ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Desenvolvimento de argamassa ecológica de alta performance com a adição de pó de gnaisse

Development of high-performance ecological mortar with the addition of gneiss powder

Abner Araújo Fajardo
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo horizonte | Brasil | fajardo.aabner@gmail.com
Silvia Roberta Souza
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo horizonte | Brasil | roberta.souzar@hotmail.com
Fernando de Couto Rosa Almeida
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo horizonte | Brasil | fernandocralmeida@gmail.com
Maria Teresa Paulino Aguilar
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo horizonte | Brasil | teresa@ufmg.br
Dayana Cristina Silva Garcia
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo horizonte | Brasil | dayanacsgarcia@gmail.com
Maria Teresa Gomes Barbosa
Universidade Federal de Juiz de Fora | Belo horizonte | Brasil | teresa.barbosa@ufjf.br
White José dos Santos
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo horizonte | Brasil | white.santos@demc.ufmg.br

Resumo

As propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas estruturais de alto desempenho compostas por cimento e sílica ativa e, posteriormente, com adição de pó de gnaisse (GN) foram analisadas aos 112 dias de idade. Realizou-se a caracterização química, física e mineralógica dos materiais. A argamassa com GN apresentou boa *performance*: 0,06% para coeficiente de capilaridade, 0,62% para absorção por imersão, 1,41%, para porosidade aberta e 0,13% para porosidade teórica, um aumento da resistência à compressão na ordem de 33,50% e na resistência à tração na flexão de 61%, a resistividade elétrica superficial foi igual a 1123 kΩ.cm e a resistividade volumétrica de 1.973 Ω.m. Além disso, há uma redução de 6,47% nas emissões de CO_2 para a produção das argamassas GN em relação à argamassa só com cimento e sílica ativa. Conclui-se que a incorporação de pó de gnaisse em argamassas proporciona melhora as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade, além de contribuir para o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Argamassa estrutural de alto desempenho. Argamassa ecológica. Durabilidade. Propriedades mecânicas. Pó de Gnaisse (GN).

Como citar:
FAJARDO, A A, *et al.*, A. Desenvolvimento de argamassa ecológica de alta performance com a adição de pó de gnaisse. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

Abstract

The mechanical and durability properties of high-performance structural mortars composed of cement and silica fume and, subsequently, with the addition of gneiss powder (GN) were analyzed at 112 days of age. The chemical, physical, and mineralogical characterization of the materials was carried out. The mortar with GN showed high performance: 0.06% for capillarity coefficient; 0.62% for immersion absorption; 1.41% for open porosity; 0.13% for theoretical porosity; an increase in compressive strength in the order of 33.50% and the flexural tensile strength of 61%; the surface electrical resistivity was equal to 1123 kΩ.cm and the volumetric resistivity was 1.973 Ω.m. Furthermore, there is a 6.47% reduction in CO_2 emissions producing GN mortars compared to mortar with only cement and silica fume. It is concluded that the incorporation of gneiss powder in mortars improves physical, mechanical and durability properties, in addition to contributing to sustainable development.

Keywords: High performance structural mortar. Ecological mortar. Durability. Mechanical properties. Gneiss Powder (GN).

INTRODUÇÃO

Aproximadamente 30% das matérias-primas disponíveis em nível global são consumidas pela indústria da construção civil, enquanto cerca de 25% da água do mundo é utilizada por esse setor [1 -2]. Entretanto, a construção civil se mostra como uma alternativa para a destinação de resíduos, possibilitando a redução dos impactos sociais, econômicos, ambientais [3]. Em 2022, o beneficiamento de rochas granitoides (granito, gnaisse e outras) no Brasil para produção de agregados (britas e areias) foi de aproximadamente 640 milhões toneladas, sendo 374 milhões de toneladas de areia e 266 milhões de toneladas de brita [4]. O rejeito final, material pulverulento, resultado da britagem de rocha [5] frequentemente é armazenado de maneira inadequada ao ar livre, resultando em impactos ambientais e desperdício de recursos minerais [6].
Existem diversos estudos do emprego do pó de gnaisse na produção de concretos, tanto para os convencionais [7] quanto os autoadensáveis que proporcionaram ganhos significativos nas propriedades mecânicas e de durabilidade [8, 9]. Outros estudos o empregaram na produção de misturas asfálticas, gerando aumento de 22% na resistência à tração [10] bem como, na produção de “argamassas ecológicas”, onde foi possível substituir 50% do cimento pelo GN, comprometendo em 20% à resistência à compressão [11]. Assim, o objetivo principal deste estudo consiste em analisar o desempenho mecânico e a durabilidade das argamassas estruturais de alta resistência (acima de 40 MPa) em idades avançadas (112 dias), incorporando pó de gnaisse como adição mineral em comparação a argamassas (cimento e areia) com adição somente de sílica ativa.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados foram: cimento CPV-ARI; areia normal fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT); sílica ativa da marca Tecnosil (% SiO_2 > 90%, massa específica: 2220 kg/m³); aditivo superplastificante à base de policarboxilatos de pega normal MC-PowerFlow 4001 da marca MC-Bauchemie (densidade 1,12 kg/m³). O *filler* de gnaisse foi fornecido pela empresa Mineração Santiago, localizada no bairro Céu Azul, na cidade de Belo Horizonte, estado de Minas Gerais. Antes da moldagem das amostras, o *filler* foi seco em estufa na temperatura de 105 °C durante um período de

24 horas. Este material foi peneirado e a parte que passou pela peneira de 150µm (90%) foi utilizada na pesquisa.

A curva granulométrica do gnaisse, da sílica ativa e do cimento (Tabela 1) revela que o gnaisse se mostrou possuir uma granulometria ligeiramente superior ao cimento e a sílica ativa. Salienta-se, que para a sílica ativa há uma faixa ainda mais fina (com partículas menores que 1 µm) que não foi detectável pelo granulômetro, conforme demonstrado pela área superficial específica (ASE). O pó de gnaisse é cristalino com as principais fases minerais sendo: quartzo, caulinita, albita e biotita.

Para a dosagem das argamassas, utilizou o software de empacotamento de partículas, Elkem Materiais Mixture Analyzer (EMMA). No software, os parâmetros utilizados foram o diâmetro máximo de 2,4 mm que corresponde a dimensão máxima da areia e o diâmetro mínimo de 0,1µm que corresponde ao tamanho usual da sílica ativa. Além disso, foi utilizado o modelo de Andreasen Modificado e o módulo de distribuição de 0,30, definido com base em outros estudos.

Tabela 1: Parâmetros granulométricos dos materiais.

Decil	Amostra		
	Gnaisse	CP-V	Sílica Ativa
D_{90} (mm)	64,9	28,7	24,41
D_{50} (mm)	25,7	8,3	13,74
D_{10} (mm)	1,62	0,7	3,76
Médio (mm)	39,90	11,8	13,92
ASE (m^2/g)	2.240	1.743	22.010

Após a definição da proporção dos materiais secos, o teor de água e aditivo superplastificante foram determinados por ajuste experimental, sendo utilizado o espalhamento constante (230 ± 10) mm pela *Flow table* [12]. A proporções de materiais das argamassas estão na Tabela 2.

Tabela 2: Proporções de materiais em massa das amostras

Argamassa	Cimento	Areia	Sílica Ativa	Pó de gnaisse	Água (a/c)	Superplastificante
REF	1,000	3,000	0,250	0,000	0,375	2%
GN	1,000	3,000	0,250	0,400	0,375	3%
				Consumo m^3		
REF	515	1545	129	0	193	10
GN	479	1437	120	192	180	14

Utilizou-se uma betoneira de eixo inclinado para misturar as argamassas. Em seguida, utilizou-se a mesa vibratória para o adensamento. Para o processo de cura, os corpos de prova foram submersos em água. Após a cura, foram determinadas as seguintes propriedades:

a) resistência à compressão (5 corpos de prova cúbicos - 5x5x5 cm) [13] ensaiados em uma máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL20000, com velocidade de carregamento de (0,45 ± 0,15) MPa/s;

b) resistência à tração na flexão (3 corpos de prova prismáticos - 4x4x16 cm) [14] testados em uma máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL20000, com velocidade de carregamento de (1,00 ± 0,15) MPa/s.;
c) porosidade [15] a água com uso de balança com precisão de 0,01 g;
d) resistividade elétrica volumétrica e superficial (corpo de prova cilíndrico de Ø10x20 cm) [16 -17] utilizando-se o equipamento RESIPOD com precisão é de (± 0,2 a ± 2,0 kWcm), sendo que o corpo de prova ficou submerso em água por um período de 72 horas antes da realização do ensaio.
e) Para a avaliação da microestrutura das argamassas utilizou-se um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Quorum Q150R ES com tensão de 20 kV em amostras de dimensões aproximadamente 1x1x1 cm retiradas de corpos de prova cúbico (5x5x5 cm). Para a análise quantitativa das imagens de MEV, três fragmentos foram coletados em diferentes locais para cada tipo de argamassa totalizando 20 imagens por tipo. A análise foi conduzida utilizando o *software ImageJ* e escalas de cinza, variando de 0 a 255, onde valores mais próximos de 0 correspondem à cor preta e valores mais próximos de 255 à cor branca. A determinação dos poros foi baseada na proximidade com a faixa de 0, considerando a imagem como um todo e levando em conta a contribuição do agregado para a porcentagem total de poros. Para identificar as fases anidras, utilizou-se o mapa químico (EDS) das argamassas e fez o tratamento pelo software *ImageJ* por meio da escala de cinza. Sendo que esta escala varia de 0 a 255, sendo que mais próximo de 0, a cor preta e mais próximo de 255 a cor branca. Para a fase anidra, a escala variou entre 90 a 200 aproximadamente.
f) Analisou-se a hidratação dos compostos por TGA (Thermogravimetric Analysis) e pela DTA (Differential Thermal Analysis) com cadinho de Alumina e atmosfera de nitrogênio 50 [ml.min-1] utilizando-se de um corpo de prova cúbico (5x5x5 cm^3).
g) Para a emissão de CO_2 de cada material considerou os dados levantados na bibliografia [18-22] expressos na Tabela 3.

Tabela 3: Emissões de CO_2 segundo a bibliografia

Componente	CO_2-eq/kg	Referência
Cimento	0,892	[18]
Sílica Ativa	0,00031	[19]
Agregado	0,014	[20]
Filler de gnaisse	0,004587	[21 – 22]
Água	0,0003	[19]
Superplastificante	0,75	[19]

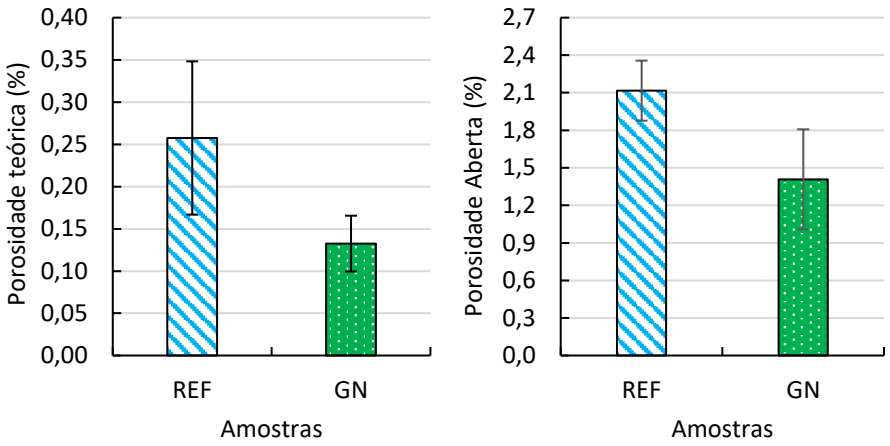
RESULTADOS

Os resultados na Figura 1 indicam que a amostra REF registrou a maior porosidade teórica, com 0,26%, enquanto o GN atingiu 0,13%. Consequentemente, a argamassa de GN apresentou um desempenho superior, mostrando uma redução de 48,54% em comparação com a argamassa de REF.

Para a porosidade aberta, a amostra de REF registrou o maior valor, com 2,12%, enquanto o GN atingiu 1,41%. Consequentemente, a argamassa de GN também apresentou um desempenho superior, mostrando uma redução de 33,61% em

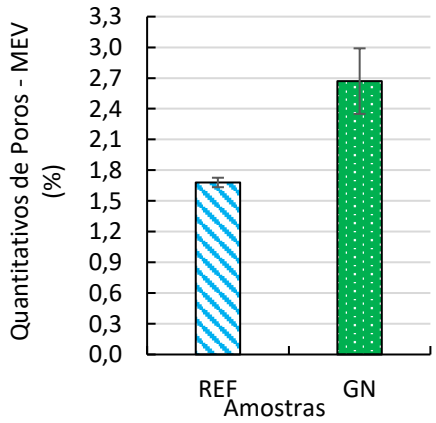
comparação com a argamassa de REF. Constatou-se que o processo de empacotamento gerou uma argamassa com alta densificação e reduzida porosidade. Além disto, sugere-se que a presença das adições de GN gera pontos de nucleação e efeito *filler* que aceleraram as reações químicas de hidratação do cimento e as pozolânicas da sílica ativa, com o passar do tempo.

Figura 1: Porosidade teórica e Porosidade aberta



Nas análises quantitativas dos poros, Figura 2, realizadas por MEV e tratamento de imagens binárias, os resultados das argamassas mostraram valores divergentes à porosidade aberta: 1,68% para o REF e 2,67% para o GN. Portanto, a argamassa de GN registrou uma diminuição de 58,93% em relação ao REF. Embora o resultado do GN seja maior do que a amostra de REF, ambos os resultados foram baixos, e mostrando uma baixa porosidade, corroborando com os resultados de porosidade teórica e de porosidade aberta.

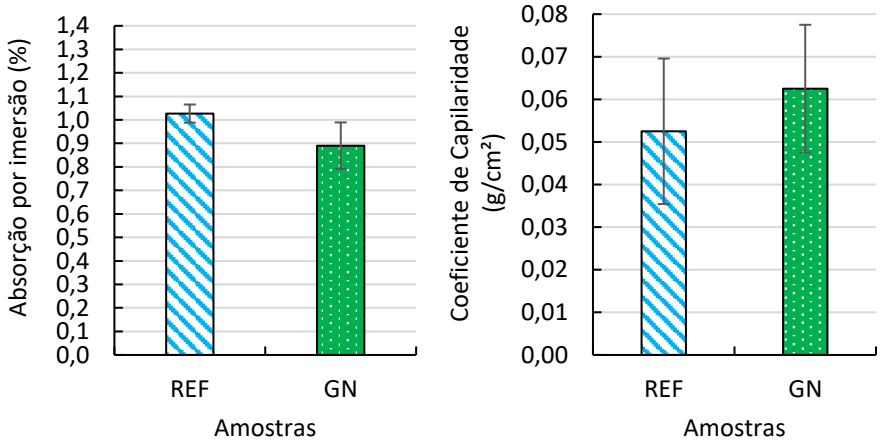
Figura 2: Quantitativos de poros por meio de análise de imagens de MEV



Na Figura 3 é possível visualizar os resultados de absorção por imersão e coeficiente de capilaridade. A amostra de GN teve o menor resultado para absorção por imersão, 0,89% e a amostra de REF, o valor de 1,03%. Sendo que a amostra de GN teve uma redução de 13,59% em relação a amostra de REF. Nos resultados de absorção de água por imersão, todas as amostras apresentaram valores inferiores a 1,1%, sendo

considerado um bom indicador de durabilidade, uma vez que é menor do que 10% a nível nacional [23] e menor que 2% a nível internacional [24].

Figura 3: Absorção por imersão e Coeficiente de Capilaridade

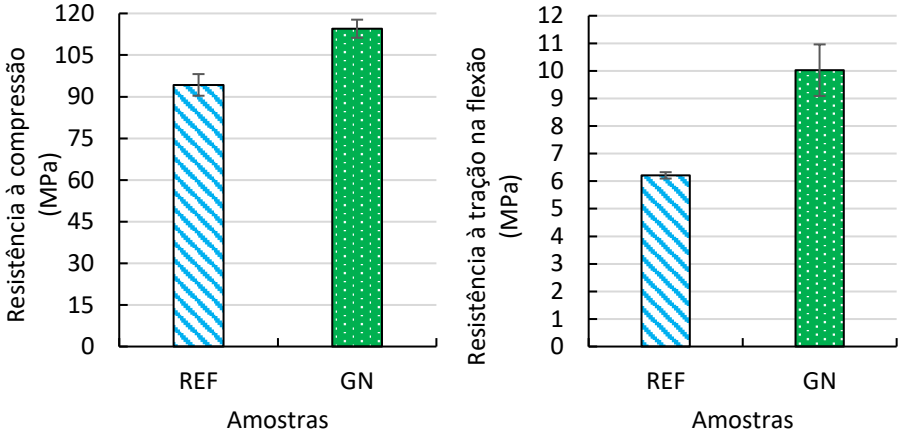


No resultado de coeficiente de capilaridade, a argamassa de GN teve o maior resultado (0,06%) e a argamassa de REF ligeiramente menor (0,05%). O coeficiente de capilaridade é um indicativo para compreender e prever a durabilidade das argamassas [25]. Todos os resultados apresentaram valores muito baixos, indicando que a conectividade dos poros é baixa, aumentando a durabilidade das amostras. Isto pode ter levado a discordância em relação a porosidade do MEV e aberta, que precisa da água entra nos poros para se definir a porosidade.

Ao analisar as propriedades mecânicas das amostras com 112 dias de cura (Figura 4), constatou-se que a amostra de GN apresentou um resultado de 114,50 MPa, enquanto a amostra de REF alcançou 94,25 MPa. Isso indica um aumento de desempenho de 21,48% da amostra de GN em comparação com a amostra REF. Observa-se ainda, uma elevada resistência à tração na flexão, com GN tendo o valor de 10,03 MPa, enquanto a referência registrou 6,21 MPa. Notavelmente, a argamassa de *filler* de gnaisse demonstrou um desempenho 61,43% superior em relação à argamassa de referência a tração na flexão. O aumento das propriedades mecânicas da amostra de GN pode ser atribuído ao melhor empacotamento de partículas e adição de sílica ativa, que provavelmente contribuíram para a formação de pontos de nucleação e para a promoção das reações pozolânicas da sílica ativa. O aumento acentuado de 63% na resistência à tração na flexão pode ser atribuído à maior aderência das partículas de GN às pastas de cimento. Essa melhoria também pode ter sido favorecida por uma baixa relação água/cimento (0,375).

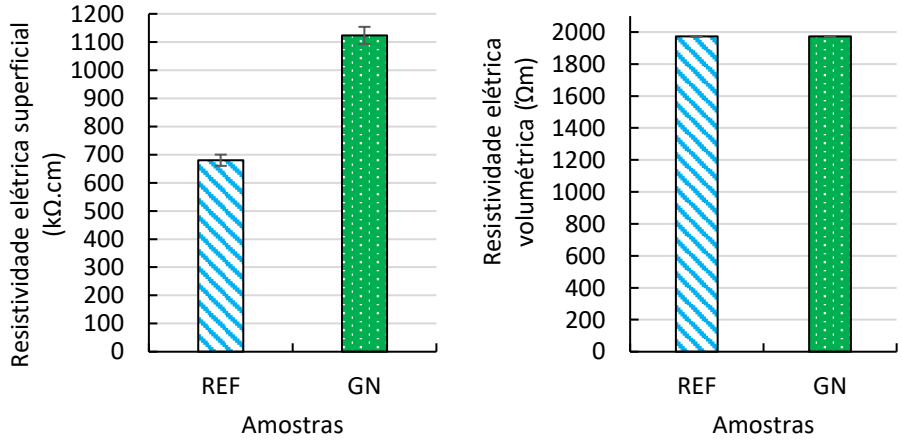
A resistividade elétrica, sendo um ensaio não destrutivo, pode ser utilizado como método para avaliar a qualidade e durabilidade de materiais [26]. No caso da resistividade elétrica superficial (Figura 5), a argamassa de GN apresentou um valor de 1.123 kΩ.cm, enquanto a argamassa de REF registrou 680 kΩ.cm, logo GN exibiu um valor 65% superior ao da argamassa de REF. As argamassas alcançaram o limite máximo de medição do aparelho para resistividade elétrica volumétrica (Figura 5), registrando 1.973 Ω.m. Não foi possível identificar qual argamassa apresentou o maior valor nem determinar esse valor.

Figura 4: Resistência à compressão das argamassas e resistência à tração na flexão



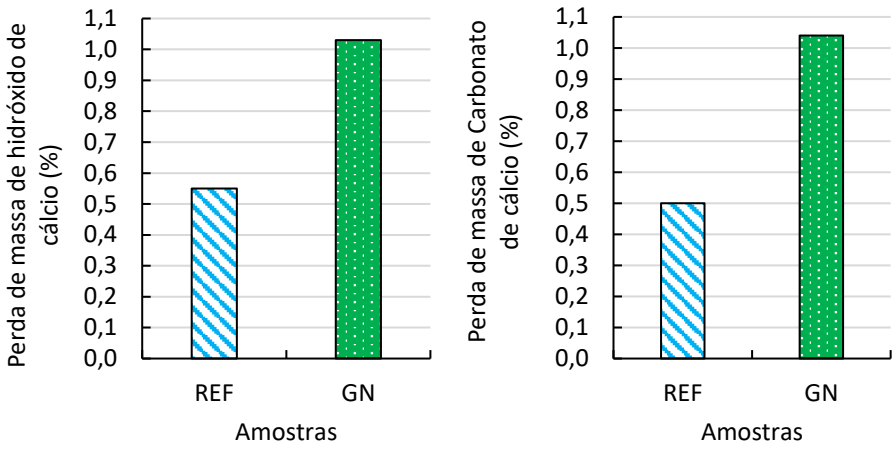
A resistividade elétrica volumétrica tem uma grande importância para a avaliação da sua durabilidade [27]. Os valores de resistividade elétrica volumétrica são analisados por faixas de níveis de penetração de cloretos, sendo o valor de 1.973 Ω.m se encontrando na faixa de muito baixa para penetração de cloretos [28]. Para a resistividade elétrica superficial, a argamassa de GN, está na faixa de potencial de corrosão insignificante, de acordo com a bibliografia [29 - 30], que foi favorecido, inclusive, pelo baixo fator a/c (a/c = 0,375), bem como pela presença de sílica ativa, pois induzir o refinamento dos poros e a redução da permeabilidade do concreto [31].

Figura 5: Resistividade elétrica superficial e Resistividade elétrica volumétrica



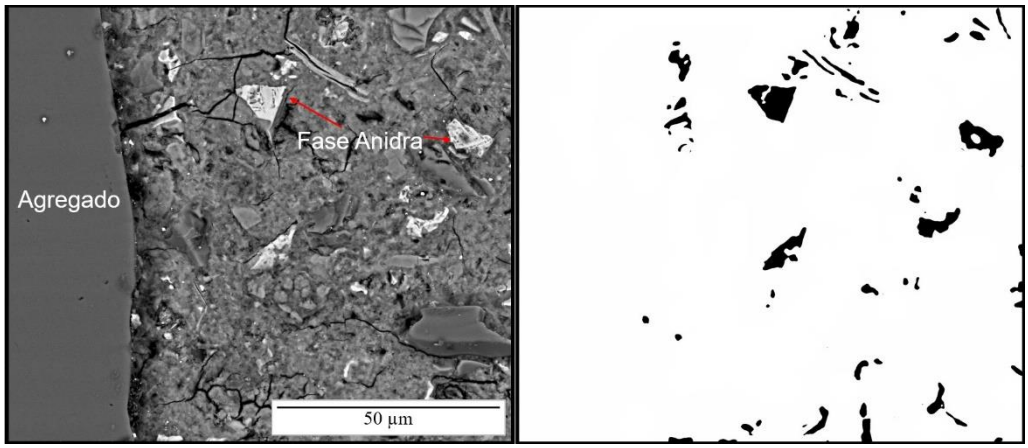
Na Figura 6 é possível visualizar as perdas de massa de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) e carbonato de cálcio ($CaCO_3$) das amostras REF e GN segundo análise de termogravimétrica (TG/DTA). Observa-se que tanto o hidróxido de cálcio como o carbonato de cálcio foram maiores para a argamassa de GN. Isso indica que esses materiais podem ter funcionado como pontos de nucleação favorecendo a hidratação do cimento Portland.

Figura 6: Perda de massa de hidróxido de cálcio e perda de massa de carbonato de cálcio



As imagens da microestrutura e a imagem binária tratada para quantificação das fases anidras podem ser vistas na Figura 7. O quantitativo das fases anidras das argamassas das amostras na Figura 8, mostra que a amostra de REF teve um valor de 2,97% e a amostra de GN 4,32%. Este resultado demonstra que o bom desempenho mecânico e de durabilidade registrados nas argamassas com GN, que proporcionam a densificação da matriz.

Figura 7: Imagens de MEV da argamassa de GN fases anidras em imagem binária da argamassa de GN



O equivalente de dióxido de carbono (CO_2-eq) em relação a 1 m³ de compósito cimentício (argamassa) foi calculado para cada composição investigada nos compósitos deste estudo, Figura 9, juntamente com algumas referências que conduziram estudos similares/complementares (Tabela 3).

Multiplicando a quantidade de cada componente pela sua emissão de CO_2 equivalente por quilograma de material, foi possível obter um índice correspondente. Assim sendo, observa-se na Figura 9, que a argamassa de *filler* de gnaisse 451,09 CO_2-eq/Kg sendo menor do que a argamassa de REF, 482,28 CO_2-eq/Kg. Assim sendo, a argamassa de GN emitiu 6,47% menos de CO_2 em relação a argamassa de referência.

Figura 8: Quantitativo de fase anidra por meio de tratamento de imagens de MEV

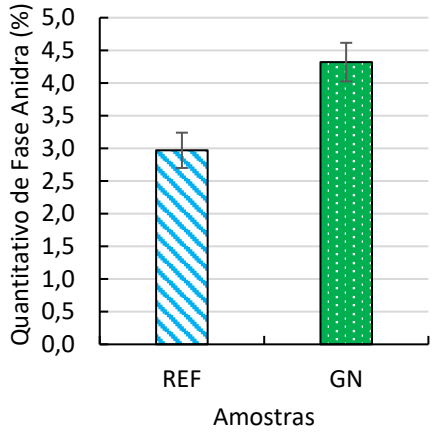
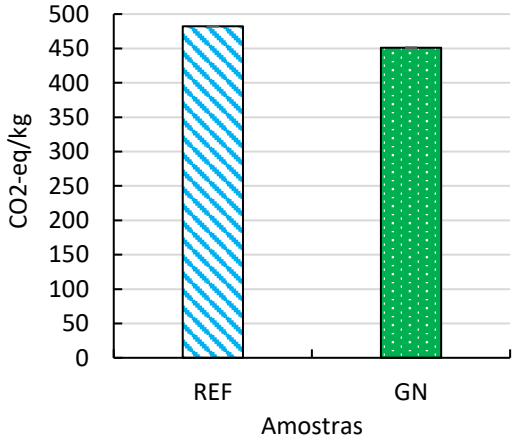


Figura 9: Gráfico de emissão de CO_2 das argamassas



CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que ao utilizar o pó de gnaisse como adição mineral, por meio do empacotamento de partículas, pode-se gerar argamassas estruturais de alto desempenho e, ainda possuir benefício ecológico. Pode-se concluir:

- A maximização das resistências à compressão (114,50 MPa) e da tração na flexão (10,03 MPa), além do aumento da durabilidade;
- Uma redução na porosidade aberta (1,41%) e na porosidade teórica (0,13%), entretanto, houve um aumento na porosidade (macroporos) pela análise de quantitativos de poros por meio de MEV (2,67%);
- Redução na absorção de água por imersão (0,89%) e um baixo valor de coeficiente de capilaridade de (0,06%) semelhantemente com a argamassa de referência;
- Valores elevados de resistividade elétrica superficial (1.123 kΩ.cm) e volumétrica (1.973 Ω.m);
- Na análise dos teores de fases anidras, a argamassa com GN apresentou um índice 45,5% inferior ao da argamassa de referência, indicando a tendência à densificação da matriz;

- A argamassa de GN reduziu em 6,47% da emissão de CO_2, fazendo com que a argamassa cause menos impactos negativos ao ecossistema.

Conclui-se que esses resultados são atribuídos à melhor ancoragem das partículas com as pastas de cimento, influenciada pela nucleação e empacotamento mais eficiente promovida pelo GN e por uma baixa relação água/cimento (0,375) permitida pela presença de aditivo superplastificante. Assim, o processo de empacotamento gerou argamassas com alta densificação e reduzida porosidade convergindo para argamassas de alta durabilidade.

A adição de pó de gnaisse foi comprovada como um meio viável para aprimorar tanto o desempenho mecânico quanto a durabilidade de argamassas. Esta constatação ressalta a capacidade de alcançar elevada resistência em argamassas através dessa adição mineral. Além disso, é possível reduzir a emissão de CO_2 durante a produção dessas argamassas, tornando o produto mais ecológico e minimizando seu impacto ambiental.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio dos órgãos de fomento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico e Científico (CNPq - projeto número 304596/2022-1), Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG - projeto número APQ-00584-21) e curso de Pós-graduação em Construção Civil.

REFERÊNCIAS

[1] CARVALHO, A. R. de; SILVA JÚNIOR, G. da.; FONTES, W. C.; SILVA, G. J. B.; PEDROTI, L. G.; OLIVEIRA, T. M. de. Influência do efeito fíler do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 23, n. 4, p. 217-239, out./dez. 2023.

[2] GIANNETTI, B. F. et al. Towards more sustainable social housing projects: recognizing the importance of using local resources. Building and Environment, v. 127, p. 187-203, 2018.

[3] SILVA, A. G.; BRANDAO, N. N. C. M. Diagnóstico da produção e descarte de resíduos de pedras ornamentais em uma marmoraria na cidade de padre Paraíso – MG. Monografia (Especialização), Faculdades Unificadas de Teófilo Otoni, Teófilo Otoni, 52 p., 2015.

[4] ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. (ANEPAC). Mercado. 2024. Disponível em: https://anepac.org.br/mercado/. Acesso em: 11/05/2024.

[5] ANDRIOLO, F. R. Usos e abusos do pó de pedra em diversos tipos de concreto. In: Seminário: O uso da fração fina da britagem. II SUFFIB, São Paulo, 2005. Anais, São Paulo, EPUSP, 2005.

[6] SCHUMACHER, H. R. S. P. Caracterização do concreto convencional com pó de pedra em substituição parcial a areia natural. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2007

[7] MARTINS, M. P. Caracterização do pó de pedra de gnaisse para produção de concreto. p. 1241-1244. In: 70º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, 2015.

[8] SCHANKOSKI, R. A. et al. Avaliação da reologia de concretos autoadensáveis contendo fílers de britagem. Revista Materia, v. 22, n. 2, 2017.

[9] SCHANKOSKI, R. A. et al. Fresh and hardened properties of self-compacting concretes produced with diabase and gneiss quarry by-product powders as alternative fillers. Construction and Building Materials, v. 224, p. 659–670, 2019.

[10] CHEN, Z. et al. Utilization of gneiss coarse aggregate and steel slag fine aggregate in asphalt mixture. Construction and Building Materials, v. 93, p. 911–918, 2015.

[11] YANNICK, T. L. *et al*. Properties of waste gneiss powder used to design eco-friendly cement mortar. JMST Advances, v. 6, p. 1–21, 2024.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: ABNT NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência, Rio de Janeiro, 2016.

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

[14] ____ ABNT NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de provas prismáticos, Rio de Janeiro, 2010.

[15] ____ ABNT NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2005.

[16] ____ ABNT NBR 9204: Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrico-volumétrica — Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2012.

[17] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G57: Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. West Conshohocken, 2006. 5p.

[18] SANJUÁN, M. Á. et al. Carbon dioxide uptake by cement-based materials: A spanish case study. Applied Sciences (Switzerland), v. 10, n. 1, 2020.

[19] MADDALENA, R.; ROBERTS, J. J.; HAMILTON, A. Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. Journal of Cleaner Production, v. 186, p. 933–942, 2018.

[20] HABERT, G. et al. Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes. Cement and Concrete Composites, v. 38, p. 1–11, 2013.

[21] Flower, D.J.M.; Sanjayan, J.G. Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture. In: Flower, D.J.M.; Sanjayan, J.G. Handbook of low carbon concrete. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2017. Capítulo 12, p. 1-16.

[22] SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul. Ambiente Construído, v. 16, n. 2, p. 35–49, 2016.

[23] NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto; Trad. CREMONINI, R. A. 5. ed. São Paulo, Bookman, 2016.

[24] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB Bull 192:: Diagnosis and

[25] assessment of concrete structures — state of the art reportLausanne, 1989.MARVILA, M. T. et al. Estudo da capilaridade para argamassas de múltiplo uso. Anais. Assosiação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. v. 72, p. 2572–2578, São Paulo, 2017.

[26] LAYSSI, H. et al. Electrical resistivity of concrete. Concrete International, v. 37, n. 5, p. 41–46, 2015.

[27] HORNBOSTEL, K.; LARSEN, C. K.; GEIKER, M. R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate - A literature review. Cement and Concrete Composites, v. 39, p. 60–72, 2013.

[28] HABERT, G. et al. Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes. Cement and Concrete Composites, v. 38, p. 1–11, 2013.

[29] AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO: TP 95. Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. 2014.

[30] BALESTRA, C. E. T., et al. Evaluation of chloride ion penetration through concrete surface electrical resistivity of field naturally degraded structures present in marine environment. Construction and Building Materials, 230, 116979. 2020.

[31] MEDEIROS, R. A.; LIMA, M. G. Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement. Construction and Building Materials, v. 107, p. 11–16, 2016.