



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



Isabelly de Almeida Tambasco

**Matrizes de cimento de silicato de magnésio hidratado
(M-S-H) com incorporação de fíleres residuais**

OURO PRETO
Julho de 2026

Isabelly de Almeida Tambasco

Matrizes de cimento de silicato de magnésio hidratado
(M-S-H) com incorporação de fileres residuais

Trabalho Final de Curso apresentado como
parte dos requisitos para obtenção do Grau de
Engenheira Civil na Universidade Federal de
Ouro Preto.

Orientador: Dr. Ricardo A. Fiorotti Peixoto

Orientador: Me. Victor Rezende Carvalho

OURO PRETO

Julho de 2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T154m Tambasco, Isabelly de Almeida.

Matrizes de cimento de silicato de magnésio hidratado (M-S-H) com incorporação de fileres residuais. [manuscrito] / Isabelly de Almeida Tambasco. - 2026.

33 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadores: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto, Me. Victor Rezende Carvalho.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Cimento - Cimento magnesiano. 2. Cimento - Silicato de Magnésio Hidratado (MSH). 3. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.) - Minas e recursos minerais. 4. Quartzito. 5. Esteatito. I. Carvalho, Victor Rezende. II. Peixoto, Ricardo André Fiorotti. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Isabelly de Almeida Tambasco

Matrizes de cimento de silicato de magnésio hidratado (M-S-H) com incorporação de fileres residuais

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenharia Civil

Aprovada em 27 de julho de 2026

Membros da banca

D.Sc. - Ricardo André Fiorotti Peixoto - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
M.Sc. - Victor Rezende Carvalho - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
D.Sc. - José Agenor Carvalho Júnior - Universidade Federal de São João del-Rei
Eng.^a - Valquíria Pereira Lima - Universidade Federal de Ouro Preto

Ricardo André Fiorotti Peixoto, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 31/08/2026



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Andre Fiorotti Peixoto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/08/2026, às 15:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1179503** e o código CRC **FB3BDFED**.

*Dedico este trabalho à minha família,
que sempre me ofereceu a certeza do amor
e, com ela, a força necessária para enfrentar meus
maiores medos.*

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus por sempre me guiar e proteger. Agradeço aos meus pais, Maria Ivanete e Mauro, por me proporcionarem um caminho tão bonito, pelo incentivo aos estudos desde cedo, por acreditarem em mim acima de tudo. Por me darem asas para voar e sempre me lembrarem que tenho para onde voltar, não importa o que aconteça. À minha irmã, Victória, minha primeira amiga, agradeço por compartilhar comigo uma parte da vida que pertence só a nós duas, por manter nossa relação leve, bonita e repleta de amor.

Às minhas amigas Esther, Giovana e Maria Eduarda, agradeço pela amizade de longa data, pela torcida constante e pelo encorajamento, mesmo à distância. Obrigada por toda a motivação nos momentos desafiadores da caminhada.

Expresso minha gratidão ao professor Ricardo Fiorotti, pelo auxílio e incentivo ao longo da minha trajetória acadêmica. Sua forma de instigar dúvidas e provocar reflexões me fez ampliar meu olhar acadêmico. Agradeço também ao Victor, que esteve comigo durante a iniciação científica e acompanhou de perto este trabalho. Seu suporte, orientação e paciência foram fundamentais para despertar em mim um olhar admirador e genuíno para a pesquisa. Meu aprendizado foi leve e prazeroso graças à sua presença.

À República Frikote, agradeço pelo acolhimento diante do novo, no início dessa jornada. Obrigada às amigas que entraram e permaneceram na minha vida por meio dessa convivência.

Agradeço a todas as professoras e professores que contribuíram para minha formação em Engenharia Civil. Em especial, à Aline Figueiredo, Ana Letícia Pilz, Daniela Lessa, Aníbal Santiago, Keoma Defáveri e Marcílio Freitas, que me ensinaram sobre resiliência, didática e dedicação a um trabalho de tamanha importância.

Também agradeço aos membros do Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos Reciclos/CNPq), por abrirem uma porta tão significativa para o mundo da pesquisa e por todo o aprendizado ao longo da graduação. Tenho grande admiração por cada pessoa que integrou esse grupo, realizar pesquisa no Brasil é um desafio constante, que exige dedicação e resiliência.

Por fim, agradeço ao CNPq e ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC²/UFOP) pela infraestrutura disponibilizada, essencial para a realização deste trabalho.

RESUMO

O cimento Portland é um dos principais responsáveis pelas emissões de CO₂ na indústria da construção. Nesse cenário, os cimentos de silicato de magnésio hidratado (M-S-H) despontam como alternativa promissora, pois apresentam menores temperaturas de calcinação e a possibilidade de captura de CO₂ durante o ciclo de vida, mantendo propriedades mecânicas essenciais. Esses cimentos são constituídos por uma fonte de sílica (SiO₂) e uma fonte de óxido de magnésio (MgO) reativos, e sua investigação abre caminho para soluções mais sustentáveis. O presente estudo avaliou matrizes de cimento M-S-H com a adição de resíduos da mineração, de quartzito e pedra-sabão, como fíleres. Foram produzidos sete traços: uma matriz de referência e seis matrizes com substituições parciais de 10, 20 e 30% em massa do ligante por cada resíduo. Os resultados evidenciaram que a substituição parcial de 10% de quartzito (traço RQT10) proporcionou maior resistência à compressão axial, superando inclusive a matriz de referência. Esse desempenho foi atribuído ao empacotamento da matriz e à ação de preenchimento do quartzito, que favoreceu a formação do ligante e contribuiu para altas resistências. As substituições superiores a 20% apresentaram redução nos valores de resistência, possivelmente influenciadas pela relação água/finos fixada (0,55). A análise das propriedades físicas e mecânicas destacou o bom desempenho das matrizes RQT10 e RQT20, confirmando o potencial do quartzito como material de preenchimento em cimentos magnesianos. Em contrapartida, as matrizes com pedra-sabão apresentaram os menores resultados, indicando que o resíduo deve ser analisado mais profundamente para compreender melhor seu comportamento e otimizar sua utilização. Conclui-se, portanto, que os resíduos de quartzito e pedra-sabão representam alternativas promissoras para aplicação em matrizes de cimentos M-S-H, embora demandem estudos adicionais para otimização das condições de uso e aprofundamento da compreensão de seu comportamento. Além de reduzir impactos ambientais, sua incorporação abre novas perspectivas para inovação e valorização de subprodutos da mineração, alinhando-se às demandas de sustentabilidade e eficiência da construção civil contemporânea.

Palavras-chave: Cimento magnésiano, cimento M-S-H, quartzito, esteatito, resíduos da mineração.

ABSTRACT

Portland cement is one of the main contributors to CO₂ emissions in the construction industry. In this context, magnesium silicate hydrate (M-S-H) cements have emerged as a promising alternative, as they require lower calcination temperatures and offer the possibility of CO₂ uptake during their life cycle while maintaining essential mechanical properties. These cements are composed of a reactive silica (SiO₂) source and a reactive magnesium oxide (MgO) source, and their investigation paves the way for more sustainable solutions. The present study evaluated M-S-H cement matrices incorporating quartzite and soapstone mining residues as fillers. Seven mix designs were produced: one reference matrix and six matrices with partial replacement of 10, 20, and 30% by mass of the binder with each residue. The results showed that the 10% quartzite replacement (RQT10 mix) provided the highest axial compressive strength, even surpassing that of the reference matrix. This performance was attributed to matrix packing and the filler effect of quartzite, which favored binder formation and contributed to high strength. Replacements above 20% resulted in lower strength values, possibly influenced by the fixed water-to-fines ratio (0.55). The analysis of the physical and mechanical properties highlighted the good performance of the RQT10 and RQT20 matrices, confirming the potential of quartzite as a filler material in magnesium-based cements. In contrast, the matrices containing soapstone exhibited the lowest results, indicating that this residue should be further investigated to better understand its behavior and optimize its use. Therefore, quartzite and soapstone residues represent promising alternatives for application in M-S-H cement matrices, although further studies are required to optimize their use conditions and deepen the understanding of their behavior. In addition to reducing environmental impacts, their incorporation opens new perspectives for innovation and the valorization of mining by-products, aligning with the demands for sustainability and efficiency in the contemporary construction industry.

Keywords: Magnesium-based cement, M-S-H cement, quartzite, soapstone, mining residues.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma das etapas do experimento	10
Figura 2 – Materiais utilizados	11
Figura 3 – Moinho de bolas MARCONI.....	12
Figura 4 – Distribuição granulométrica dos resíduos beneficiados	14
Figura 5 – Gráfico de Resistência à compressão.....	16

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química dos materiais	11
Tabela 2 – Composição dos traços	13
Tabela 3 – Propriedades físicas dos resíduos beneficiados	15
Tabela 4 – Massa Específica Aparente	18

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Objetivos e justificativa	2
2.1. Objetivo geral	2
2.2. Objetivos específicos	2
2.3. Justificativa	2
3. Revisão da literatura	3
3.1. Cimento Portland e seus impactos	3
3.2. Cimentos M-S-H.....	5
3.3. Resíduo da Mineração de Quartzito (RQT).....	7
3.4 Resíduo da Mineração de Pedra-sabão (RPS)	8
4. Materiais e métodos	10
4.1. Materiais	11
4.2. Preparo dos Materiais	12
4.3. Caracterização dos materiais.....	12
4.4. Produção das pastas de cimento.....	12
4.5. Caracterização das pastas de cimento	13
5. Resultados e discussão.....	14
5.1. Propriedades dos materiais	14
5.2. Propriedades das Pastas	15
6. Conclusão.....	18
7. Referências.....	20

1. INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um dos principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa associadas à construção civil (SNIC, 2025). Desde a década de 1990, o setor vem estabelecendo metas e aplicando medidas para reduzir tais impactos (SNIC, 2025). Entre as alternativas estudadas, destacam-se os materiais cimentícios suplementares, adições minerais e substituições parciais, como o uso de fileres (BERNARD *et al.*, 2023; CUI *et al.*, 2026; DAUKŠYS; SKRIPKIŪNAS; GRINYS, 2010; DE LIMA *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2021). No entanto, a demanda por matérias primas mais alinhadas às necessidades de redução da pegada de carbono é crescente.

Diante desse cenário, matrizes cimentícias vêm ganhando destaque, especialmente aquelas à base de ligantes magnesianos, como o cimento M-S-H, constituído por uma fonte de sílica reativa e óxido de magnésio (BERNARD *et al.*, 2023). Essas matrizes apresentam vantagens significativas: temperaturas de calcinação do cimento mais baixas em comparação ao cimento Portland e a possibilidade de incorporação de gás carbônico, tornando-se uma alternativa promissora para reduzir as emissões de CO₂ associadas à produção cimentícia (BERNARD *et al.*, 2023). O estudo das suas características físicas analisa o impacto de diferentes proporções de fonte de sílica e de óxido de magnésio, fatores água/cimento e a incorporação de fileres, revelando um campo inovador e que se mostra como potencial para ganhos ambientais mantendo as propriedades mecânicas (WYRZYKOWSKI *et al.*, 2026).

Nesse contexto, o filer, material predominantemente inerte, de elevada finura (D₉₀ entre 30 e 60 µm) e granulometria bem distribuída, composta por diferentes tamanhos de partículas, atua como agente de preenchimento, contribuindo para a densificação da matriz, o aprimoramento de suas propriedades mecânicas e a redução de custos de produção (COSTA *et al.*, 2022; CUI *et al.*, 2026; FRANCO DE CARVALHO *et al.*, 2019). A busca por fileres alternativos nos leva ao cenário da microrregião de Ouro Preto-MG, o terceiro maior polo de extração de rochas naturais de Minas Gerais (LIMA *et al.*, 2007). Nessa região, a exploração de minerais como o esteatito, conhecido popularmente como pedra-sabão, e o quartzito gera grandes volumes de resíduos, frequentemente descartados de forma inadequada (TORRES, 2007). O pó fino da pedra-sabão, rico em talco, é associado a doenças respiratórias na população local, além de impactos ambientais negativos (BEZERRA, 2002). De modo semelhante, os rejeitos da extração de quartzito carecem de destinação adequada (RUSSO, 2011).

A incorporação desses resíduos em matrizes de cimento M-S-H representa uma oportunidade de transformar materiais subutilizados em componentes de valor agregado para a construção civil. Essa abordagem não apenas contribui para a redução dos impactos ambientais da mineração, mas também pode promover o desenvolvimento de cimentos mais sustentáveis e eficientes.

O presente trabalho analisa a utilização de resíduos da mineração de pedra-sabão e quartzito como material de preenchimento em matrizes de cimento M-S-H, comparando seu desempenho com uma matriz de referência, sem nenhuma substituição. Os resultados visam oferecer soluções que promovam avanços tecnológicos e benefícios ambientais, com destaque para a microrregião de Ouro Preto.

2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

2.1. Objetivo geral

Avaliar o desempenho mecânico da utilização de resíduos da mineração de quartzito e esteatito (pedra-sabão) como fileres em matrizes de cimento M-S-H.

2.2. Objetivos específicos

- Investigar as propriedades físicas e mecânicas de pastas de cimento M-S-H contendo resíduos da mineração de pedra-sabão e quartzito;
- Comparar o desempenho das pastas propostas com o da pasta de referência, produzida sem adição de fileres;
- Avaliar a viabilidade de utilização dos resíduos propostos a partir dos resultados obtidos;
- Contribuir para a formação de recursos humanos capacitados na realização de ensaios e análises laboratoriais, promovendo o desenvolvimento de competências técnicas nessa área de estudo.

2.3. Justificativa

Os cimentos de silicato de magnésio hidratado (M-S-H) representam uma alternativa ao cimento Portland convencional e podem ser produzidos a partir do uso de resíduos industriais (CAPELO, 2021; SONAT; UNLUER, 2019; ZHANG; VANDEPERRE; CHEESEMAN, 2014). Essa estratégia contribui para a redução dos impactos causados

pela disposição inadequada dos resíduos, bem como na mitigação dos impactos ambientais atribuídos ao cimento Portland.

Estudos da literatura avaliaram o desempenho de matrizes M-S-H contendo diferentes resíduos industriais, especialmente como precursores ricos em sílica (SiO_2) (CAPELO, 2021; JIN; AL-TABBAA, 2014; MENG *et al.*, 2023; SONAT; UNLUER, 2019). A literatura, no entanto, apresenta uma lacuna quanto à incorporação de resíduos como materiais de preenchimento (fileres).

A região de Ouro Preto possui abundância de resíduos de mineração, decorrentes da histórica atividade minerária que perdura até os dias atuais (MENDONÇA, 2023; MOREIRA; RODRIGUES, 2017). A busca pela valorização desses resíduos, dos quais se incluem os da mineração de quartzito e esteatito (pedra-sabão), estimula pesquisas em diferentes áreas (ALMEIDA; SOUSA, 2006; GNANARAJ *et al.*, 2021; LUUKKONEN *et al.*, 2019; RUSSO, 2011). Essas pesquisas visam mitigar problemas sociais, ambientais e econômicos atribuídos a esses materiais, tais como o desenvolvimento de doenças respiratórias, a poluição de cursos hídricos e do solo e a subutilização dos minerais extraídos (BEZERRA, 2002).

Nesse sentido, o impacto esperado deste trabalho poderá contribuir com os estudos acerca dos cimentos M-S-H e com a pesquisa sobre a valorização de resíduos industriais na construção civil. Além da pesquisa e do setor produtivo, espera-se que os resultados também beneficiem as comunidades da microrregião de Ouro Preto-MG.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Cimento Portland e seus impactos

O cimento é o segundo material mais consumido pelo homem, ficando atrás apenas da água (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Desde sua invenção no século XIX, o ligante de cal e argila consolidou-se como a principal escolha na construção civil. O baixo custo, garantido pela abundância de matérias-primas e pela produção em larga escala, sustenta essa posição e sua versatilidade permite aplicações em diferentes etapas e setores da obra, ampliando seu uso ((BATTAGIN, 2009). O desempenho técnico do cimento Portland, associado à produção de concretos, está relacionado a três características que garantem sua competitividade no mercado: estabilidade, durabilidade e resistência estrutural (ABNT, 2018; BATTAGIN, 2009; MEHTA; MONTEIRO, 1994)

A formação do clínquer é dada por duas matérias primas: carbonato de cálcio (CaCO_3), obtido pela extração do calcário; e silicatos de alumínio e ferro (Al_2SiO_5 e Fe_2SiO_4), obtidos por meio da argila (CAPELO, 2021). Esses materiais passam pelo processo de queima e moagem resultando na extração dos óxidos necessários para a reação de hidratação do cimento (NEVILLE, 2016). A hidratação desses óxidos forma cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), a fase mais relevante da pasta, responsável por cerca de 50 a 60% do volume de sólidos em uma matriz de cimento totalmente hidratada, sendo determinante para as propriedades da pasta (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A principal utilização do cimento Portland está na produção de concreto, o que torna secundária a contabilização das emissões de CO_2 provenientes de suas demais aplicações, devido a representação pouco significativa em comparação ao uso predominante (GARTNER; HIRAO, 2015). Estudos vêm analisando a viabilidade de aplicação de matrizes alternativas como um caminho a diminuir as emissões de CO_2 associadas a produção do cimento Portland.

Segundo a GCB (GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL, 2025), a construção civil é responsável pela emissão de 139 milhões de toneladas de CO_2 por ano. Apesar da estatística alarmante, a indústria cimentícia tem se destacado nas últimas décadas por sua atuação sustentável, sendo reconhecida globalmente como uma das mais ecoeficientes (GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL, 2025). Entretanto, a redução das emissões de carbono segue sendo uma grande preocupação desse setor, que estabeleceu metas de curto, médio e longo prazo para reduzir em até 35% as emissões da indústria até 2050. (SNIC, 2025). Essas emissões têm origem principalmente em dois processos durante a queima de calcário e argila: 1) a reação térmica decorrente do aquecimento a altas temperaturas (liberação do CO_2 devido a calcinação dos materiais carbonatados) 2) através da queima de combustíveis fósseis para alimentação do forno (BARCELO *et al.*, 2014).

O desafio da redução das emissões de carbono foi abordado pelo documento Roadmap tecnológico do cimento (2025) e segundo os pesquisadores Scrivener; John e Gartner, (2018) há quatro principais estratégias para mitigar esse problema: 1) Aumento da eficiência energética no processo de produção do cimento; 2) Utilização de combustíveis alternativos nos fornos; 3) Substituição do clínquer na matriz cimentícia; e 4) Captura e armazenamento de carbono.

Como descrito neste item, análises preliminares observam que o uso do cimento Portland traz consigo a resistência mecânica, trabalhabilidade e metodologia para resultados muito bem consolidados juntamente com uma indústria que enxerga as problemáticas das emissões de CO₂ associadas ao processo de produção do cimento. A partir desse cenário, as estratégias para a mitigação dessas questões vêm sendo desenvolvidas a partir de quatro principais frentes, visando alternativas que entreguem resistência mecânica, trabalhabilidade e metodologia associados a matrizes mais sustentáveis.

3.2. Cimentos M-S-H

Os cimentos de silicato de magnésio hidratado (M-S-H) estão sendo analisados como uma alternativa à matriz de cimento Portland (BERNARD *et al.*, 2023; JIN; AL-TABBAA, 2014; MENG *et al.*, 2023). Eles têm como matéria prima uma fonte de sílica reativa e uma fonte de magnésio (SONAT; UNLUER, 2019). A partir da hidratação desse sistema, ocorre a formação do hidróxido de magnésio (brucita), que, ao reagir com a sílica dissolvida, dá origem ao gel de Silicato de Magnésio Hidratado (M-S-H), produto responsável pelas propriedades mecânicas da matriz (JIN; AL-TABBAA, 2014). O pH do sistema e a reatividade dos precursores são fatores determinantes da taxa de formação do M-S-H (JIN; AL-TABBAA, 2014).

As principais vantagens de matrizes de cimento M-S-H, ainda em estudo, relacionam-se à menor temperatura necessária para a calcinação das matérias-primas e à possibilidade de captura de CO₂ (BERNARD *et al.*, 2023; MENG *et al.*, 2023). Enquanto o cimento Portland exige temperaturas próximas de 1450 °C, a produção do cimento de magnésio reativo ocorre em faixas significativamente mais baixas, entre 700 e 1000 °C, fator que pode representar uma alternativa potencialmente mais sustentável (MENG *et al.*, 2023). Bernard *et al.* (2023) destacam o crescente interesse em cimentos à base de óxido de magnésio, ressaltando seu potencial para emissões reduzidas ou até mesmo negativas de CO₂, através da possibilidade de captura de CO₂ das matrizes M-S-H. Essa diferença contribui para que as matrizes M-S-H sejam apontadas como uma alternativa promissora na redução das emissões de CO₂ ligadas à indústria (MENG *et al.*, 2023).

Em contrapartida, foi reportada a necessidade de uma relação a/c mais elevada em comparação ao cimento Portland, devido à alta área de superfície e à finura dos precursores sólidos (SMIRNOVA, 2020; SREENIVASAN *et al.*, 2024; TRAN; SCOTT, 2016), além da menor disponibilidade de matéria-prima e da escassez de estudos que

avaliem o desempenho em longo prazo, visto que a resistência e a durabilidade dos ligantes M-S-H dependem fortemente das características dos precursores, do teor de água e da porosidade da matriz, aspectos ainda pouco compreendidos (BERNARD et al., 2023). Embora pesquisas envolvendo fontes alternativas de precursores estejam em andamento, muitas carecem de análises de durabilidade ou foram descartadas devido ao comportamento insatisfatório. Walling e Provis (2016) apresentaram uma revisão bibliográfica que reforça essas limitações ao mostrar diversos sistemas cimentícios à base de MgO que enfrentam desafios técnicos e de desempenho, que dificultam sua aplicação em larga escala, seja pela baixa resistência à água, pela dificuldade de produção ou por problemas de estabilidade e custo. Nesse cenário, novos estudos continuam sendo fundamentais para ampliar o entendimento dessas matrizes e tornar possível sua aplicação prática.

Jin e Al-Tabbaa (2014) analisaram a taxa de formação de M-S-H utilizando diferentes fontes de precursores: duas opções de óxidos de magnésio comercial e duas fontes de sílica (microsílica e farinha de sílica). Observa-se que os fatores de maior influência na formação do M-S-H são a reatividade e o pH da solução e a cristalinidade da sílica. Foi comprovado que através da queima na temperatura adequada (700 – 1000°C), o MgO se torna mais reativo, e sua reatividade determina a quantidade de brucita que estará disponível para a reação, fator determinante para a maior formação de M-S-H.

Em outro estudo, Sonat e Unluer (2019) avaliaram, durante 56 dias, o desempenho e o desenvolvimento microestrutural de pastas à base de cimento M-S-H. Para isso, utilizaram dois tipos de cinza de casca de arroz em substituição à sílica ativa: uma cristalina e outra amorfa. Os resultados foram comparados com a pasta de referência produzida com microsílica, permitindo analisar os efeitos de cada substituição. Clique ou toque aqui para inserir o texto.. Os traços contendo a cinza cristalina apresentaram as menores resistências devido à ausência de reação com as fases de magnésio. Nas amostras com a sílica amorfa observou-se um rápido desenvolvimento inicial e altos valores finais de resistência. As amostras de referência desempenharam uma formação inicial de M-S-H mais lenta, mas ao final do período atingiram os maiores valores de resistência entre os 3 traços, devido a formação contínua de M-S-H. Os diferentes resultados estão associados as diferentes propriedades dos materiais usados como fonte de sílica, mas a matriz atingiu resultados positivos em relação à resistência a compressão.

3.3. Resíduo da Mineração de Quartzito (RQT)

Tendo como principal destinação econômica a construção civil, a indústria de extração e beneficiamento de rochas naturais representa um setor relevante no cenário mundial, especialmente no setor de revestimentos e ornamentação de ambientes (DOS SANTOS, 2015; TORRES, 2007). O quartzito é uma rocha metamórfica, formada através da transformação de outras rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares (MENDONÇA, 2023). Seu processo de extração ocorre por meio do desmonte de bancadas do maciço rochoso e segue para o beneficiamento (DOS SANTOS, 2015).

Segundo Russo (2011), a quantidade de rejeito de quartzito gerado no Brasil pode chegar a aproximadamente seis milhões de toneladas por ano. Esse valor é decorrente da etapa de beneficiamento das grandes e espessas placas ou blocos, responsável pela maior geração de resíduos (DOS SANTOS, 2015). A destinação do pó fino residual de quartzito, em grande volume e de natureza não biodegradável, representa um dos principais desafios da indústria extratora. O material gera impactos significativos tanto para os seres humanos quanto para o meio ambiente, o que reforça a necessidade de soluções adequadas para seu manejo (DOS SANTOS, 2015).

Dentre os impactos gerados pela disposição incorreta do resíduo no meio ambiente estão os problemas respiratórios em seres humanos, decorrentes da exposição ao pó residual; o assoreamento dos cursos d'água, danos físicos ao solo e a consequente perda de biodiversidade que afetam diretamente a fauna e a flora (DOS SANTOS, 2015; RUSSO, 2011; SOUZA; PINHEIRO; HOLANDA, 2010). A partir da necessidade de encontrar uma disposição adequada para esse resíduo e da busca por matérias-primas alternativas que reduzam o uso de recursos naturais não renováveis, pesquisas que avaliam a utilização deste resíduo em matrizes cimentícias vem ganhando destaque. (DAUKŠYS; SKRIPKIŪNAS; GRINYS, 2010; DE MEDEIROS *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2021).

A microrregião de Ouro Preto, com destaque para os municípios de Ouro preto, Mariana e Itabirito, representa o terceiro maior centro produtor de quartzito em Minas Gerais (LIMA *et al.*, 2007). O quartzito apresenta uma estrutura policristalina, formada predominantemente por cristais de quartzo, mineral composto principalmente por sílica, alumina e diferentes óxidos. (BARROS *et al.*, 2016; MEDEIROS *et al.*, 2019; LIMA *et al.*, 2007; SILVA; LEÃO; REIS, 2021)

Li et al. (2021) analisaram a viabilidade do uso de diferentes pós de rochas litológicas como substituição parcial ao cimento em matrizes cimentícias, entre elas o pó de quartzito. Foram observadas alterações em relação ao tempo de pega, resistência a compressão, retração por secagem e caracterização da estrutura porosa. Em síntese, foram obtidas as seguintes conclusões associadas a essa substituição: retardo do tempo de pega, aumento da resistência a compressão e retração por secagem devido à finura do pó. O tipo de litologia teve efeito mínimo na porosidade total. Em síntese os resultados finais foram promissores, e o pó de quartzito é uma boa opção para a substituição parcial do cimento convencional.

Em outro estudo, Lima et al. (2021) verificaram o efeito filler dos resíduos dos processos de extração de quartzito em substituição parcial do agregado miúdo (areia média natural) na produção de argamassas de revestimento. O compósito se destacou pela menor relação água/cimento (a/c) devido a quantidade reduzida de finos. A análise da composição mineralógica indicou a predominância de quartzo. As argamassas obtidas com a substituição de 20% por quartzito, obtiveram maiores resistências do que as de referência, confirmando a sua aplicabilidade como material inerte de preenchimento.

Por fim, Mendonça (2023) avaliou qualitativamente a utilização de resíduos britados do quartzito foliado e maciço como agregados para misturas granulares e asfálticas. O autor observou que, apesar da mesma formação geológica de origem, os quartzitos possuíam características destoantes. Um deles era maciço e o outro foliado, com menor percentual de quartzo. Foram encontrados materiais não litificados nas pilhas de bota-fora do quartzito foliado, fator que pode ter prejudicado o desempenho da matéria prima nos ensaios de desgaste mecânico por abrasão, choque e impacto. As misturas foram analisadas quanto a durabilidade física, desempenho estrutural e comportamento mecânico. De modo geral, o resíduo de quartzito maciço apresentou desempenho superior ao quartzito foliado. Ainda assim, ambos atenderam aos critérios estabelecidos, demonstrando a viabilidade do uso de resíduos de diferentes tipos de quartzito em misturas para pavimentação rodoviária.

3.4 Resíduo da Mineração de Pedra-sabão (RPS)

O uso da pedra-sabão no Brasil teve início no período colonial, quando passou a ser empregada como matéria-prima em obras de engenharia, especialmente na construção de igrejas e na ornamentação estatuária barroca (BEZERRA, 2002). A partir desse contexto

histórico, sua exploração e aplicações foram ampliadas. Atualmente, é utilizado como matéria prima para revestimento, setor que alimenta o mercado para exportações e destaca-se internamente como material destinado à produção artesanal, prática tradicional transmitida entre gerações na região, com a confecção de decorações e utensílios de cozinha (PANTUZA, 2025; SANTOS; SOUSA; LIMA, 2009).

O processo de extração destinado à exportação requer blocos com volumes aproximados de 7 m³, conforme estabelecido pela NBR15012 (ABNT, 2013). As partes que não atendem a essas dimensões, conhecidas como pontas, são aproveitadas na produção artesanal (SANTOS; SOUSA; LIMA, 2009). Dessas pontas, seleciona-se o fragmento mais adequado para cada produto final, considerando que seus tamanhos e formatos são variados e irregulares. Em seguida, a peça é torneada e polida, etapas responsáveis pela maior geração de resíduos em pó (TORRES, 2007).

Almeida e Sousa (2006) analisaram o método de lavra e o sistema produtivo artesanal do esteatito no distrito de Santa Rita de Ouro Preto (Ouro Preto-MG), destacando as mudanças ocorridas com a transição da atividade de base rural para um modelo de produção industrial. Em seu estudo, são apresentadas estatísticas sobre a produção de peças artesanais, indicando que cerca de 90% do material extraído se converte em resíduos, dos quais 70% não possuem destinação adequada. Esse descarte inadequado gera impactos ambientais e sociais relevantes, como riscos à saúde dos artesãos devido à inalação do pó residual da pedra-sabão e a poluição de corpos hídricos, ocasionada pelo carreamento de partículas finas para os efluentes após o processo de lixamento.

A pedra-sabão é uma rocha metamórfica de baixa dureza. Possui como principal mineral em sua composição o talco, composto de silicato de magnésio hidratado (RODRIGUES; LIMA, 2012). Seu uso como matéria prima na construção ainda é pouco explorado, mas estudos vêm sendo desenvolvidos para avaliar sua aplicabilidade como material de preenchimento (GNANARAJ *et al.*, 2021).

Luukkonen *et al.* (2019) analisaram o uso do pó de resíduo de esteatito como um dos precursores em materiais ativados alcalinamente, analisando suas propriedades mecânicas e de durabilidade. A adequação do resíduo para a preparação de aglutinante álcali-ativado foi demonstrada. Resultados aceitáveis de resistência mecânica foram obtidos, entretanto, constatou-se desempenho inferior frente a ácidos fortes e ciclos de congelamento e descongelamento e observou-se alta porosidade, com consequente elevada absorção de água. As propriedades desse material o apontam como potencial

alternativa para a produção de elementos para lareira, sendo preparado um demonstrativo com sucesso, apresentando boa trabalhabilidade e ausência de fissuras.

Em outro estudo, Gnanaraj et al. (2021) realizaram uma investigação experimental sobre a viabilidade e a durabilidade do uso de concreto autoadensável com cinzas volantes e pó ultrafino de pedra-sabão natural. Em todos os parâmetros avaliados, os traços com maior teor de pedra-sabão, com adição de 25%, apresentaram desempenho superior em relação aos demais. Concluiu-se que a pedra-sabão atua como material de preenchimento e forma gel M-S-H, enquanto a cinza volante promove reações pozolânicas. Esses dois fatores favoreceram o selamento das fissuras, melhorando a durabilidade do concreto como um todo. Todas as misturas, com diferentes percentuais de cinza e esteatita, apresentaram resultados mais satisfatórios nos parâmetros de durabilidade quando comparadas aos corpos de prova de referência.

Uma alternativa para a reparação de artes sagradas do período barroco feitas em pedra-sabão foi desenvolvida por Alves et al. (2020). Os autores desenvolveram e avaliaram um compósito polimérico-cimentício constituído por pó de pedra-sabão, resina epóxi e cimento, destinado à restauração de patrimônios históricos. O material adequado para a restauração deve apresentar propriedades físicas e mecânicas minimamente equivalentes às das rochas, além de textura e coloração semelhantes às da pedra-sabão natural. O compósito demonstrou grande potencial para uso em restaurações, exibindo maior resistência em comparação à rocha natural e características estéticas semelhantes.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do trabalho foi dividido em três etapas que contemplam o preparo e caracterização dos materiais, a produção das pastas e posterior caracterização. As etapas são descritas na Figura 1.

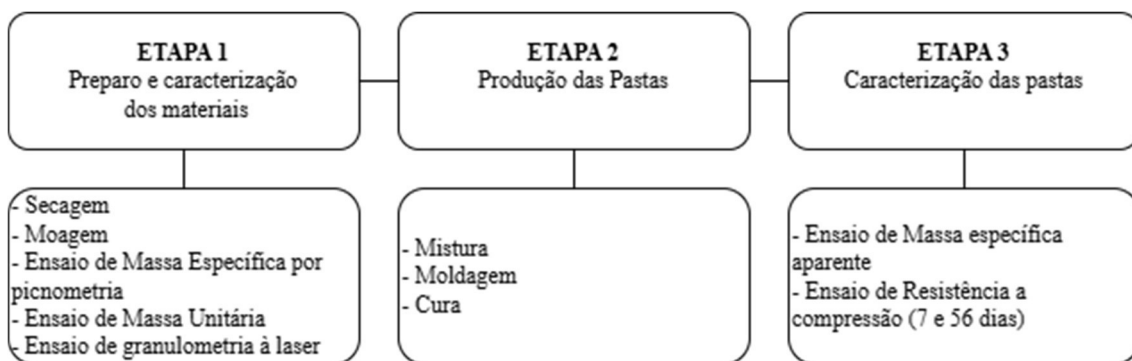


Figura 1 – Fluxograma das etapas do experimento

4.1. Materiais

Na Figura 2 estão apresentadas as matérias-primas utilizadas neste trabalho. O óxido de magnésio reativo comercial (OM; PrimeMag Eco 56 BM 200 AF) foi fornecido pela RHI Magnesita (Contagem-MG, Brasil). A sílica ativa comercial (SA) foi disponibilizada pela Tecnosil (São Paulo-SP, Brasil). Os resíduos utilizados como materiais de preenchimento foram obtidos da mineração de quartzito (RQT; Sulminas Sílicas, Três Corações-MG, Brasil) e pedra-sabão (RPS; Ouro Preto Pedra Sabão, Ouro Preto-MG, Brasil). Um aditivo superplastificante à base de policarboxilato (PCE; MC-Bauchemie MC-PowerFlow 4001) foi utilizado com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade das pastas.

Figura 2 – Materiais utilizados



Fonte: Adaptado de CARVALHO et al., (2025)

A Tabela 1 apresenta a composição química dos resíduos de quartzito e pedra-sabão, caracterizados quimicamente por fluorescência de Raios-X (FRX; PANalytical Epsilon3x) no estudo de Carvalho et al. (2025).

Tabela 1 – Composição química dos materiais

Componente/teor (%)	RQT	RPS	SA	OM
SiO ₂	91,9	44,5	95,8	0,9
MgO	0,2	29,9	0,3	95,9
Al ₂ O ₃	5,4	4,1	0,3	0,4
Fe ₂ O ₃	0,8	5,3	-	0,4
CaO	-	2,7	0,6	0,9
K ₂ O	0,9	-	1,1	-
Outros	0,8	0,8	0,3	0,3
Perda ao Fogo	0,4	12,7	1,6	1,2

Fonte: adaptado de (CARVALHO et al., 2025)

4.2. Preparo dos Materiais

Os dois resíduos seguiram o mesmo protocolo de moagem realizado em um moinho de bolas (Marconi MA500; 200rpm) (Figura 3). O protocolo foi definido por 3 seções de 30 minutos e intervalos de 10 minutos entre cada seção para evitar superaquecimento do equipamento. No total, adotou-se um tempo de moagem de 90 minutos para cada resíduo, com um volume de 1.700 cm³ de material por programa de moagem.



Figura 3 – Moinho de bolas MARCONI
Fonte: Elaborado pela autora

4.3. Caracterização dos materiais

A caracterização física dos materiais se deu pelos ensaios de massa específica por picnometria a vácuo (adaptado de NBR 6508, ABNT, 1984), massa unitária (NBR16972, ABNT, 2021) e granulometria a laser (Bettersize 2000; meio de dispersão: água destilada).

4.4. Produção das pastas de cimento

Foram determinados três traços para cada resíduo incorporado com fíler, com substituições parciais de 10%, 20% e 30% em massa em relação ao cimento, além de um traço de referência, sem a incorporação de fíler, totalizando 7 traços. A Tabela 2 traz a identificação e composição dos traços propostos. As pastas foram produzidas adotando uma relação água/finos (a/f) de 0,55, um teor de superplastificante de 2,5% em relação à

massa de finos e uma proporção de 50% de fonte de SiO₂ e 50% de fonte de MgO em massa.

Tabela 2 – Composição dos traços

Traço/Teor (%)	SA	OM	RQT	RPS
REF	50	50	-	-
RQT10	45	45	10	-
RQT20	40	40	20	-
RQT30	35	35	30	-
RPS10	45	45	-	10
RPS20	40	40	-	20
RPS30	35	35	-	30

Os materiais foram misturados em uma argamassadeira convencional (Pavitest C-3010) seguindo o seguinte protocolo: 1) inicialmente todo o aditivo superplastificante foi diluído na água de amassamento; 2) em seguida, 50% do volume de filer (RQT ou RPS) foi misturado ao óxido de magnésio (OM) e os outros 50% ao silicato de alumínio (SA); 3) na argamassadeira previamente umedecida adicionou-se aproximadamente metade da solução de água e superplastificante juntamente com a mistura de OM e filer, realizando-se mistura por 1 minuto em baixa velocidade; 4) as laterais da argamassadeira foram raspadas por 1 minuto para garantir homogeneidade; 5) nos 8 minutos seguintes, em alta velocidade, adicionou-se alternadamente o restante da solução de água + superplastificante e a mistura de SA e filer; 6) após a completa adição dos materiais, as laterais foram novamente raspadas por 1 minuto e a mistura prosseguiu por mais 1 minuto em alta velocidade; 7) as pastas foram moldadas em cubos de polipropileno (40 × 40 × 40 mm) e adensadas com 30 golpes em mesa de consistência; 8) os corpos de prova permaneceram nos moldes por 24 horas, sendo então desmoldados. Foram mantidos em cura em temperatura ambiente, de 22±4°C e umidade média de 75,3% até a data dos ensaios.

4.5. Caracterização das pastas de cimento

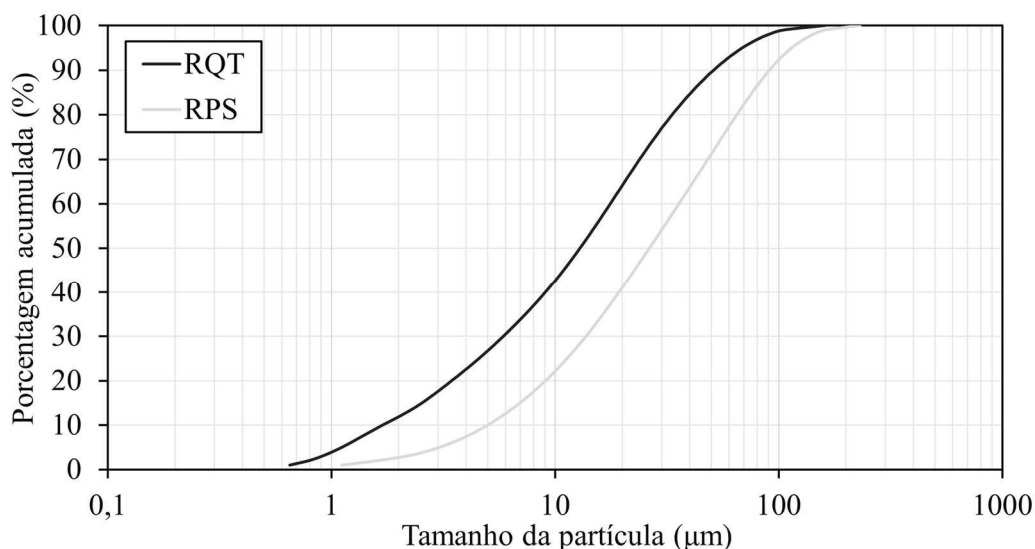
Para a caracterização das pastas de cimento, foram realizados ensaios em 6 corpos de prova de cada traço. Avaliaram-se a massa específica aparente (NBR16972, ABNT, 2021), após 56 dias de cura, e a resistência a compressão axial (NBR7215, ABNT, 2025), após 7 e 56 dias de cura (prensa hidráulica EMIC DL 2000).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Propriedades dos materiais

Ao comparar as curvas granulométricas dos resíduos utilizados na Figura 4, pode-se concluir que possuem comportamentos bem similares. A ampla variação nos tamanhos das partículas presentes nos resíduos favorece o empacotamento da matriz cimentícia através do preenchimento dos espaços vazios (TRAN; SCOTT, 2016). Partículas de diferentes dimensões se acomodam de forma complementar, preenchendo os vazios com maior eficiência (TRAN; SCOTT, 2016). Observa-se que elas estão deslocadas, fazendo com que a curva de RQT possua uma menor granulometria comparada a curva de RPS, que possui partículas mais grossas. A elevada finura dos materiais utilizados como fileres está associada à melhoria da matriz cimentícia, favorecendo a redução da porosidade e da permeabilidade e contribuindo para o aumento da resistência à compressão (KHAN; ABBAS; FARES, 2023)

Figura 4 – Distribuição granulométrica dos resíduos beneficiados



Fonte: Adaptado de CARVALHO et al. (2025)

Através da Tabela 3 pode-se observar os parâmetros de finura e os resultados de massa específica. Comparando os valores de D_{90} dos resíduos. O RQT apresenta menor D_{90} , 51,26 μm , enquanto o valor de RPS (90,91 μm) é significantemente maior. Esse valor de D_{90} pode ser associado à área específica e capacidade de empacotamento do material usado como filer (TRAN; SCOTT, 2016). O RQT apresenta uma maior finura em relação ao RPS, podendo esperar um melhor desempenho no efeito de preenchimento de vazios devido a sua maior finura e maior área específica (TRAN; SCOTT, 2016).

Tabela 3 – Propriedades físicas dos resíduos beneficiados				
Parâmetro	RQT	RPS	SA	OM
D90 (µm)	51,26	90,91	44,90	112,00
D50 (µm)	12,91	26,36	21,04	29,47
D10 (µm)	1,694	4,994	3,87	4,28
Massa específica (g/cm ³)	2,76	2,89	2,30	3,35
Massa unitária (g/cm ³)	0,75	0,68	0,51	0,84

Fonte: Adaptado de CARVALHO et al., (2025)

Associando a massa específica, que quantifica a densidade das partículas soltas, com a massa unitária (Tabela 3) que avalia o volume aparente incluindo os vazios, podemos chegar a conclusões relevantes sobre os materiais. O RPS apresenta maior massa específica (2,89 g/cm³) e menor massa unitária (0,68 g/cm³) em comparação ao RQT (2,76 g/cm³ e 0,75 g/cm³ respectivamente).

O valor mais elevado de massa específica indica maior densidade da partícula enquanto o menor valor de massa unitária, aponta desempenho inferior de empacotamento do material, com maior volume de vazio do RPS, em comparação com o RQT. Essa diferença pode ser associada à composição dos resíduos. O RPS possui maior teor de Fe₂O₃ (5,3%) em sua composição, enquanto o RQT é composto predominantemente por SiO₂ (91,9%). Os maiores valores de massa específica refletem maior densidade da partícula como um todo e o menor valor de massa unitária, evidencia desempenho inferior de empacotamento do material, com maior volume de vazio do RPS em comparação ao RQT. (CARVALHO *et al.*, 2021)

5.2. Propriedades das Pastas

Os resultados do ensaio de resistência à compressão estão apresentados na Figura 5. O traço que apresentou melhor desempenho foi o RQTZ 10, alcançando 17,6±1,02MPa aos 56 dias, superando a pasta de referência (REF), que obteve 14,1±1,78MPa MPa na mesma idade. Os traços RQT20 e RPS10 apresentaram resultados estatisticamente equivalentes ao REF aos 56 dias (10,8±2,18MPa e 12,0±1,35MPa, respectivamente). Os demais traços obtiveram resistências inferiores à REF.

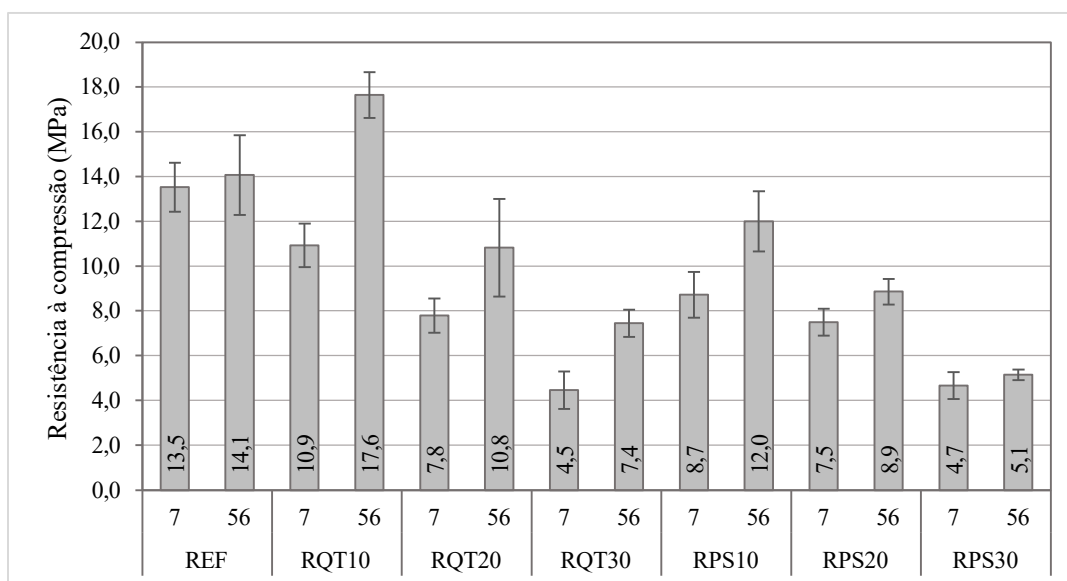


Figura 5 – Gráfico de Resistência à compressão

Entre os seis traços com adição de fileres, os resultados mais satisfatórios foram obtidos nas formulações com menores substituições parciais (RQT10, RQT20 e RPS10). Esse comportamento pode ser atribuído à maior formação de gel M-S-H, em comparação aos traços com substituição superior a 20%, somada ao efeito físico de preenchimento proporcionado pelos resíduos (TRAN; SCOTT, 2016). À medida que se aumenta a quantidade de filer, há a redução da disponibilidade dos precursores para a formação de M-S-H, possível fator que justifica os menores valores de resistência à compressão nos traços com maiores substituições.

O baixo desempenho da pasta de referência, pode ser relacionado à relação a/f. Shah, Dhandapani e Scott (2021) observaram em seu estudo o aumento da porosidade e diâmetro dos poros com o aumento da relação a/c e da proporção de SA no ligante. De forma semelhante, Jin e Al-Tabbaa (2014) associaram a queda de resistência ao alto valor da relação a/c, interpretação que se estende às matrizes com maiores teores de filer. Tran, Dhakal e Scott (2020) destacaram que a ausência de filer resulta em uma zona de transição interfacial fraca, limitante para o desenvolvimento de resistência do concreto mesmo com a formação contínua de gel MSH.

As formulações com 30% de substituição (RQT30 e RPS30) apresentaram os menores valores de resistência à compressão. Esse desempenho pode ser explicado por dois fatores principais: a redução da disponibilidade de ligantes para a formação adequada do gel M-S-H e o aumento da relação a/c, que resulta em maior porosidade da matriz. Tran, Dhakal

e Scott (2020) também observaram comportamento semelhante, relacionando-o à diminuição da resistência mecânica e do módulo de elasticidade.

De modo geral, as substituições parciais superiores a 20% resultaram em desempenho inferior, corroborando com estudos que apontam a redução do volume de gel de M-S-H com acima desse limite (TRAN; SCOTT, 2016). Também podemos relacionar esse resultado à fixação da relação a/f adotada neste trabalho, em vez da fixação da relação a/c. Embora a redução da água proporcional ao aumento do filler possa melhorar a reologia da matriz, a adoção da relação água/finos (a/f) implicou no aumento da quantidade de água com o incremento de filler, contribuindo para limitar o desenvolvimento das resistências. Assim, observa-se que a relação a/c cresce com a adição de resíduos, impactando diretamente o desempenho mecânico.

Destaca-se ainda o baixo incremento de resistência da pasta REF entre 7 e 56 dias ($13,5 \pm 1,10$ MPa para $14,1 \pm 1,78$ MPa). Esse desempenho está associado ao efeito nucleador promovido pelos filleres, que atuaram como superfícies adicionais de hidratação, favorecendo a formação contínua de produtos cimentícios ao longo do tempo. Dessa forma, a presença dos filleres contribuiu para a intensificação das reações e para o aumento progressivo da resistência mecânica das pastas com material de preenchimento (CARVALHO *et al.*, 2021).

Também cabe destacar que, nas primeiras horas após a moldagem, verificou-se exsudação, principalmente nos corpos de prova com RQT. Esse fenômeno pode estar associado à menor absorção de água pelas partículas do RQT que apresentam superfície mais lisa, resultando em maior quantidade de água livre na mistura (TRAN; SCOTT, 2016). Durante a moldagem, a elevada energia de moldagem manteve a mistura homogênea e estável inicialmente, mas a sua redução ao longo do tempo, favoreceu a saída de água, evidenciando o fenômeno (CUPEHINSKI *et al.*, 2022). A literatura aponta que a demanda de água pode ser reduzida na presença de aditivos minerais finamente moídos e com ampla distribuição granulométrica (DAUKŠYS; SKRIPKIŪNAS; GRINYS, 2010).

A Tabela 4 mostra os valores de massa específica aparente. Os traços com os maiores valores presentes na tabela (1,35; 1,32; 1,26 e 1,20 g/cm³), são também os que possuem os maiores valores de resistência mecânica (RQT10, RQT20, RPS10 e REF). Esse resultado pode ser associado à maior densificação da matriz e à redução de vazios, fatores

que melhoram a microestrutura e empacotamento da matriz, contribuindo para o melhor desempenho mecânico (TRAN; DHAKAL; SCOTT, 2020).

Tabela 4 – Massa Específica Aparente	
Traço	Massa Específica Aparente (g/cm ³)
REF	1,20
RQT10	1,35
RQT20	1,32
RQT30	1,24
RPS10	1,26
RPS20	1,16
RPS30	1,08

Chama-se atenção para a matriz RQT30, que obteve um baixo desempenho mecânico, mas massa específica aparente superior à REF e ao RPS10, com resistências mecânicas maiores. Esse resultado sugere que, embora a densificação da matriz seja relevante, o desempenho mecânico depende também de outros fatores, como a disponibilidade de ligantes e a relação a/c (TRAN; SCOTT, 2016).Clique ou toque aqui para inserir o texto.

6. CONCLUSÃO

A utilização de materiais alternativos em substituição ao tradicional cimento Portland representa uma estratégia promissora para a redução das emissões de CO₂ relacionados à construção civil, sem comprometer suas principais propriedades mecânicas. Nesse contexto, o estudo de cimentos magnesianos com a incorporação de resíduos como fíleres surge como uma alternativa capaz de atender às demandas de inovação e sustentabilidade.

A introdução dos resíduos de quartzito e pedra-sabão como materiais de preenchimento representa um estudo inicial, mas que se mostrou com alto potencial. Ressalta-se, entretanto, que a fixação da relação a/f não se mostrou a mais adequada. O aumento da relação a/c adotada no trabalho pode ter contribuído para a redução dos valores de resistência observados, principalmente nas matrizes com substituições superiores a 20%. Ainda assim, os resultados indicam potencial no desempenho favorável dos resíduos quando utilizados como material de preenchimento.

A análise das propriedades físicas e mecânicas evidencia o bom desempenho das matrizes RQT10, RQT20 e RPS10, com substituições parciais de 10% e 20% em massa. Entre elas, destaca-se o traço RQT10, que superou os valores da pasta de referência em termos

de resistência mecânica, confirmando o potencial do resíduo de quartzito como material de preenchimento. O baixo desempenho das matrizes com substituição superior a 20% pode ser associado à reduzida formação de gel M-S-H, devido a menor disponibilidade dos precursores para formação do ligante.

Por fim, pode se concluir, que os resíduos de quartzito e pedra-sabão se apresentam como alternativas promissoras para aplicação em matrizes de cimento M-S-H, mas necessitam de estudo mais aprofundado em relação ao seu comportamento dentro da matriz. Além de possíveis alternativas que contribuem para a sustentabilidade da indústria do cimento, constituem temas relevantes para estudos futuros, voltados ao aprofundamento de seu desempenho e otimização das condições de uso.

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, S. De; SOUSA, W. T. De. **Lavra, artesanato e mercado do esteatito de Santa Rita de Ouro Preto, Minas Gerais**. 2006. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, MG, 2006.

ALVES, R. A. A.; STRECKER, K.; PEREIRA, R. B. D.; PANZERA, T. H. Mixture design applied to the development of composites for steatite historical monuments restoration. **Journal of Cultural Heritage**, v. 45, p. 152–159, 1 set. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND; SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Roadmap NET ZERO: visão da indústria brasileira do cimento para alcançar a neutralidade de emissões ao longo do seu ciclo de vida até 2050** São Paulo, SP. 2025. Disponível em: <<https://www.snic.org.br/assets/pdf/neutralidade-carbono/apresentacao-roadmap-net-zero-V10.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND; SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Roadmap tecnológico do cimento – Brasil** São Paulo, Brasil. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grains passing through the 4.8 mm sieve mesh - Determination of the bulk specific gravity**. Rio de Janeiro, Brasil. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15012: Rocks for cladding — Terminology**. Rio de Janeiro, Brasil. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR16697: Portland Cement - Requirements** Rio de Janeiro, Brasil. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR16972: Aggregates - determination of the unit weight and air-void contents** Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7215: Portland Cement - Determination Of Compressive Strength Of Cylindrical Test Specimens** Rio de Janeiro, Brasil. mar. 2025.

BARCELO, L.; KLINE, J.; WALENTA, G.; GARTNER, E. Cement and carbon emissions. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 47, n. 6, p. 1055–1065, 2014.

BARROS, S. V. A.; MARCIANO, J. E. A.; FERREIRA, H. C.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. D. A. **Addition of quartzite residues on mortars: Analysis of the alkali aggregate reaction and the mechanical behavior** *Construction and Building Materials* Elsevier Ltd, 15 ago. 2016.

BATTAGIN, A. F. Uma breve história do cimento Portland. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, 2009.

BERNARD, E.; NGUYEN, H.; KAWASHIMA, S.; LOTHENBACH, B.; MANZANO, H.; PROVIS, J.; SCOTT, A.; UNLUER, C.; WINNEFELD, F.; KINNUNEN, P. MgO-based cements – Current status and opportunities. **RILEM Technical Letters**, v. 8, p. 65–78, 7 abr. 2023.

BEZERRA, O. M. de P. A. Condições de vida, produção e saúde em uma comunidade de mineiros e artesãos em pedra-sabão em Ouro Preto, MG. 2002.

CAPELO, A. R. dos S. M. **Cimento à base de óxido de magnésio e cinza da casca do arroz**. 2021. Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2021. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74133/tde-15102021-122328/fr.php>>. Acesso em: 21 maio. 2024.

CARVALHO, J. M. F. de; DEFÁVERI, K.; MENDES, J. C.; SCHMIDT, W.; KÜHNE, H. C.; PEIXOTO, R. A. F. Influence of particle size-designed recycled mineral admixtures on the properties of cement-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 272, 22 fev. 2021.

CARVALHO, V. R.; ROSAS, M. H.; TAMBASCO, I. de A.; BARBOSA, M. A. L.; BEZERRA, A. C. da S.; PEIXOTO, R. A. F. Preparo e Otimização De Finos Residuais Para a Produção de Cimentos de Silicato de Magnésio Hidratado (M-S-H). **Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção**, v. 9, p. 1–8, ago. 2025.

COSTA, L. C. B.; NOGUEIRA, M. A.; ANDRADE, H. D.; CARVALHO, J. M. F. de; ELÓI, F. P. da F.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F. Mechanical and durability performance of concretes produced with steel slag aggregate and mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 318, 7 fev. 2022.

CUI, Y.; WANG, Y.; HUANG, J.; ZHU, J.; JIN, Z.; ZHANG, W.; LIU, J.; ZHANG, Z.; LIU, Z. Effects of porous magnesian calcite on shrinkage and compressive strength of Portland cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 531, 11 jul. 2026.

CUPEHINSKI, K. A.; SAVARIS, G.; BALESTRA, C. E. T.; HOFFMANN, C. A.; CÂMARA, E. Detecção da exsudação do concreto autoadensável através da análise de ondas ultrassônicas. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 43, n. 2, p. 127–134, 19 dez. 2022.

DAUKŠYS, M.; SKRIPKIŪNAS, G.; GRINYS, A. Finely Ground Quartz Sand and Plasticizing Admixtures Influence on Rheological Properties of Portland Cement Paste. **MEDŽIAGOTYRA**, v. 16, n. 4, p. 365–372, dez. 2010.

DE LIMA, G. L. S.; BARROS, S. V. A.; DANTAS, G. C. B.; SILVA, W. G. Efeito Filler em Argamassas de Revestimento com Resíduos de Quartzito. **Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade FUMEC**, v. 13, p. 63–74, 2021.

DE MEDEIROS, P. S. S.; LIRA, H. D. L.; RODRIGUEZ, M. A.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. D. A.; SANTANA, L. N. D. L. Incorporation of quartzite waste in mixtures used to prepare sanitary ware. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 2, p. 2148–2156, 1 abr. 2019.

DOS SANTOS, D. H. Substituição total do agregado natural por quartzito friável para produção de argamassas de assentamento e revestimento. mar. 2015. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6522>>. Acesso em: 31 jan. 2026.

FRANCO DE CARVALHO, J. M.; MELO, T. V. de; FONTES, W. C.; BATISTA, J. O. dos S.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F. More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 397–409, 10 maio 2019.

GARTNER, E.; HIRAO, H. A review of alternative approaches to the reduction of CO2 emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 126–142, 1 dez. 2015.

GNANARAJ, S. C.; CHOKKALINGAM, R. B.; THANKAM, G. L.; POTHINATHAN, S. K. M. Durability properties of self-compacting concrete developed with fly ash and ultra fine natural steatite powder. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 13, p. 431–439, 1 jul. 2021.

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL. **Anuário GBC Brasil 2025**. São Paulo: GBC Brasil, 2025. 291 p.

JIN, F.; AL-TABBAA, A. Strength and hydration products of reactive MgO-silica pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 52, p. 27–33, 2014.

KHAN, M. I.; ABBAS, Y. M.; FARES, G. Enhancing Cementitious Concrete Durability and Mechanical Properties through Silica Fume and Micro-Quartz. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 22, 1 nov. 2023.

LI, H.; WANG, Z.; SUN, R.; HUANG, F.; YI, Z.; YUAN, Z.; WEN, J.; LU, L.; YANG, Z. Effect of different lithological stone powders on properties of cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, 20 mar. 2021.

LIMA, R. M. F.; SILVA, A. F. S. da; MORAIS, R. M. M. de; LUZ, J. A. M. da. Caracterização tecnológica de resíduos de pedreiras de quartzito da região de Ouro Preto/MG. **REM – Revista Escola de Minas**, v. 60, n. 4, p. 663–668, 2007.

LUUKKONEN, T.; ABDOLLAHNEJAD, Z.; YLINIEMI, J.; MASTALI, M.; KINNUNEN, P.; ILLIKAINEN, M. Alkali-activated soapstone waste - Mechanical properties, durability, and economic prospects. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 22, 1 dez. 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto- Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto., 1994. 1–573 p.

MENDONÇA, W. M. **Desempenho do resíduo de quartzito como agregado em camadas de base e revestimento de pavimentos**. 2023. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

MENG, D.; UNLUER, C.; YANG, E. H.; QIAN, S. Recent advances in magnesium-based materials: CO₂ sequestration and utilization, mechanical properties and environmental impact. **Cement and Concrete Composites**, v. 138, 1 abr. 2023.

MOREIRA, M.; RODRIGUES, P. **Produção mais limpa aplicada ao processo produtivo de artefatos em pedra sabão, em oficinas do distrito de Santa Rita de Ouro Preto, MG**. 2017. UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2016. 1–912 p.

PANTUZA, M. F. M. **Impacto da inovação no trabalho artesanal em pedra-sabão: um estudo na feirinha de Ouro Preto**. 2025. UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2025. Disponível em: <http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?>.

RODRIGUES, M. L. M.; LIMA, R. M. F. Cleaner production of soapstone in the Ouro Preto region of Brazil: A case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 32, p. 149–156, set. 2012.

RUSSO, M. L. C. **Reciclagem de Resíduo Gerado na Extração de Quartzito**. 2011. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Escola de Engenharia, Belo Horizonte, MG, 2011.

SANTOS, R. C. P.; SOUSA, W. T.; LIMA, H. M. Estudo da pedra-sabão na região de Ouro Preto-MG. **REM – Revista Escola de Minas**, v. 59, p. 181–186, ago. 2009.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, 1 dez. 2018.

SHAH, V.; DHANDAPANI, Y.; SCOTT, A. Pore structure characteristics of MgO–SiO₂ binder. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 104, n. 11, p. 6002–6014, 1 nov. 2021.

SILVA, M. C. A.; LEÃO, V. A.; REIS, E. L. Incorporation of quartzite fines in the production of red ceramics. **Journal of Cleaner Production**, v. 288, 15 mar. 2021.

SMIRNOVA, O. M. Low-clinker cements with low water demand. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 7, 24 abr. 2020.

SONAT, C.; UNLUER, C. Development of magnesium-silicate-hydrate (M-S-H) cement with rice husk ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 787–803, 20 fev. 2019.

SOUZA, A. J.; PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Processing of floor tiles bearing ornamental rock-cutting waste. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 14, p. 1898–1904, 1 nov. 2010.

SREENIVASAN, H.; BERNARD, E.; SANTOS, H. S.; NGUYEN, H.; MOUKANNAA, S.; ADEDIRAN, A.; PROVIS, J. L.; KINNUNEN, P. **A critical review of magnesium silicate hydrate (M-S-H) phases for binder applications** *Cement and Concrete Research* Elsevier Ltd, 1 abr. 2024.

TORRES, H. Caracterização do refugo do esteatito das indústrias e oficinas artesanais da região de Congonhas, CL, Mariana e OP. 2007.

TRAN, H.; DHAKAL, R.; SCOTT, A. Mechanical and durability properties of magnesium silicate hydrate binder concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 72, n. 13, p. 693–702, 1 jul. 2020.

TRAN, H. M.; SCOTT, A. Strength and workability of magnesium silicate hydrate binder systems. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 526–535, 30 jan. 2016.

WALLING, S. A.; PROVIS, J. L. **Magnesia-Based Cements: A Journey of 150 Years, and Cements for the Future?** *Chemical Reviews* American Chemical Society, 27 abr. 2016.

WYRZYKOWSKI, M.; BERNARD, E.; TOROPOVS, N.; LURA, P. Pore structure and sorption of MgO-hydromagnesite cement pastes – on the mechanisms of moisture-induced weakening. **Cement and Concrete Research**, v. 206, 1 ago. 2026.

ZHANG, T.; VANDEPERRE, L. J.; CHEESEMAN, C. R. Formation of magnesium silicate hydrate (M-S-H) cement pastes using sodium hexametaphosphate. **Cement and Concrete Research**, v. 65, p. 8–14, 2014.