	300 ± 0,2	300 ± 0,2	300 ± 0,2
Reação água/aglomerante	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Reação água/cimento	0,48	0,51	0,53	0,57	0,60	0,64

Além dos 28 dias, conforme NBR 5752 (ABNT, 2014), foram analisadas as idades de 63, 90 e 180 dias. Estas foram escolhidas conforme idades analisadas por estudos Laibao *et al.* (2013), Saraya (2014), Dobiszewska, Pichór e Szoldra (2019) e Qiao *et al.* (2019). Visto isso, aos 180 dias, fragmentos das argamassas produzidas foram destinados a análises do MEV para avaliar a morfologia dos cristais formados. As amostras foram metalizadas a partir da pulverização de ouro pela metalizadora modelo *Desk V*, marca *Denton Vacuum*. O MEV utilizado é de modelo *JSM-6510LV*, marca *JEOL* e EDS modelo *6742a-1ues-sn* série 7487, marca *Thermo Scientific*.

Ainda sobre a NBR 12653 (ABNT, 2015a), norma brasileira para verificação de pozolanas e materiais com propensão, por mais sabida que seja a necessidade de averiguar amorfismo quando analisada a reatividade de um material, essa verificação não é normatizada, ou seja, nada consta na NBR 12653 (ABNT, 2015a) sobre esse quesito.

Por fim, com base no programa experimental descrito até aqui, a partir dos resultados obtidos, foram aplicados os métodos estabelecidos para análise dos resultados e conclusões da presente pesquisa, além de avaliação estatística.

Resultados e discussões

Este tópico aborda os resultados encontrados nos ensaios propostos no programa experimental, assim como a comparação dos dados com as literaturas apresentadas na revisão bibliográfica, dividido em etapas correspondentes.

Etapa 1: caracterização do fíler basáltico

A partir de micrografias com ampliação de 3000x conforme Figura 3 pôde-se perceber que os grãos de FB são alongados, pontiagudos, com estrutura subangulosa, cobertos por grumos formados por pó de basalto ainda mais fino; afinal, estes passaram por processo de britagem, assim como exposto por Tristão (2005). Isso pode ser associado aos diferentes planos de clivagem de FB, que está relacionado à composição mineralógica do basalto analisado (LAIBAO *et al.*, 2013). Bredikhin e Kadykova (2015) descrevem as partículas de basalto de forma irregular, bordas afiadas e superfície rugosa, assim como visto anteriormente.

O pó fino que envolve os grãos de FB elucida uma distribuição granulométrica de graduação contínua, bem graduada, fato comprovado pela Figura 4.

Quanto à distribuição granulométrica, observa-se, na Figura 4(a), curva de frequência comportando-se de forma polimodal, possuindo $D_{\text{médio}}$ de 12,12 μm , D_{10} de 0,86 μm , D_{50} de 7,14 μm e D_{90} de 31,34 μm , comprovando os diferentes tamanhos de partículas de FB. A curva suave em formato de “S” vista na Figura 4(a) demonstra semelhança quanto ao formato da curva do CP II-F-32, como mostrado na Figura 4(b), ambas de comportamento bem graduado, em formato de “S” suave, alongado, como já é esperado para cimentos (BORGES, 2017).

Figura 3 -Análises MEV de grãos de FB passante na peneira de 45 µm, demarcação dos pontos onde foi realizado EDS e gráficos de pico elementar, à direita

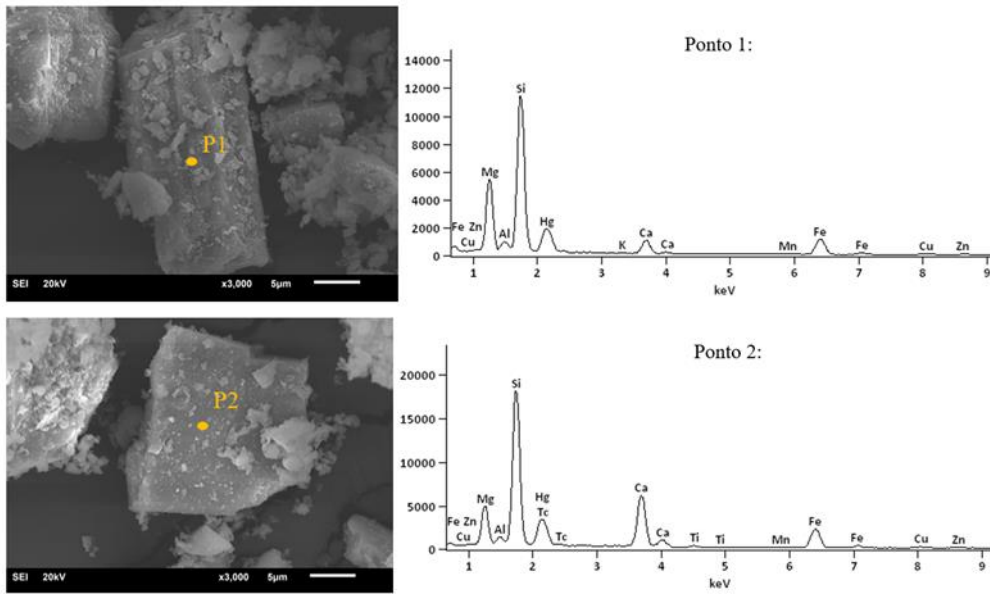
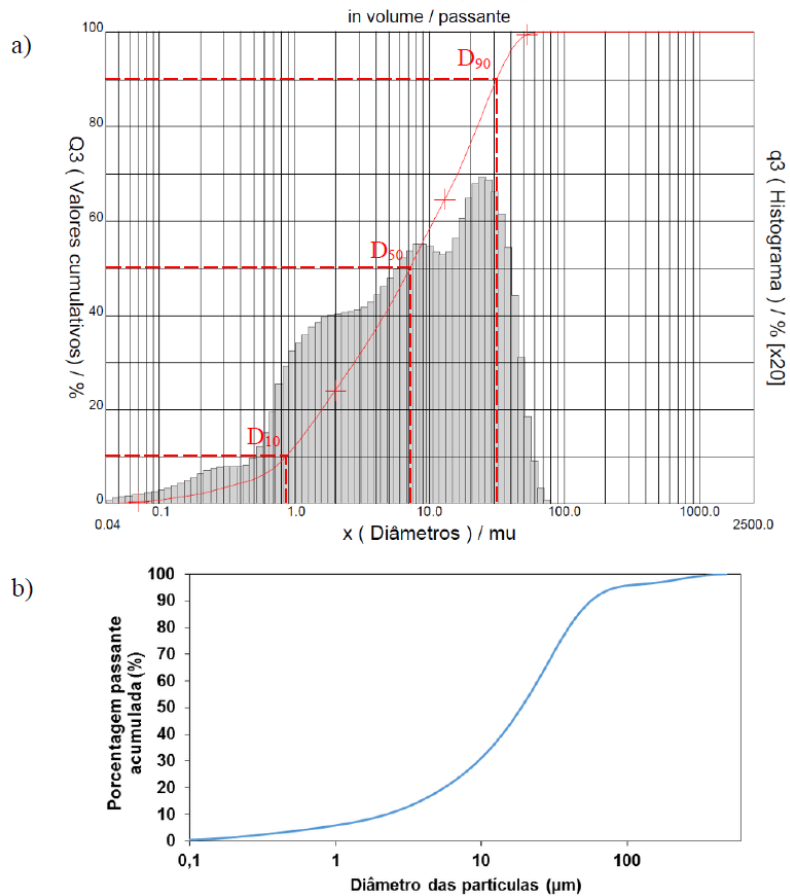


Figura 4 - (a) Distribuição granulométrica do FB através de difração a laser e (b) curva granulométrica do cimento Portland CP II-F-32, demonstrada por Borges (2017)



Para identificação dos polimorfos de sílica bem como outros minerais, a partir da análise qualitativa do material cristalino feita através de DRX (Figura 5) destaca-se, predominantemente, a labradorita, mineral da classe dos silicatos e pertencente ao subgrupo dos plagioclásios, comumente encontrada em rochas magmáticas básicas, como em basaltos, gabros e noritos, por exemplo, assim como descrito por Saraya (2014). Amin *et al.* (2019) destacam a anortita como componente mineral principal, enquanto El-Didamony *et al.* (2015) indicam a predominância da albita, ambos pertencentes ao subgrupo dos plagioclásios. Laibao *et al.* (2013) destacaram a albita e a anortita como principais constituintes do FB, seguidas por picos menores de augita e labradorita.

Observa-se, na Figura 5, a formação de picos no difratograma. Esses picos indicam a presença de cristais, sendo que a altura dos picos são proporcionais às intensidades dos efeitos da difração, e cada estrutura cristalina produz um padrão de difração próprio. Ademais, nenhum halo amorfo foi identificado no difratograma; sendo assim, a ausência de halo amorfo indica que o FB analisado é inerte. Por isso, a partir da premissa de que um material para ser considerado pozolana deve apresentar-se amorfo (GOBBI, 2014), o FB será tratado apenas como um material de enchimento e não como material pozolânico, visto que não indica sílica reativa. A composição química do FB utilizado nesta pesquisa é apresentada na Tabela 4.

Como já esperado como principal constituinte do basalto, o dióxido de silício (SiO₂) representa pouco mais de 48% da relação porcentagem em massa, inferior à porcentagem encontrada por Saraya (2014), El-Didamony *et al.* (2015), Petropavlovskaya *et al.* (2018), Amin *et al.* (2019), Scolaro e Rocha (2021) e Gheller (2022), mas superior aos valores encontrados por Teymen (2017), Dobiszewska e Beycioğlu (2020) e Karasin *et al.* (2022). Mesmo a variação química sendo natural, o FB analisado apresenta resultado mais próximo ao disposto por Teymen (2017), quando analisados os compostos químicos de maior proporção.

Etapa 2: compatibilidade fíler basáltico e cimento Portland

Ao verificar a compatibilidade do FB com o cimento Portland utilizado, tem-se a Tabela 5.

Figura 5 - Padrões de difração de raios-X do FB

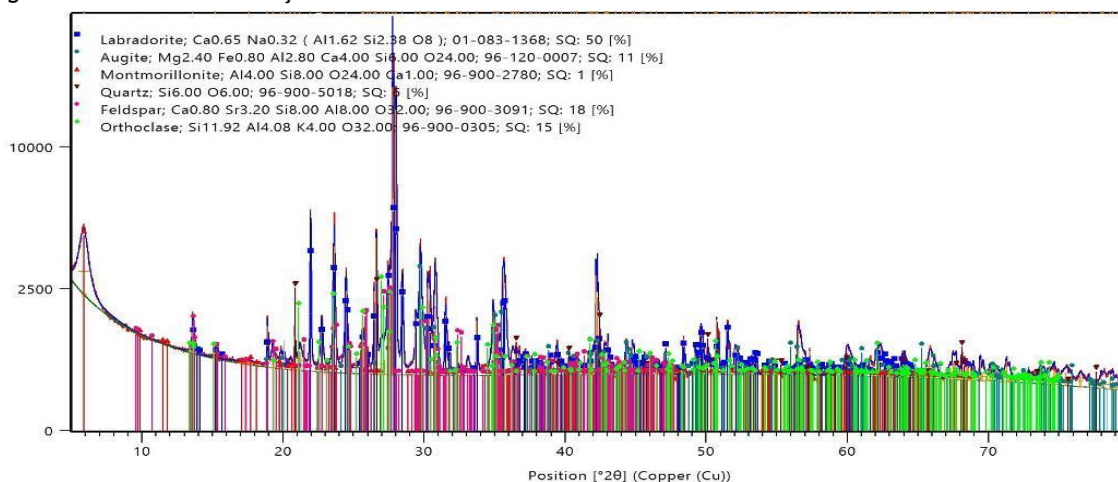


Tabela 4 - Padrões de fluorescência de raios-X do FB, relação óxidos e % em massa

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO
N.D.	6,548	18,208	48,38	N.D.	0,159	1,466	11,657	0,851	0,042	0,026	0,141
Fe ₂ O ₃	NiO	CuO	ZnO	SrO	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅	BaO	Eu ₂ O ₃	PbO	L.O.I	-
11,464	0,015	<L.D.	0,014	0,038	0,02	<L.D.	0,022	0,064	<L.D.	0,862	-

Nota: resultados expressos em % massa; L.D = Limite de detecção (0,01%); e N.D. = Não detectado.

Tabela 5 - Água necessária à obtenção da consistência normal das pastas

Teor de substituição	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Consistência normal (%)	26,72%	27,10%	27,40%	27,10%	27,06%	27,04%

A partir dos resultados expostos na Tabela 5, bem como os dados da Tabela 2, realizou-se análise estatística através de correlação de Pearson entre o teor de água, em porcentagem, e a massa de FB, em gramas, e observou-se que não existe correlação significativa entre as duas variáveis, sendo considerado intervalo de confiança da diferença de 95%. Esses valores não são significativamente diferentes; em resumo, não se pode afirmar que a substituição parcial influenciou nem de forma negativa nem positiva a trabalhabilidade da pasta, ao contrário do exposto na pesquisa de Laibao *et al.* (2013). Os autores afirmam que a substituição influenciou de forma negativa a trabalhabilidade da pasta fresca, pelo fato das partículas de FB apresentarem-se rugosas e pontiagudas. Adicionalmente, a Figura 6 apresenta os tempos de pega encontrados.

A partir da análise estatística, verificou-se que não existe correlação significativa entre a massa de FB (Tabela 2), em todos os teores analisados, e o início de pega (Figura 6), assim como não existe correlação significativa entre a massa de FB (Tabela 2) e o fim de pega (Figura 6). E, portanto, a incorporação de FB não alterou significativamente os tempos de início e fim de pega das pastas produzidas.

Etapa 3: avaliação de potencial pozolânico pela nbr 12653 (ABNT, 2015a) e morfologia dos cristais aos 180 dias

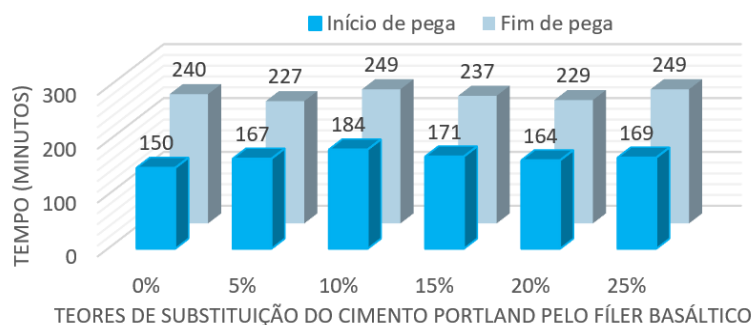
Apesar de constatada ausência de halo amorfo na Figura 5, sendo um material inerte frente à análise DRX, a avaliação de constituinte amorfo não é premissa para considerar, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2015a), um determinado material como pozolânico. Ou seja, a normativa não estabelece ensaios que determinem se a sílica existente é amorfa ou não. Gobbi (2014) afirma que as normativas não levam em consideração alguns parâmetros importantes para a atividade pozolânica, os quais interferem na resistência de pastas de cimento, tais como: a área específica, as características físico-químicas, o teor de materiais amorfos e a taxa de reação ao longo do tempo. Sendo assim, seguiu-se com a avaliação dos requisitos químicos e físicos descritos na normativa.

Segundo critérios de classificação da NBR 12653 (ABNT, 2015a), o FB analisado enquadra-se na classe “E” de materiais com propensão à atividade pozolânica, sendo os requisitos químicos e respectivos resultados, resumidamente, apresentados no Quadro 2.

A partir do Quadro 2, percebe-se que todas as propriedades verificadas atendem aos valores de referência para a classe analisada, corroborando com os resultados dos seguintes autores: El-Didamony *et al.* (2015), Teymen (2017), Petropavlovskaya *et al.* (2018) e Amin *et al.* (2019). O FB analisado apresentou resultados que não apenas estão dentro dos limites da NBR 12653 (ABNT, 2015a), bem como permaneceu dentro dos limites estabelecidos pela C618 (AMERICAN..., 2022). O Quadro 3 complementa o Quadro 2, trazendo os requisitos físicos da NBR 12653 (ABNT, 2015a), exceto a análise da resistência à compressão – abordada na Figura 7.

Como visto no Quadro 3, não houve material retido na peneira de abertura 45 µm (de acordo com a NBR 15894-3 (ABNT, 2010)), parâmetro que atende ao valor de referência da NBR 12653 (ABNT, 2015a), atendendo também ao valor máximo de 34% da C618 (AMERICAN..., 2022).

Figura 6 - Tempos de pega das pastas produzidas



Quadro 2 - Requisitos químicos - comparação entre resultados obtidos e valores normatizados conforme Classe “E”

Propriedades	Valores de referência para classe “E”	Amostra de FB - Resultados obtidos	Atendimento aos requisitos e respectivos valores de referência
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 50%	78,052%	Atende
SO ₃	≤ 5%	Não detectado	Atende
Teor de umidade (ABNT, 2003)	≤ 3%	0,413%	Atende
Perda ao fogo (ABNT, 2012)	≤ 6%	1,803%	Atende

Quadro 3 - Requisitos físicos - comparação entre resultados obtidos e valores normatizados conforme Classe “E”

Propriedades	Valores de referência para classe “E”	Amostra de FB – Resultados obtidos	Atendimento aos requisitos e respectivos valores de referência
Material retido na peneira 45 μm (% máxima)	< 20%	0%	Atende
Atividade pozolânica com cal aos 7 dias (MPa)	≥ 6 MPa	0,64 Mpa	Não atende

Quanto à verificação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias, o resultado obtido não atendeu ao parâmetro mínimo – o resultado encontrado ficou 89% abaixo do valor mínimo de 6 MPa estipulado pela NBR 12653 (ANBT, 2015a). Esse resultado era esperado, visto a inexistência de material amorfo, tendo o FB apresentado um comportamento que reforça a hipótese de que atue apenas como material de enchimento e não como pozolana. Sendo assim, não houve interação química suficiente entre o hidróxido de cálcio e FB para que ele possa ser considerado pozolana segundo a NBR 12653 (ANBT, 2015a); dessa forma, essas adições não podem ser classificadas como pozolanas (GOBBI, 2014).

Quanto à avaliação do desempenho à compressão, os valores apresentados na Figura 7 são resultantes da média aritmética simples dos resultados unitários de resistência à compressão das argamassas ensaiadas.

A NBR 5752 (ABNT, 2014) estabelece apenas o teor de 25% de substituição do cimento Portland pelo material que se deseja testar produzindo argamassas e as comparando: argamassa contendo apenas cimento e argamassa contendo 25% de substituição. Então, como se pode ver na Figura 7, o teor A25% aos 28 dias equivale a 60,5% do valor alcançado pela argamassa REF, inferior aos 90% mínimo requerido pela NBR 12653 (ABNT, 2015a). Sendo assim, FB não pode ser considerado material com propriedades pozolânicas nesse item da normativa. Se comparado com o valor mínimo que a C618 (AMERICAN..., 2022) especifica, de 75%, FB também não poderia ser considerado material pozolânico nesse quesito. Resultados esses que já eram esperados, visto a inexistência de halo amorfo e, conseqüente, deficiência na interação entre hidróxido de cálcio e FB, não formando C-S-H suplementar (WANSOM; JANJATURAPHAN; SINTHUPINYO, 2009; GOBBI, 2014).

Avaliando o valor médio de resistência à compressão, as argamassas com FB apresentaram redução do desempenho à compressão, sendo a amostra com maior teor de FB a que obteve desempenho inferior. Porém, vale ressaltar a afirmação de Noaman, Karim e Islam (2019), de que pozolanas podem exercer tanto efeito pozolânico quanto efeito de preenchimento, sendo muito difícil avaliá-los separadamente, sendo seu efeito verificado adequadamente em idades tardias. Saraya (2014) e Amin *et al.* (2019) explicam que o ganho de resistência é tardio devido às reações pozolânicas, em que o material pozolânico atinge, ou mesmo supera, o valor de resistência da referência, o que não pôde ser observado na Figura 7, mas assemelha-se aos resultados de Laibao *et al.* (2013) e Dobiszewska, Pichór e Szoldra (2019) – quanto maior teor de FB utilizado como substituição, menor o desempenho à compressão alcançado em todas as idades.

Quanto à análise estatística, foi realizada verificação a partir do Teste-T, para igualdade de médias. A análise foi baseada na comparação entre a argamassa REF, com as argamassas contendo FB, sendo o teor A05% estatisticamente igual ao REF em todas as idades analisadas, ou seja, não há aumento significativo nos valores médios de compressão, quando comparados. Enquanto que A10% apresentou-se com diferença não significativa apenas nas idades iniciais, de 28 e 63 dias, os demais teores (A15%, A20% e A25%) apresentaram diferença significativa, ou seja, redução da resistência, entre as médias para todas as idades analisadas, o que já era esperado visto o comportamento destes na Figura 7.

Por fim, selecionou-se a argamassa A05% (estatisticamente igual a argamassa REF) e a argamassa A15% (apresentando resistência à compressão axial até 24,5% inferior a REF aos 180 dias) para analisar a interação do grão de FB com a matriz cimentícia. Examinadas sob dois aspectos, análise qualitativa da morfologia dos cristais formados e análise semiquantitativa, as micrografias sobre superfície de fratura, a partir de fragmentos das argamassas produzidas na idade de cura de 180 dias, são apresentadas na Figura 8 e Figura 9.

A Figura 8 identifica grão de FB coberto por produtos de hidratação em argamassa A05%. O ponto 1 aplicado por EDS mostra a sílica predominante, característica do FB. Percebe-se que a pasta de cimento hidratada envolve o grão de forma consistente, aparenta estar bem aderido, estando a face visível parcialmente coberta por hidratos. Ao analisar a zona de transição entre FB e a pasta de cimento, infere-se que esta esteja bem consolidada e que, aparentemente, não demonstre fissuração, tampouco grandes vazios aparentes. Nesse contexto, esse comportamento pode estar relacionado com o desempenho à compressão, ao apresentar-se significativamente igual à argamassa REF.

Avaliando as micrografias de A15% (Figura 9), percebe-se que estas apresentaram um comportamento diferente de A05%. Observa-se que a zona de transição ampliada e evidenciada apresenta interação frágil, com fratura delineando a interface grão de FB e pasta de cimento hidratada. O grão não foi envolvido pela pasta de cimento da forma com que se apresenta a Figura 8.

Figura 7 - Valores médios de resistência à compressão das argamassas em diferentes idades de cura

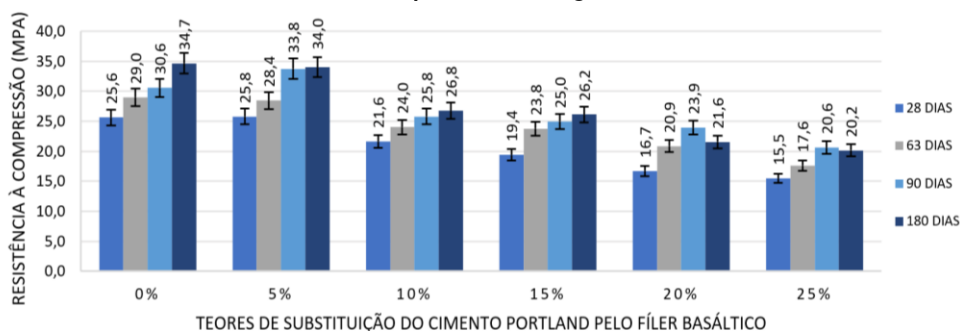


Figura 8 - Grão de FB coberto por produtos de hidratação junto à demarcação do ponto EDS e respectivos gráficos de pico elementar, argamassa A05%

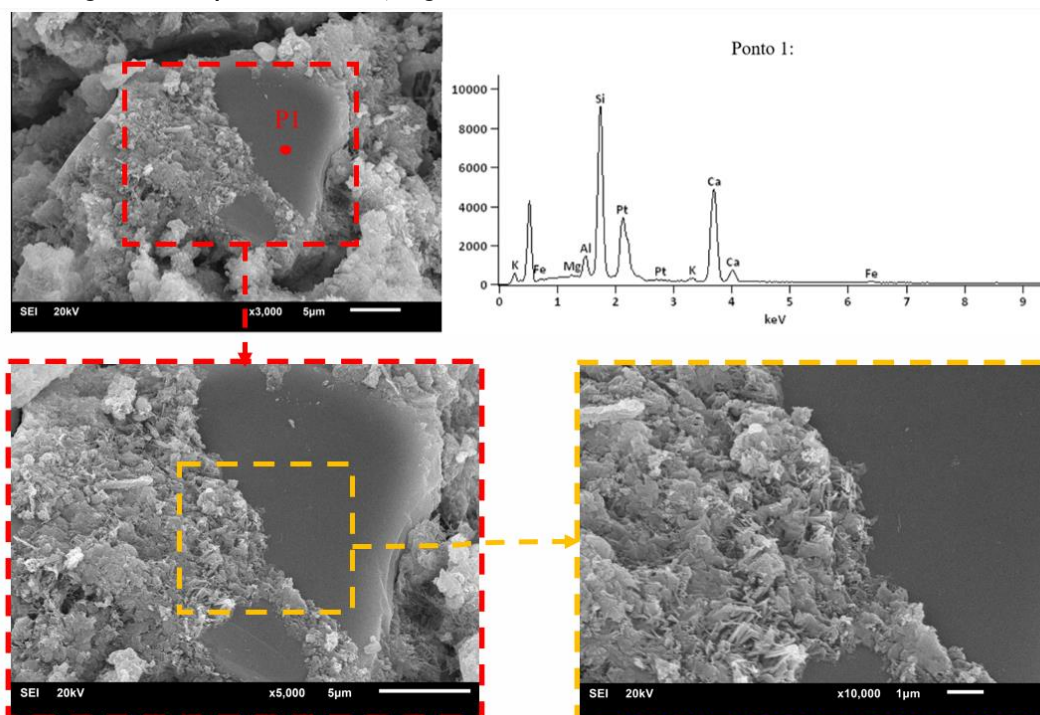
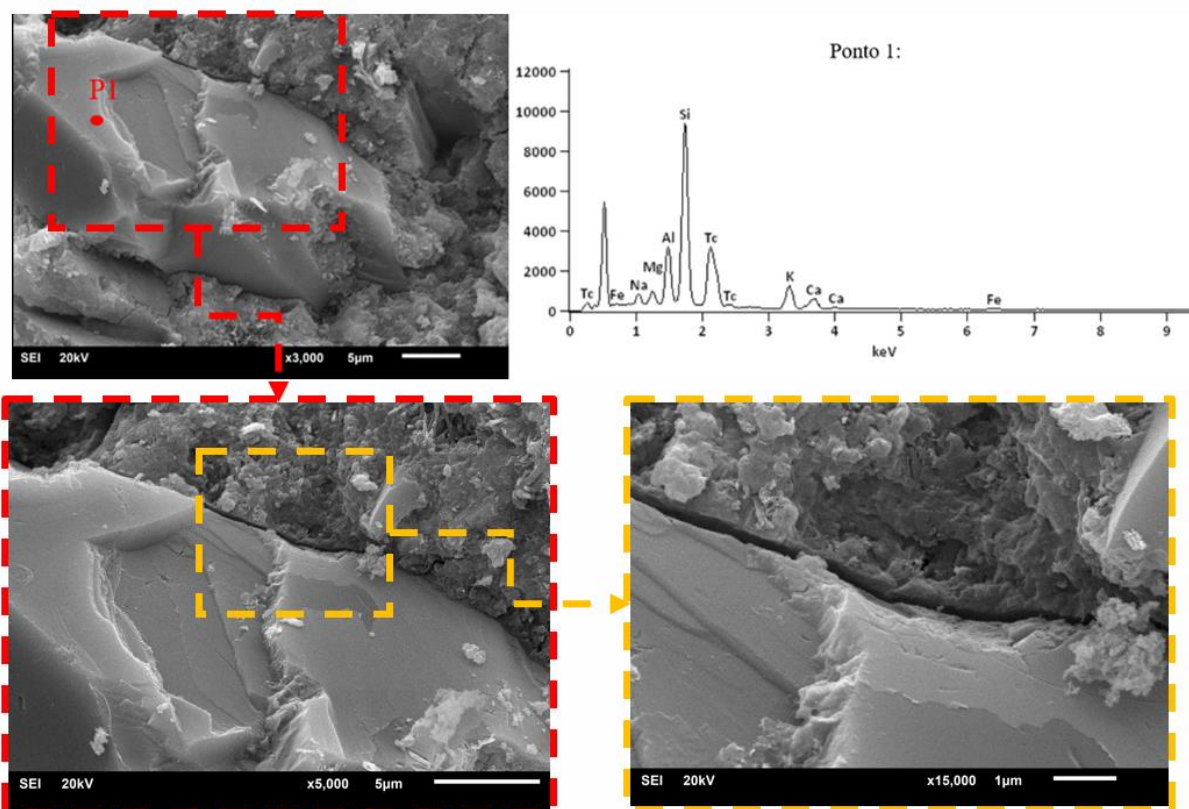


Figura 9 - Identificação do grão de FB, por análise EDS e gráfico de pico elemental, argamassa A15%



Visto isso, tanto a fratura existente na zona de transição quanto a redução da pasta que recobre o grão quando em comparação ao grão de A05% denota, talvez, um dos motivos pelos quais houve queda de resistência à compressão não apenas da argamassa A15%, mas também dos demais teores que obtiveram resultados à compressão inferior à REF: matriz cimentícia frágil. Pode-se perceber que a trinca ocorreu na zona de transição, pois o grão de FB possui resistência superior do que a pasta de cimento hidratada, e quanto mais fraca a matriz de cimento, mais prejudicada estará a zona de transição, sendo que a fissuração ocorrerá nessa interface e não fissurando o grão de FB em si.

Considerações finais

Com base nos resultados discutidos anteriormente, conclui-se que:

- (a) a caracterização química mostrou se tratar de um basalto de caráter básico;
- (b) ao avaliar a morfologia dos cristais formados não foi identificada sílica amorfa, apenas cristais. Por isso, quando avaliado esse quesito, o FB não pôde ser considerado pozolana. Porém, pode-se concebê-lo como material de enchimento, através do efeito fíler, atuando no empacotamento das partículas e melhoria na reologia das pastas;
- (c) quando analisada compatibilidade com o cimento Portland a análise estatística mostrou que a alteração da quantidade de água para consistência normal não foi significativa;
- (d) o FB não alterou significativamente os tempos de pega;
- (e) o FB atendeu aos requisitos químicos avaliados: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, teor de SO_3 , teor de umidade e perda ao fogo;
- (f) quanto aos requisitos físicos da NBR 12653 (ABNT, 2015a): o FB atendeu unicamente a determinação do material retido na peneira de abertura 45 μm . Quando avaliada atividade pozolânica com cal aos 7 dias e o desempenho à compressão aos 28 dias (teor contendo 25% de substituição) o FB não atendeu aos valores mínimos referenciados pela NBR 12653 (ABNT, 2015a). Esse fato deve-se à ausência de

material amorfo no FB. Portanto, FB não pode ser classificado como material com propriedades pozolânicas, frente à análise física, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2015a);

- (g) a argamassa A05% mostrou-se estatisticamente igual à argamassa REF, quando analisada no ensaio de desempenho à compressão para todas as idades avaliadas. Apesar do teor de substituição de 5% não constar na NBR 5752 (ABNT, 2014), ou seja, não pode servir de balizador para considerar o FB como material com propriedades pozolânicas, atenta-se para o resultado positivo deste. Do ponto de vista econômico e sustentável, apresenta-se como uma substituição viável;
- (h) sabe-se que o cimento indicado pela NBR 5752 (ABNT, 2014) e utilizado para o programa experimental é um cimento composto que possui, em teoria, de 11 a 25% de material carbonático, que já possui quantidade em massa de clínquer reduzida. Porém, salienta-se que, para avaliar o potencial pozolânico do FB, seja interessante utilizar cimentos com composição mais pura. Infere-se que o CP I ou CP V-ARI possam ser boas escolhas para avaliar a pozolanicidade, em função da composição que possui maior quantidade em massa de clínquer que o CP II-F-32;
- (i) ao analisar a zona de transição entre grão de FB e matriz de cimento hidratada, entende-se que a presença de FB na mistura não pode ser considerada balizador para uma zona de transição fragilizada, mas sim devido à redução da quantidade em massa do cimento Portland adicionada, sendo que a água de amassamento foi mantida fixa, somada a característica inerte apresentada pelo FB. O FB não reagiu com o hidróxido de cálcio para formar C-S-H complementar suficiente para aumentar a resistência das argamassas em idades tardias;
- (j) visando a redução do consumo do clínquer, torna-se interessante a utilização de FB, como material de enchimento e em baixos teores, como substituto do cimento Portland; e
- (k) ainda que nem todos os resultados atendam aos requisitos dispostos pela NBR 12653 (ABNT, 2015a), estes não são indiscutíveis. Além da verificação da reatividade do FB, deve-se levar em consideração o fato de que a redução do consumo de cimento é necessária para reduzir emissão de gases causadores do efeito estufa.

Referências

- ADESINA, A. Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions. **Environmental Challenges**, v. 1, n. 100004, p. 8, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C150**: standard specification for Portland cement. West Conshohocken, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C618**: standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. West Conshohocken, 2022.
- AMIN, M. *et al.* The influence of basalt minerals as cement substitution materials in mortar. **Acta Polytechnica**, v. 59, n. 6, p. 536-542, 2019.
- ASHRAF, M. *et al.* Physico-chemical, morphological and thermal analysis for the combined pozzolanic activities of minerals additives. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 6, p. 2207-2213, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro, 2015a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-3**: metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta: parte 3: determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: água para amassamento do concreto: parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606**: cimento Portland: determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: cimento Portland: determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018b.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: materiais pozolânicos: determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: materiais pozolânicos: determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: areia normal para ensaio de cimento: especificação. Rio de Janeiro, 2015c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: cimento Portland: análise química: determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 24**: materiais pozolânicos: determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003.
- BINICI, H. *et al.* Durability properties of concretes made with sand and cement size basalt. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 23, n. 145, p. 9, 2019.
- BORGES, L. A. C. **Ensaio de compressão de corpo de prova com duplo corte em cunha na avaliação de concretos com baixos teores de fibra de aço**. São Paulo, 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- BREDIKHIN, P. A.; KADYKOVA, Y. A. Basalt-filled composites based on polyethylene. **International Polymer Science and Technology**, v. 43, n. 7, p. 27-29, 2015.
- CARVALHO, S. Z. *et al.* Reducing environmental impacts: the use of basic oxygen furnace slag in portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 385-390, 2017.
- CHINDAPRASIRT, P.; RUKZON, S. Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 8, p. 1601-1606, 2008.
- DOBISZEWSKA, M.; BEYCIOĞLU, A. physical properties and microstructure of concrete with waste basalt powder addition. **Materials**, v. 13, n. 16, p. 18, 2020.
- DOBISZEWSKA, M.; PICHÓR, W.; SZOŁDRA, P. Effect of basalt powder addition on properties of mortar. **MATEC Web of Conferences**, v. 269, p. 06002, 2019.
- EL-DIDAMONY, H. *et al.* Basalt as pozzolana and filler in ordinary portland cement. **American Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 8, n. 2, p. 263-274, 2015.
- ENERGY TECHNOLOGY PERSPECTIVES. **Energy Technology Perspectives 2020**. Paris, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>. Acesso em: 11 maio 2022.
- EUROPEAN STANDARD. **EN 197-1**: cement: part 1: composition, specifications and conformity criteria for common cements. Bruxelas, 2011.
- FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Construção civil: desafios 2020**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-inovacao/construcao-civil.htm>. Acesso em: 19 mar. 2020.
- GARTNER, E. M.; MACPHEE, D. E. A physico-chemical basis for novel cementitious binders. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 736-749, 2011.
- GHELLER, R. Exploratory study for the alkaline activation of basalt powder as a supplementary cementitious matrix. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 4, e. 15405, 2022.
- GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares**. Curitiba, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- GOZI, D. D.; COUTO, A. F.; MORALES, G. Interferência da substituição parcial de cimento Portland por fíler basáltico na carbonatação de concretos. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS, 3., Coimbra, 2018. **Anais [...]** Coimbra, 2018.

- HOSSAIN, K. M. A. Blended cement using volcanic ash and pumice. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 10, p. 1601–1605, out. 2003.
- INGRAO, C. *et al.* The use of basalt aggregates in the production of concrete for the prefabrication industry: Environmental impact assessment, interpretation and improvement. **Journal of cleaner production**, v. 75, p. 195-204, jul. 2014.
- JAMSHAD, H.; MISHRA, R. A green material from rock: basalt fiber, a review. **The Journal of The Textile Institute**, v. 107, n. 7, p. 923-937, ago. 2015.
- JUN-YUAN, H.; SCHEETZ, B. E.; ROY, D. M. Hydration of fly ash-portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 14, n. 4, p. 505–512, 1984.
- KANNAN, D. M. *et al.* High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 35-41, jul. 2017.
- KARASIN, A. *et al.* The Effect of Basalt Aggregates and Mineral Admixtures on the Mechanical Properties of Concrete Exposed to Sulphate Attacks. **Materials**, v. 5, n. 1581, p. 16, fev. 2022.
- KAZMIERCZAK, C. de S.; ROSA, M.; ARNOLD, D. C. M. Influência da adição de filer de areia de britagem nas propriedades de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 2, abr./jun. 2016.
- LAIBAO, L. *et al.* Investigating the influence of basalt as mineral admixture on hydration and microstructure formation mechanism of cement. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 434-440, 2013.
- LAWRENCE, C. D. Physicomechanical and mechanical properties of portland cements. *In: Hewlett, P. C. Lea's Chemistry of cement and concrete*. Elsevier, Oxford, ed. 4, p. 343-419, 1998.
- MALHOTRA, V. M. Global warming, and role of supplementary cementing materials and superplasticisers in reducing greenhouse gas emissions from the manufacturing of portland cement. **International Journal of Structural Engineering**, v. 1, n. 2, p. 116-130, 2010.
- MEHTA, P. K. Greening of the concrete industry for sustainable development. **Concrete International**, v. 24, n. 7, p. 23-28, 2002.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- NOAMAN, M. A.; KARIM, M. R.; ISLAM, M. N. Comparative study of pozzolanic and filler effect of rice husk ash on the mechanical properties and microstructure of brick aggregate concrete. **Heliyon**, v. 5, n. 6, p. 15, 2019.
- NUNES, J. M. G.; KAUTZMANN, R. M.; OLIVEIRA, C. Evaluation of the natural fertilizing potential of basalt dust wastes from the mining district of Nova Prata (Brazil). **Journal of Cleaner Production**, v. 84, p. 649-656, 2014.
- OGAWA, K. *et al.* The mechanism of the hydration in the system C3S-pozzolana. **Cement and Concrete Research**, v. 10, n. 5, p. 683–696, 1980.
- PETROPAVLOVSKAYA, V. *et al.* The use of pulverized wastes of basalt production as a filler of gypsum compositions. **MATEC Web of Conferences**, v. 251, p. 01040, 2018.
- QIAO, H. *et al.* The feasibility of basalt rock powder and superfine sand as partial replacement materials for Portland cement and artificial sand in cement mortar. **Research and Application of Materials Science**, v. 1, n. 1, p. 12, 2019.
- QUEIROZ FILHO, A. A.; AMORIM NETO, A. A. **Cimento**. Agência Nacional de Mineração, jan. 2018. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/cimento>. Acesso em: 19 mar. 2020.
- ROSA, M. **Análise do efeito do teor de microfios nas propriedades das argamassas de revestimento com utilização de areia de britagem basáltica**. São Leopoldo, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

- SARAYA, M. E.-S. I. Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 104-112, 2014.
- SCOLARO, T. P.; ROCHA, J. C. Effect of filler nature on mechanical performance and drying shrinkage of self-leveling mortars. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, n. 3, 2021.
- TEYMEN, A. Effect of mineral admixture types on the grout strength of fully-grouted rockbolts. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 376-382, 2017.
- TOPÇU, İ. B.; UĞURLU, A. Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 7, p. 1071-1075, 2003.
- TRISTÃO, F. A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento**. Florianópolis, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- UZAL, B.; TURANLI, L.; MEHTA, P. K. High-volume natural pozzolan concrete for structural applications. **ACI Materials Journal**, v. 104, n. 5, p. 5, 2007.
- WANSOM, S.; JANJATURAPHAN, S.; SINTHUPINYO, S. Pozzolanic activity of rice husk ash: comparison of various electrical methods. **Journal of Metals, Materials and Minerals**, v. 19, n. 2, p. 1-7, 2009.
- WILBERT, D. G. B.; KAZMIERCZAK, C. de S.; KULAKOWSKI, M. P. Análise da interface entre agregados reciclados de concreto e argamassas de concretos com cinza de casca de arroz e fíler basáltico por nanoindentação. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 253-268, abr./jun. 2017.

Alice Helena Meinhart

Conceitualização, Pesquisa, Metodologia, Análise de dados, Validação de dados e experimentos, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Feevale | ERS-239, 2755 | Novo Hamburgo - RS - Brasil | CEP 93525-075 | Tel.: (51) 99913-8948 | E-mail: alicehmei@gmail.com

Rodrigo Brunetti Macedo

Pesquisa e Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Feevale | Tel.: (51) 98622-0708 | E-mail: rbmacedo2005@hotmail.com

Tayná Thomaz Guterres

Pesquisa e Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Feevale | E-mail: tayna.guterres@gmail.com

Daiana Cristina Metz Arnold

Metodologia, Supervisão, Validação de dados e experimentos.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Feevale | Tel.: (51) 99268-6659 | E-mail: daim@feevale.br

Editor do artigo: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros**

Editor de seção: **Ercília Hitomi Hirota e Juliana Parise Baldauf**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.