ESTUDO DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE PEDRA SÃO TOMÉ EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ALTA RESISTÊNCIA

Study of São Tomé Stone polishing waste in high-strength cementitious composites

Camila Maria Pereira Scalabrini
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | camila.csarquiteta@gmail.com

Catarina Emmerich Santana
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | emmerichcatarina04@gmail.com

Maria Teresa Paulino Aguilar
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | teresa@ufmg.br

White José dos Santos
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | whitejsantos@gmail.com

Resumo

Minas Gerais é um dos maiores produtores do Brasil de pedra São Tomé (PTS), um tipo de quartzito. O beneficiamento de rochas ornamentais (RO) gera de 20% a 30% de resíduo e seu descarte causa diversos impactos ambientais, tais como saturação dos solos, problemas de saúde à população e danos à flora. Pesquisas existentes demonstram o potencial uso dos resíduos de RO na produção de materiais para construção civil, contudo, o resíduo de PTS foi pouco explorado. Este estudo avalia a utilização do resíduo de PTS como adição mineral tipo filer em argamassas estruturais com a definição da dosagem pelo método do empacotamento de partículas. As argamassas propostas com resíduo PTS apresentaram melhorias em todas as propriedades estudadas: resistências mecânicas de compressão e tração na flexão, absorção de água, capilaridade e porosidade, demonstrando a eficiência da aplicação deste resíduo em compósitos cimentícios com melhorias principalmente relacionadas aos indicadores de durabilidade.

Palavras-chave: Compósitos cimentícios; Argamassa de alta resistência, Pedra São Tomé; Adição mineral; Resíduo de rocha ornamental.

ABSTRACT

Minas Gerais is one of the largest producers of São Tomé Stone (PTS) in Brazil, a type of quartzite. The processing of ornamental rocks (OR) generates 20% to 30% of waste and its disposal causes several environmental impacts, such as soil saturation, health problems for the population and damage to flora. Existing research demonstrates the potential use of OR waste in the production of civil construction materials, however, PTS waste has been little explored. This study evaluates the use of PTS waste as a mineral addition filler type in high-strength mortars, attempting to determine the dosage via the particle packing method. Mortars with the addition of PTS waste showed improvements in all properties studied: mechanical resistance to compression and flexural traction, water absorption, capillarity and porosity, demonstrating the efficiency of adding PTS waste to cementitious composites, its improvements mainly related to durability.

Keywords: Cementitious composites; High-strength mortar; São Tomé stone; Mineral addition; Ornamental rock residue.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é uma das grandes potências mundiais em extração, beneficiamento e exportação de rochas ornamentais do mundo (ABIROCHAS, 2023). Dentre elas, destaca-se a Pedra São Tomé (PTS), um quartzito característico de Minas Gerais, frequentemente utilizada como revestimento em paredes e pisos. De acordo com ABIROCHAS (2024), Minas Gerais é um dos maiores produtores de PTS do Brasil.

No beneficiamento das rochas ornamentais podem ser gerados de 20% a 30% de resíduos (SINGH *et al.,* 2017) e seu descarte promove impactos ambientais, como poluições aérea e do solo, problemas de saúde à população e fauna, comprometimento da flora (SADEK *et al.,* 2016; ALYAMAC *et al.,* 2009; LI *et al.,* 2019;) e saturação do solo alterando sua fertilidade e impedindo recomposição de lençóis freáticos (GUPTA *et al.,* 2018). Já existem pesquisas comprovando o potencial uso dos resíduos de rochas ornamentais (RRO) na produção de materiais para construção civil, como concretos e argamassas (DOBISZEWSKA *et al.,* 2022), bloquetes (MASHALY *et al.,* 2016), concretos auto adensáveis (SADEK *et al.,* 2016; PEREIRA *et al.,* 2022; TOPÇU *et al.,* 2009; DANISH *et al.,* 2021) e concretos de alto desempenho (BOADELLA *et al.,* 2019).

Os estudos envolvendo Resíduos de Rochas Ornamentais (RRO) avaliam resíduos, sobretudo, provenientes de Mármores e Granitos (DANISH *et al.,* 2021, ELYAMANY *et al.,* 2014; SADEK *et al.,* 2016), mas o resíduo de Pedra São Tomé (RPST) em compósitos cimentícios foi pouco explorado. De acordo com a literatura científica (SADEK *et al.,* 2016; MEERA *et al.,* 2020; DANISH *et al.,* 2021; DOBISZEWSKA *et al.,* 2022; ELYAMANY *et al.,* 2014; KARIMIPOUR *et al.,* 2021), o tipo e características do RRO utilizado geram efeitos distintos no desempenho dos compósitos cimentícios, mesmo quando da mesma aplicação. Assim, esta pesquisa avaliou a aplicação do Resíduos de Pedra São Tomé (RPST) como adição mineral em compósitos cimentícios de alto desempenho.

2 METODOLOGIA

Esta pesquisa experimental avaliou a aplicação de RPST como filer em argamassas de alta resistência. Os materiais empregados compreendem o cimento CP-V ARI, da marca Nacional (em função do baixo teor de adições), areia normal do IPT composta por quatro frações granulométricas (nº 16, 30, 50 e 100), água potável da COPASA em Belo Horizonte, o RPST (lama do processo de beneficiamento da PTS, coletado da caixa de sedimentação de uma marmoraria localizada em Alpinópolis-MG) e o aditivo MC-Power Flow 4001 da MC-Bauchemie.

O RPST recolhido em forma de lama foi seco em estufa à temperatura de 100±5°C, destorroado manualmente, homogeneizado, passado na peneira de 150 µm (utilizado conteúdo passante) e armazenado em recipiente plástico hermeticamente fechado para posterior utilização.

Os materiais foram caracterizados quanto aos aspectos físicos, químicos e morfológicos das partículas. Foi realizada a mensuração das partículas do cimento e do RPST por difração de laser no equipamento CILAS 1090 Líquido, com faixa de 0,04 µm – 500,00 µm / 100 Classes. A composição química foi determinada pela análise fluorescência de raios-X (FRX), com fusão de tetraborato de lítio e determinação de perda ao fogo por gravimetria 1.000ºC (LOI). Foi realizada a Picnometria no Picnômetro Multipycnometer MVP-6DC Quantachrome Instruments. Pelo método Brunauer, Emmett e Taller (BET) determinou-se a porosidade e área superficial específica (ASS) no equipamento Anton Paar Nova 600. Para a morfologia foi realizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV) em um equipamento Hitachi TM3000, com detector de elétrons retroespalhados com aceleração de 15 kV.

As dosagens das argamassas foram definidas pelo método de empacotamento máximo das partículas com utilização do *software Elkem Materiais Mixture Analyzer* (EMMA), considerando o modelo de Andreasen e Andersen Modificado e o módulo de distribuição q = 0,30. Posteriormente, utilizou-se o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), conforme Equação 01, para gerar uma curva de empacotamento máximo da mistura seca e definir a dosagem de empacotamento máximo.

$$RSS = \sum^{n}_{i=1} [P(D_i) - P_{mod}(D_i)]^2 \quad (1)$$

em que RSS é a soma residual dos quadrados, $P(D_i)$ é a fração de sólidos menores que o diâmetro D_i da mistura e Pmod(Di) é a fração de sólidos menores que o diâmetro Di, do modelo de Andreassen, obtida pela eq.

A partir da relação 1:3 (cimento: areia normal), variou-se o RPST como adição mineral tipo filer no método de empacotamento adotado e registrou-se o menor RSS para o teor de 40% (0,40) da massa de cimento. Assumiu-se uma relação água/cimento de 0,40. E, através da mesa de espalhamento (Flow table) considerando índice de consistência de 285mm±15, encontrou-se o teor de aditivo superplastificante para a amostra controle de 0,012 (1,2%) e para o resíduo 0,013 (1,3%). Na Tabela 1 é apresentado o consumo por metro cúbico de argamassa dos traços resultantes.

Tabela 1: Consumo por metro cubico de argamassa

Material	Cimento	Resíduo RPTS	Areia IPT 16	Areia IPT 30	Areia IPT 50	Areia IPT 100	Água	Aditivo
Controle	530,932	0,00	398,199	398,199	398,199	398,199	212,373	6,371
RPTS	493,013	197,205	369,760	369,760	369,760	369,760	369,760	6,409

No estado endurecido foram avaliados parâmetros relacionados à indicadores de durabilidade e resistência mecânica. Para capilaridade, absorção de água, porosidade e massa específica foram ensaiadas 5 amostras cilíndricas de θ5x10cm para cada traço. Os espécimes ficaram imersos em água por 28 dias e os ensaios seguiram a NBR 9779 (ABNT, 2012) e NBR 9778 (ABNT, 2009). Para os ensaios de resistência mecânica foram elaborados 5 espécimes cúbicos 4x4x4cm para compressão e 3 com 4x4x16cm para tração na flexão para cada uma das idades avaliadas, 7 e 28 dias. Os ensaios de resistência mecânica foram realizados em uma máquina universal de ensaios EMIC Shimadzu Autograph AGS-X 300kN, conforme norma Europeia EN 12390-3 (CEN, 2009) e NBR 12142 (ABNT, 2010) com velocidade de carregamento para compressão de 0,45± 0,15 MPa/s e para tração na flexão de 1,00± 0,15 MPa/s.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Na Tabela 2 são apresentados os resultados do FRX do resíduo e do cimento. O RPST é composto por 95% de silício. De acordo com a literatura, os RRO com composição de silício são, majoritariamente, cristalinos e não reativos, visto sua estabilidade na natureza (BACARJI, *et al*., 2013; ELYAMANY *et al.,* 2014; GUPTA, *et al*., 2018). Tem-se ainda que, quando utilizados como adição mineral, o RRO pode atuar como efeito filer (DANISH *et al.,* 2021, ELYAMANY *et al.,* 2014; MARTINS, *et al.,* 2022).

Tabela 2: Composição Química dos materiais (%)

Material	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	C	S	MgO	K_2O	Demais Compostos	LOI
Cimento	20,6	5,49	2,74	60,1	1,2	1,33	0,85	0,64	0,72	4,6
RPTS	95	1,7	1,11	0,81	0,24	0,01	0,42	0,44	0,23	1,17

Na Tabela 3 é apresentada a granulometria, ASS e Porosidade do cimento e RPST.

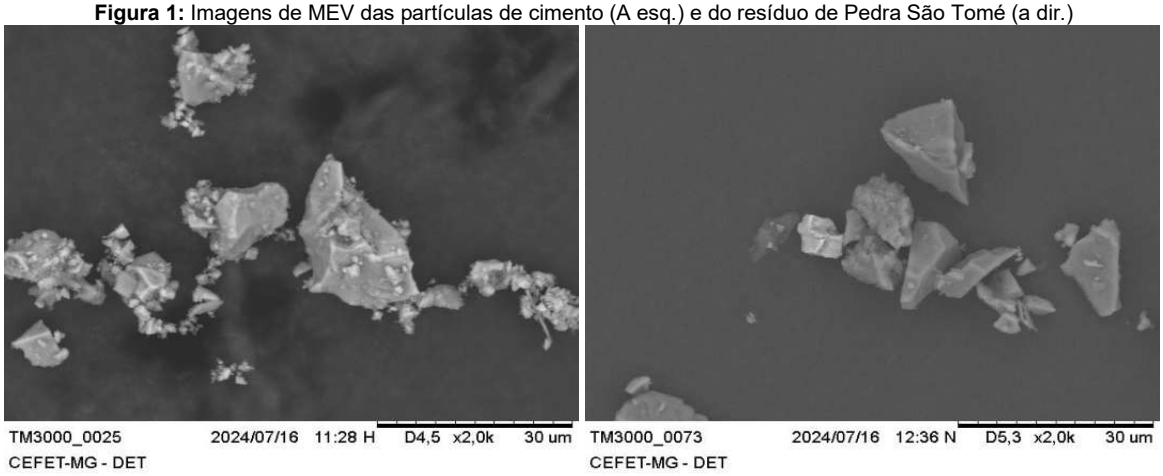
Tabela 3: Diâmetros D_{10}, D_{50} e D_{90}, Área superficial específica e Porosidade do cimento e do resíduo de pedra São Tomé (RPTS)

Material	D_{10} (µm)	D_{50} (µm)	D_{90} (µm)	$D_{médio}$ (µm)	Densidade (g/cm³)	Área superficial (m²/g)	Volume do poro (cm³/g)
Cimento	1,26	6,91	18,52	8,65	3,055	1,2058	0,0049
RPTS	6,54	29,21	71,11	34,80	2,779	0,6978	0,0026

Verifica-se que mais de 90% das partículas de resíduo coletado são menores que 75µm, indicando seu uso sem necessidade de cominuição, isso propicia um ganho energético na aplicação. No estudo de Almada *et al.* (2020), os resíduos de rochas ornamentais utilizadas por serem misturadas são de maior diâmetro (70% das partículas do apresentaram finura menor que 75µm) e já trouxeram efeitos benéficos. Logo, a utilização do RPST não misturado apresenta módulo de finura mais favorável do ponto de vista do empacotamento de partículas, com um maior potencial de densificação da matriz, preenchimento de poros e melhores resultados de resistências mecânicas e indicadores de durabilidade.

Percebe-se que densidade, ASS e porosidade do RPST são maiores nas partículas de cimento que nas do resíduo. Isto é corroborado pela Figura 1, na qual se observa que o RPST apresenta uma superfície menos porosa e maiores dimensões. As partículas de cimento são menores com superfícies mais irregulares. Isso corrobora o fato da partícula de RPST apresentar menor ASS, indicada na Tabela 3, e menor porosidade.

Figura 1: Imagens de MEV das partículas de cimento (A esq.) e do resíduo de Pedra São Tomé (a dir.)

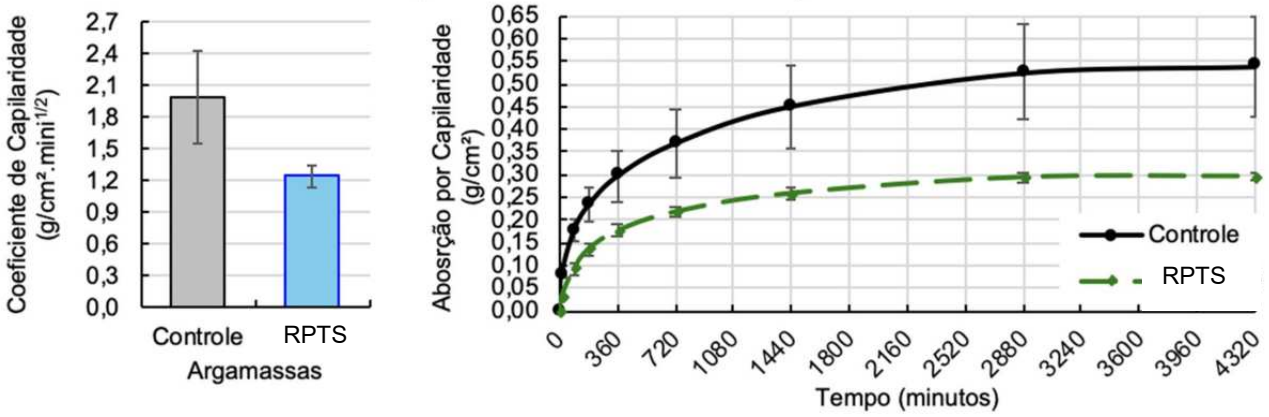


Apesar da ASS do cimento ser menor, ainda assim, o RPTS apresenta uma alta ASS que possibilita melhorias na hidratação do cimento através da adsorção da água na superfície e aumento da área de contato. A porosidade menor é fator de grande relevância para compósitos com maior densidade. O efeito filer pode gerar preenchimento dos espaços vazios do compósito, propiciam um selamento com a interrupção da interconexão dos poros e densificação da matriz. Esta característica é favorável para compósitos de maior durabilidade com menores taxas de absorção de água e capilaridade, por consequência, menos suscetíveis a ataques de agentes danosos.

3.2 CAPILARIDADE, ABSORÇÃO DE ÁGUA, MASSA ESPECIFICA E POROSIDADE

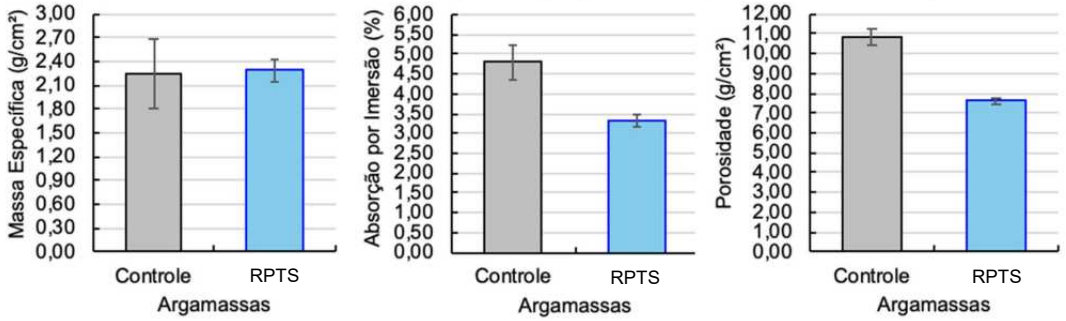
Na Figura 2 são apresentados os resultados de coeficiente de capilaridade e absorção por capilaridade ao longo do tempo. Observa-se que a amostra com adição de RPST apresenta desempenho significativamente melhor que a argamassa controle, aproximadamente uma redução de 50% na capilaridade e com desvio padrão expressivamente menor.

Figura 2: Resultados do ensaio de capilaridade



Na Figura 3 são apresentados os resultados da absorção de água por imersão, porosidade e massa específica.

Figura 3: Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão, porosidade e massa específica

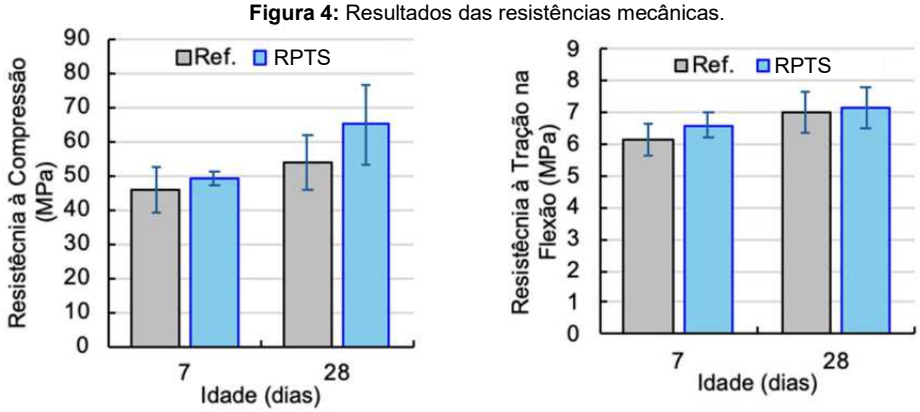


Os resultados corroboram com os de capilaridade, indicando que a amostra com RPST apresentou melhorias significativas quanto à absorção de água e porosidade, com uma redução em torno de 30%. Estes resultados podem ser explicados pelo empacotamento da matriz cimentícia devido à atuação do RPST como fíler. Aliado à metodologia de empacotamento adotada, gerou-se uma densificação da matriz, corroborando o resultado de massa específica obtido. Essa densificação da matriz promove melhorias de desempenho, pois ocorre o preenchimento de poros. De acordo com PEREIRA *et al.* (2022), a adição de RRO reduz a absorção de água e decresce a capilaridade, pois o efeito filer gera, além do preenchimento da matriz, uma desconexão dos poros.

3.3 RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO E À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A Figura 4 apresenta os resultados de resistência mecânica com 7 e 28 dias de cura. As argamassas com RPST obtiveram maiores ganhos de resistência à compressão de 7,10% em 7 dias e de 20,88 % em 28 dias, demonstrando que o efeito de nucleação também ajudou nesta propriedade. Já na resistência a tração na flexão se viu um comportamento distinto, tem um ganho de 7,71% em 7 dias, mas só de 1,89% em 28 dias. Acredita-se que a superfície mais lisa das partículas de RPST pode ter dificultado a aderência do cimento.

Figura 4: Resultados das resistências mecânicas.



A aplicação do resíduo como adição promove melhor empacotamento das partículas, contribuindo positivamente para a maioria das propriedades (ALMADA *et al.*, 2022). A partir da dosagem, a argamassa referência apresenta consumo de cimento e areia 8,25% maior que a argamassa com RPST, ou seja, além de melhorias técnicas, a adição do resíduo pode auxiliar na busca por materiais ecoeficientes (ALMADA *et al.*, 2022).

4 CONCLUSÃO

Identifica-se uma contribuição na mitigação dos problemas ambientais causados pelo descarte do RPST, potencializado pelos resultados técnicos obtidos: a utilização de RPST como adição mineral na argamassa de alto desempenho promoveu melhorias quanto a propriedades mecânica (20%) e indicadores de durabilidade (30%). Além disso, reduz a utilização de cimento e areia, mitigando os problemas ambientais provenientes dos mesmos.

O método de empacotamento adotado possibilitou melhor aproveitamento do RPST na mistura, maximizando a hidratação do cimento através dos pontos de nucleação e reduzindo os poros da matriz. A utilização do RPST como adição foi fator crucial para otimização do efeito filer (densificação da matriz com melhor empacotamento e pontos de nucleação).

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os Laboratórios de “Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica”, de “Concreto e Argamassa” e “Laboratório de Metais” da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais e às instalações do Laboratório de Materiais Inovadores Sustentáveis (LAB-MIS) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) que contribuiram para a obtenção dos resultados apresentados. Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - processos 304596/2022-1 e 409493/2023-6), à Coordenação de Aperfeiçoamento de

Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG - processos APQ-00584-21 e APQ-00062-22) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

ALMADA, B. S. et al. Influence of the heterogeneity of waste from wet processing of ornamental stones on the performance of Portland cement composites. **Construction And Building Materials**. v. 262, Jul, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120036.

ALMADA, B. S.; SANTOS, W. J. Dos; SOUZA, S. R. Marble and granite waste as mineral addition in mortars with different water-cement ratios. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 4, p. 7-22, out./dez. 2022. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000400624.

ALYAMAÇ, K. E.; INCE R. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. **Construction And Building Materials**. v. 23, p. 1201-1210, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDUSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. ABIROCHAS. Disponível em: www.abirochas.com.br, acessado em dezembro 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142:** Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de provas prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

BACARJI, E. et al. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction And Building Materials**. v. 45, p. 1-10, 2013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.032.

BOADELLA, I. L. et al. The Influence of Granite Cutting Waste on The Properties of Ultra-High Performance Concrete. **MDPI Materials**. v. 12, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ma12040634.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO NP **EN 12390-3**: Ensaio de Concreto Endurecido – Resistência à compressão dos corpos de prova de ensaio, Portugal, 2009.

DANISH, P. et al. Study on influence of Metakaolin and waste marble powder on self-compacting concrete – A state of the art review. **Materials Today: Proceedings**. v. 44, p. 1428-1436, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.629.

DOBISZEWSKA, M. et al. Influence of Rock Dust Additives as Fine Aggregate Replacement on Properties of Cement Composites—A Review. **MDPI Materials**. v. 15, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ma15082947.

ELYAMANY, H. et al. Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and Flow-able concrete. **Alexandria Engineering Journal**. v. 53, p. 295-307, 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2014.03.010.

GUPTA, L. K. et al. Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. **Construction And Building Materials**. v. 191, p.155-164, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.203.

KARIMIPOUR, A. et al. A thorough study on the effect of red mud, granite, limestone and marble slurry powder on the strengths of steel fibres-reinforced self-consolidation concrete: Experimental and numerical prediction. **Journal of Building Engineering**. v. 44, p. 103398, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103398.

LI, L.G. et al. Recycling of marble dust as paste replacement for improving strength, microstructure and eco-friendliness of mortar. **Journal of Cleaner Production**. v. 210, p. 55-65, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.332.

MARTINS, M.A. et al. Durability indicators of high-strength self-compacting concrete with marble and granite wastes and waste foundry exhaust sand using electrochemical tests. **Construction And Building Materials**. v. 317, p. 125907, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125907.

MARTINS, M.A.B. et al. Behavior of high strength self-compacting concrete with marble/granite processing waste and waste foundry exhaust sand, subjected to chemical attacks. **Construction And Building Materials**. v. 323, p. 126492, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126492.

MASHALY, A. O. et al. Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. **Journal of Cleaner Production**. v. 112, p. 731-741, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.023.

MEERA, M. et al. Rheological and strength properties of self-compacting concrete incorporating marble and granite powders. **Materials Today: Proceedings**. v. 32, p. 1005-1013, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.531.

PEREIRA, M.M.L. et al. Evaluation of use of marble and granite cutting waste to the production of self-compacting concrete. **Construction And Building Materials**. v. 345, p. 128261, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128261.

SADEK, D. M. et al. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**. v. 121, p. 19-32, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.044.

SINGH, M. et al. A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete. **Journal of Building Engineering**. v. 13, p. 87-95, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2017.07.009.

TOPÇU, I. B. et al. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. **Construction And Building Materials**. v. 23, p.1947-1953, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.007.