INFLUÊNCIA DOS RESÍDUOS DE PÓ DE QUARTZITO COMO SUBSTITUTO DO AGREGADO MIÚDO E DA SÍLICA ATIVA COMO ADIÇÃO MINERAL NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E POROSIDADE DO CONCRETO

Influence of quartzite powder waste as a substitute for fine aggregate and silica fume as a mineral addition on the compressive strength and porosity of concrete

Marco Aurélio da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais| Contagem, Minas Gerais | marcomca@yahoo.com.br

Flávia Spitale Jacques Poggiali
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais| flaviaspitale@cefetmg.br

Rodrigo Moysés Costa
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | rodrigo@moyses.com.br

Resumo

Este artigo busca demonstrar a influência da utilização de sílica ativa (adição mineral) e resíduos de quartzito (substituo da areia) em concreto de alto desempenho. Assim, foram utilizadas diferentes proporções de pó de quartzito (25%, 30% e 35%) em substituição à areia do IPT. No concreto com substituição da areia pelo pó de quartzito que obteve o maior valor de resistência à compressão aos 28 dias (51,13 MPa), foi realizada nova mistura com adição de sílica ativa na proporção de 15% da massa de cimento, visando aumentar a resistência à compressão e reduzir a porosidade. O empacotamento de partículas foi realizado com software EMMA para gerar a melhor curva granulométrica. Como resultado verifica-se que é possível utilizar o pó de quartzito juntamente com sílica ativa em concretos de alto desempenho com resistência à compressão de 76,12 MPa, absorção de água de 3,28% e índice de vazios de 7,27%.

Palavras-chave: *Concreto de alto desempenho; Concreto de alta resistência; Pó que quartzito; Sílica ativa.*

ABSTRACT

This article aims to demonstrate the influence of the use of silica fume (mineral addition) and quartzite residues (sand substitute) in high-performance concrete. Thus, different proportions of quartzite powder (25%, 30% and 35%) were used to replace IPT sand. In the concrete with the replacement of sand by quartzite powder, which obtained the highest compressive strength value at 28 days (51.13 MPa), a new mixture was made with the addition of silica fume in a proportion of 15% of the cement mass, aiming to increase compressive strength and reduce porosity. Particle packing was performed with EMMA software to generate the best particle size curve. As a result, it appears that it is possible to use quartzite powder together with silica fume in high-performance concretes with compressive strength of 76.12 MPa, water absorption of 3.28% and void content of 7.27%.

Keywords: *High performance concrete; High strength concrete; Powder that quartzite; Active silica.*

1 INTRODUÇÃO

A mineração de quartzito em Minas Gerais pode ser atrativa do ponto de vista comercial para algumas cidades. Entretanto, a extração desfigura o terreno natural e a paisagem local, além de assorear cursos d'água próximos e suprimir a vegetação nativa (Francklin Junior *et al.,* 2019). Estima-se que a extração, incluindo explosões e cortes finais de blocos, pode gerar um volume de resíduos que pode atingir até 90% do volume explorado (Francklin *et al.,* 2021; Francklin Junior *et al.,* 2019). Portanto, a destinação adequada e o reaproveitamento desses resíduos visam mitigar os impactos ambientais, por meio de soluções alternativas para os resíduos, como a reutilização. Assim, o reaproveitamento torna a extração menos prejudicial ao meio ambiente e agrega valor ao material que, até então, não possuía destino (Salas *et al.,* 2016; Tolstoy *et al.,* 2020).

Em relação à pesquisa bibliográfica sobre a utilização do pó de quartzito, verifica-se que Carvalho *et al.* (2020) utilizaram pó de quartzito como aditivos minerais reciclados finos na proporção de 5% e atingiram resistência à compressão de 98,9 MPa, com consumo de cimento de 344,4 kg/m³.

O rejeito da extração de quartzito foi utilizado na forma de pó refinado como substituto parcial do cimento no trabalho de Carvalho *et al.* (2019). Como resultado, os autores alcançaram resistência à compressão de 117,67 MPa (25,44% acima da referência), utilizando 26,6% de cimento Portland, 6,6% de pó de quartzito e 66,8% de areia.

Quanto ao uso da sílica ativa no concreto, Borosnyói (2015) utilizou materiais complementares à base de sílica ativa e obteve, após 28 dias, resistência à compressão de 108,02 MPa para uma taxa de substituição de 3% do cimento pela sílica ativa. Nos mesmos 28 dias, quando a taxa de substituição foi de 15%, a resistência à compressão caiu para 104,09 MPa. Porém, em idades mais avançadas, 300 dias, a resistência à compressão foi maior para os percentuais de substituição de 15% de cimento por sílica ativa, representando 123,39 MPa e 113,54 MPa para substituição de 15% e 3% respectivamente.

Desta forma, este artigo visa demonstrar a possibilidade de reaproveitamento dos resíduos do pó de quartzito em substituição à areia do IPT. Também será apontada a importância da adição da sílica ativa para aumentar a resistência à compressão do concreto e diminuir a absorção de água e o índice de vazios.

2 METODOLOGIA

Os materiais utilizados foram: pó de quartzito; cimento CP V da CSN; areias IPT conforme frações granulométricas das peneiras ABNT #100, #50, #30 e #16; sílica ativa da Tecnosil, aditivo superplastificante Glenium 51 da BASF e água da COPASA.

Para o empacotamento de partículas foi utilizado o software EMMA, com o modelo de Andreasen Modificado e estabelecido o valor de "q" = 0,20, conforme recomendado por Zuo *et al*. (2018).

Na composição granulométrica utilizou-se o granulômetro CILAS 1090. A densidade do pó de quartzito foi feita por picnometria, conforme NBR ISO 12154 (ABNT, 2022). No ensaio para determinar o teor de SiO_2 utilizou-se o Espectrômetro de Fluorescência de raios X por Energia Dispersiva (FRX).

Para determinação da resistência à compressão, os ensaios foram realizados em duas etapas principais. Na primeira parte dos ensaios de resistência à compressão foram utilizados somente cimento CP V da CSN, pó de quartzito, areias IPT conforme frações granulométricas das peneiras ABNT #100, #50, #30 e #16, aditivo superplastificante Glenium 51 da BASF e água da COPASA. A sílica ativa não foi utilizada na primeira parte dos ensaios, pois sua utilização alteraria os valores de resistência à compressão e não permitiria verificar de forma isolada os dados de resistência à compressão quando a utilização do pó de quartzito em substituição à areia.

O consumo de cimento adotado foi de 500 kg/m^3 para todas as misturas. O percentual de aditivo superplastificante foi de 1% da massa de cimento. O fator água/cimento utilizado foi fixado em 0,35 para todas as amostras. Segundo Wembe *et al.* (2023), para aumentar a resistência à compressão do concreto, seria indicado manter o fator água/cimento no intervalo de 0,25–0,35, com a utilização de aditivos superplastificantes, para se obter uma boa trabalhabilidade. A Tabela 1 mostra a composição dos corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 10x5cm e submetidos a cura úmida de 28 dias.

Tabela 1: Composição dos corpos-de-prova.

Identificação	Cimento (kg/m³)	Pó de Quartzito (kg/m³)	Sílica ativa (kg/m³)	Areia IPT 100 (kg/m³)	Areia IPT 50 (kg/m³)	Areia IPT 30 (kg/m³)	Areia IPT 16 (kg/m³)
Concreto de referência (CP1R)	500,00	0,00	0,00	460,34	461,34	459,84	461,83
Concreto com adição de pó de quartzito (CP2Q25)	500,00	460,17	0,00	345,26	346,00	344,88	346,38
Concreto com adição de pó de quartzito (CP2Q30)	500,00	552,21	0,00	322,24	322,94	321,89	323,28
Concreto com adição de pó de quartzito (CP2Q35)	500,00	644,25	0,00	299,22	299,87	298,90	300,19
Concreto de referência com adição de sílica ativa (CP3RS)	500,00	0,00	75,00	441,59	442,59	441,09	443,08
Concreto com adição de pó de quartzito e sílica ativa (CP4Q30S)	500,00	552,21	75,00	303,49	304,19	303,14	304,53

Água 175 litros (A/C=0,35)
Aditivo superplastificante: 5litros (1% massa de cimento)

Fonte: Autoria própria (2024).

Na segunda parte dos ensaios, com o intuito de aumentar a resistência à compressão, foi adicionada a sílica ativa na proporção de 15% da massa de cimento em substituição parcial da areia (consumo de 75 kg/m^3), o que representou um consumo de sílica ativa de 75 kg/m^3 de concreto. Desta forma, a sílica ativa foi adicionada somente no concreto de referência e na mistura que continha 30% de substituição da areia pelo pó de quartzito, pois estas misturas de 30% de substituição apresentaram os melhores resultados de resistência à compressão da primeira parte dos ensaios somente com pó de quartzito.

Por fim, para determinação da absorção de água e do índice de vazios foram utilizados os critérios constantes na NBR 9778 (ABNT, 2005), que regulamenta os cálculos e os procedimentos para absorção de água por imersão em argamassas e concretos endurecidos.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

A Tabela 2 apresenta os dados de caracterização física e química do pó de quartzito, segundo os ensaios de picnometria, fluorescência de raios X e granulometria a laser.

Tabela 2: Caracterização física e química.

Massa específica	2.774 kg/m^3
Teor de SiO_2	95,823%
Diâmetro médio da partícula	35,76 µm

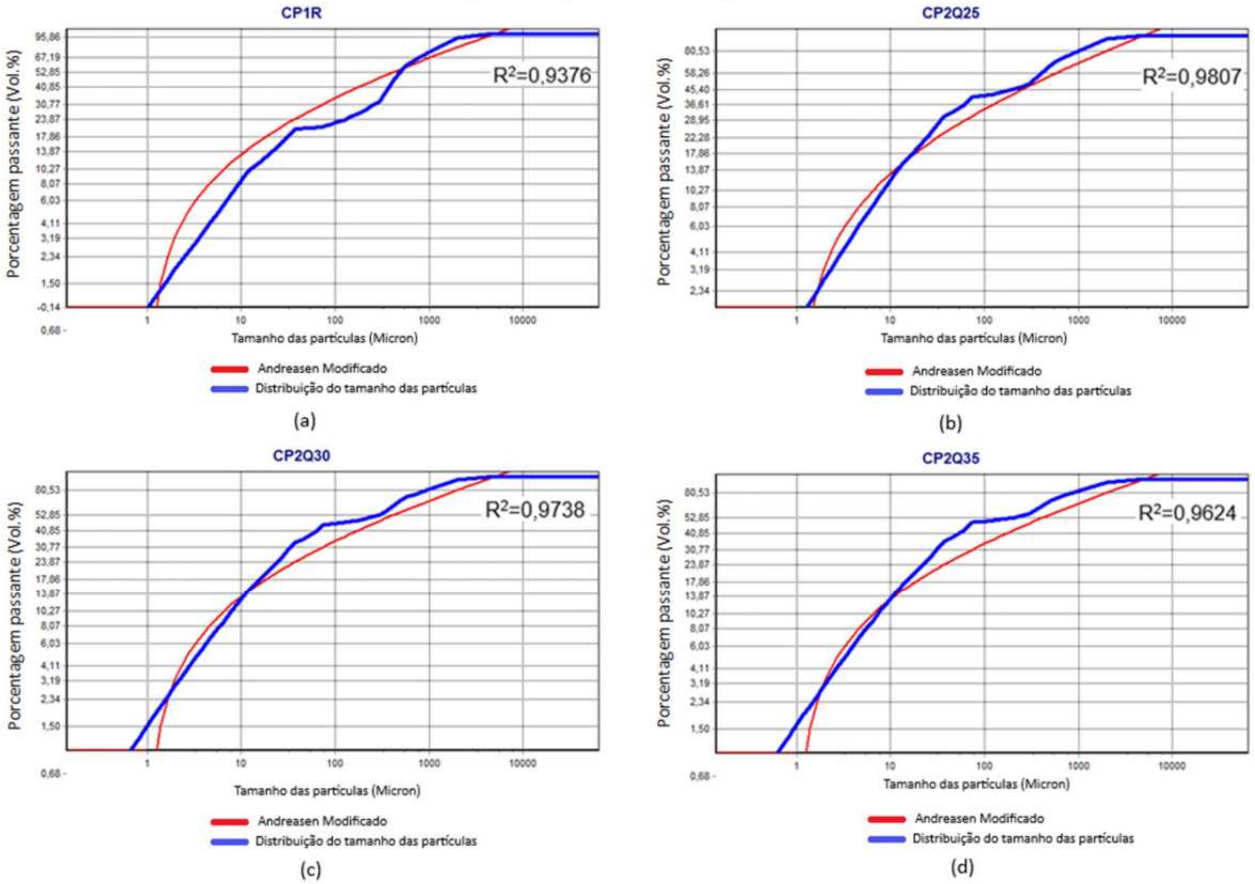
Fonte: Autoria própria (2024).

A distribuição granulométrica dos materiais constituintes da mistura de concreto foi otimizada através do empacotamento de partículas (OLIVEIRA *et al.,* 2018).

Da análise da Figura 1, letras “a” até “d”, foi verificado que as curvas granulométricas que mais se aproximaram da curva ideal do modelo de Andreasen Modificado foram aquelas que continham concretos com 25% e 30% de substituição da areia pelo pó de quartzito (CP2Q25 e CP2Q30), pois elas apresentaram R^2=0,9807 e R^2=0,9738, respectivamente, conforme Figuras 1 (b) e 1 (c).

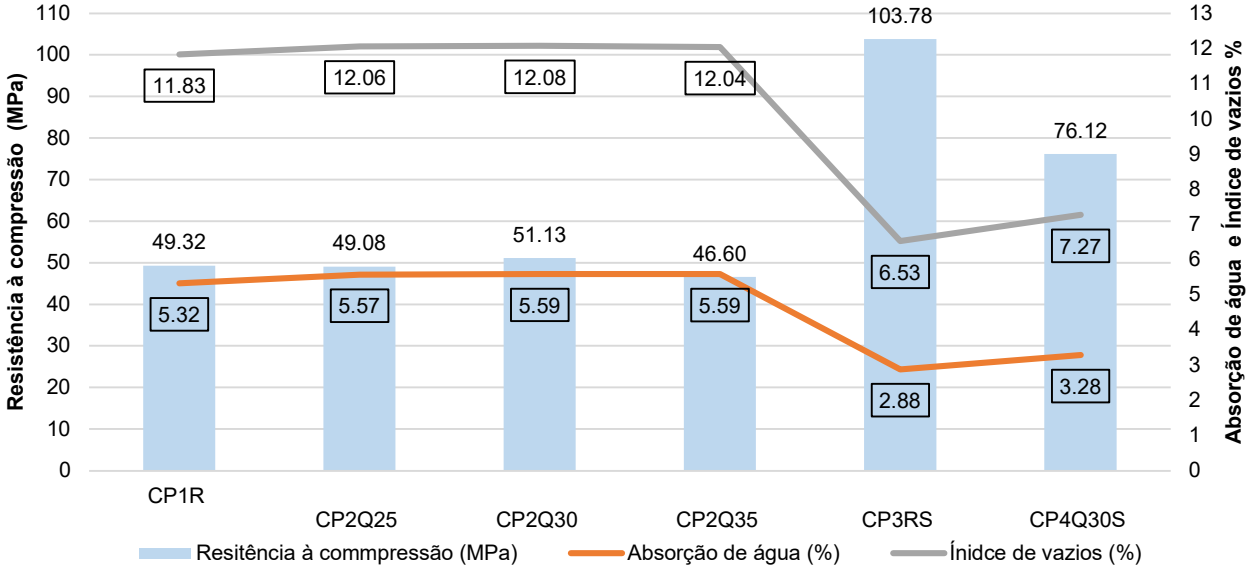
Na Figura 2 foi realizada a comparação entre a absorção de água e o índice de vazios com a resistência à compressão aos 28 dias. Da análise da Figura 2, notou-se que a resistência à compressão foi maior naqueles corpos-de-prova que apresentaram a menor absorção de água e o menor índice de vazios dentre os concretos ensaiados. Neste sentido, a durabilidade do concreto é inversamente proporcional à quantidade de absorção de água e ao índice de vazios, visto que quanto maiores os valores do índice de vazios, maior e absorção de água, maior será a facilidade de entrada de agentes agressivos ao concreto (Gaparrim, 2007; Nascimento *et al.,* 2022). A absorção de água também está diretamente ligada à porosidade do material devido aos poros interconectados (Tafarel *et al.,* 2016). Isso explica os menores valores de resistência à compressão nos concretos que apresentaram maiores absorções de água e maiores índice de vazios.

Figura 1: Empacotamento de partículas:



(a) concreto de referência; (b) concreto com 25% de substituição da areia pelo pó de quartzito; (c) concreto com 30% de substituição da areia pelo pó de quartzito; e (d) concreto com 35% de substituição da areia pelo pó de quartzito.
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 2: Absorção de água e índice de vazios x resistência à compressão - 28 dias.



Fonte: Autoria própria (2024)

Pode-se notar que o CP1R apresentou resistência à compressão de 49,32 MPa, absorção de água de 5,32% e índice de vazios de 11,83%. O CP2Q25 apresentou resistência à compressão de 49,08 MPa, absorção de água de 5,57% e índice de vazios de 12,06%. O CP2Q30 apresentou resistência à compressão de 51,13 MPa, absorção de água de 5,59% e índice de vazios de 12,08% e o CP2Q35 apresentou resistência à compressão de 46,60 MPa, absorção de água de 5,59% e índice de vazios de 12,07%. Por outro lado, pode-se verificar os concretos que apresentaram maiores valores de resistência à compressão (CP3RS, que

apresentou resistência à compressão de 103,78 MPa, absorção de água de 2,88% e índice de vazios de 6,53% e, por fim, o CP4Q30S apresentou resistência à compressão de 76,12 MPa, absorção de água de 3,28% e índice de vazios de 7,27%).

4 CONCLUSÕES

A incorporação da sílica ativa elevou resistência à compressão do concreto, possibilitando o enquadramento deste como concreto de alto desempenho e de alta resistência, obtendo-se resistência à compressão média de 103,78 MPa para o CP3RS (referência) e de 76,12 MPa para o CP4Q30S, aos 28 dias, com intensidade de cimento de 4,82 kg/m^3/MPa e 6,57 kg/m^3/MPa, respectivamente. O efeito da sílica ativa no aumento da resistência à compressão ocorreu em virtude da zona interfacial mais fina do que o concreto de cimento simples. Desta forma, a densificação da estrutura causada pela sílica ativa causou a diminuição da porosidade (*efeito filler*). O aumento da resistência à compressão também pode ser explicado devido aos efeitos físico e pozolânico da sílica ativa na micro e na macroestrutura do concreto que ocorre na reação da sílica ativa com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento, formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

A redução da resistência à compressão do concreto que recebeu sílica ativa e pó de quartzito (CP4Q30S) em relação ao CP3RS pode ser explicada devido ao sequestro de água ocorrida pela utilização do pó de quartzito, bem como ao excesso de finos na mistura (menor do que a areia que foi substituída pelo pó de quartzito e maiores do que o cimento e a sílica ativa). Este fato foi percebido no momento das misturas dos materiais para confecção dos corpos-de-prova.

Por fim, a sílica ativa, além de aumentar a resistência à compressão, também diminuiu a absorção de água de 5,32% no CP1R para 2,88% no CP3RS e de 5,59% no CP2Q30 para 3,28% no CP4Q30S. Da mesma forma, o índice de vazios foi reduzido de 11,83% no CP1R para 6,53% no CP3RS e de 12,08% no CP2Q30 para 7,27% no CP4Q30S, demonstrando o potencial de utilização da sílica ativa e do pó de quartzito em concretos de alto desempenho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CEFET- MG, aos organizadores do 9º Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção e a todos os professores que contribuíram para a elaboração deste artigo.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica: Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 12154**: determinação da densidade por deslocamento volumétrico - densidade-esqueleto por picnometria a gás. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 12655**: concreto de cimento portland - preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BOROSNYÓI, A. Development of compressive strength of hpc with the use of supplementary cementing material (SCM) combination: Epitoanyag. **Journal of Silicate Based and Composite Materials**, v. 67, n. 3, p. 110 -115, 2015.

CARVALHO, J. M. F.; MELO, T. V.; FONTES, W. C.; SANTOS B. J. O.; 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.

CARVALHO, J. M. F.; FONTES, W. C.; AZEVEDO, C. F.; BRIGOLINI, G. J.; SCHMIDT, W.; PEIXOTO, R. A. F. Enhancing the eco-efficiency of concrete using engineered recycled mineral admixtures and recycled aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 257, p. 120530, 1 jun. 2020.

FRANCKLIN, I.; RIBEIRO, R. P.; CORRÊA, F. A. Quartzite mining waste: diagnosis of asr alkali-silica reaction in mortars and portland cement concrete. **Materials**, v. 14, n. 24, 1 dez. 2021.

GASPARIM, J. C. **Concreto projetado elaborado com cimentos especiais**: análise segundo parâmetro de durabilidade. 2007. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

FRANCKLIN JUNIOR, I.; RIBEIRO, R. P.; DA SILVA, M. H.; AURELIANO, F. S.; COSTA, A. A.; GARCIA, V. L. Study of reactive powder concrete using quartzite tailings from the state of Minas Gerais: Brazil. **Procedia Manufacturing**, v. 38, p. 1758–1765, 1 jan. 2019.

NASCIMENTO, C. F. G. D.; DEMÉTRIO F. A. D. A.; SILVA, T. M. D.; TEIXEIRA, I. A. D. R.; NEVES, D.; MONTEIRO, E. C. B. Influência do índice de vazios do concreto celular na corrosão das barras de aço. **Revista ALCONPAT**, v. 12, n.1, p. 76-97, 2022.

OLIVEIRA, C. O.; MACIEL, G. D. F.; CASTRO, A. L. D.; BARBOSA, M. P.; CAMPOS, R. S. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Matéria**, v. 23, n. 1, 2018.

SALAS, D. A.; RAMIREZ, A. D.; RODRÍGUEZ, C. R.; PETROCHE, D. M.; BOERO, A. J.; DUQUE-RIVERA, J. Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: a literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 114–122, 1 fev. 2016

TAFAREL, N. F.; MACIOSKI, G.; CARVALHO, K. Q. D.; NAGALLI, A.; FREITAS, D. C. D.; PASSIG, F. H. Evaluation of concrete properties due to the incorporation of sludge from water treatment plant. **Matéria**, v. 21, p. 974-986, 2016.

TOLSTOY, A.; LESOVIK, V.; FEDIUK, R.; AMRAN, M.; GUNASEKARAN, M.; VATIN, N.; VASILEV, Y. Production of greener high-strength concrete using Russian quartz sandstone mine waste aggregates. **Materials**, v. 13, n. 23, p. 1–13, 1 dez. 2020.

WEMBE, J. T.; NGUEYEP, L. L. M.; MOUKETE, E. E. A.; ESLAMI, J.; PLIYA, P.; NDJAKA, J. M. B.; NOUMOWE, A. Physical, mechanical properties and microstructure of concretes made with natural and crushed aggregates: application in building construction. **Cleaner Materials**, v. 7, p. 100173, 2023.

ZUO, W.; LIU, J.; TIAN, Q.; XU, W.; SHE, W.; FENG, P.; MIAO, C. Optimum design of low-binder self-compacting concrete based on particle packing theories. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 938–948, 28 fev. 2018.