ENARC
FOZ DO IGUAÇU-2023

Estudo de argamassas estruturais com adição de sílica ativa proveniente de resíduos siderúrgicos dosada por empacotamento de partículas

Study of structural mortars with the addition of silica fume from steel waste dosed by particle packing

Abner Araújo Fajardo
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG | Belo Horizonte, Minas Gerais | Fajardo.aabner@gmail.com

Dayana Cristina Silva Garcia
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG | Belo Horizonte, Minas Gerais | dayanacsgarcia@gmail.com

Silvia Roberta Souza
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG | Belo Horizonte, Minas Gerais | roberta.souzar@hotmail.com

Fernando C.R. Almeida
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG | Belo Horizonte, Minas Gerais | fernando@demc.ufmg.br

Zharry Ribeiro Bueno
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG | Belo Horizonte, Minas Gerais | zharryrbueno@hotmail.com

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

Jordana Gonçalves de Macedo
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG | Belo Horizonte, Minas Gerais | jordanagdmacedo@gmail.com

Maria Teresa Barbosa
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF | Juiz de Fora, Minas Gerais | teresa.barbosa@ufjf.br

Vinicius Ferreira Lanna
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG | Belo Horizonte, Minas Gerais | vferreiralanna@gmail.com

White José dos Santos
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG | Belo Horizonte, Minas Gerais | White.santos@demc.ufmg.br

Resumo

Avaliou-se a inserção de sílica ativa, proveniente de resíduos de siderurgias, nas propriedades mecânicas, físicas, de durabilidade e de microestrutura de uma argamassa estrutural de alto desempenho. O traço das argamassas foi elaborado por meio do empacotamento de partículas. Foram avaliadas as seguintes propriedades das argamassas: resistências à compressão e tração na flexão, absorção de água por capilaridade e por imersão, porosidade, módulo de elasticidade dinâmico, resistividade elétrica, termogravimetria e microscopia eletrônica de varredura. As propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade foram mais influenciadas nas primeiras idades pelo cimento e nas idades maiores pela sílica ativa. A dosagem pelo empacotamento de partículas promoveu uma maior densificação da matriz aumentando as propriedades mecânicas e ampliando a durabilidade, possibilitando a geração de argamassas de alto desempenho. Conclui-se que a sílica ativa influencia na evolução das propriedades analisadas e precisa ser considerada no desenvolvimento dos traços de argamassas de alto desempenho.

Palavras-chave: Sílica ativa; Resíduo siderúrgicos; Argamassas estruturais; Argamassas de alto desempenho; Compósitos cimentícios com resíduos.

ABSTRACT

The insertion of silica fume, from steelworks residues, was evaluated on the mechanical, physical, durability and microstructure properties of a high-performance structural mortar. The mortars mixtures was elaborated through the packaging of particles. The following mortar properties were evaluated: compressive and flexural strength, water absorption by capillarity and by immersion, porosity, dynamic modulus of elasticity, electrical resistivity, thermogravimetry and scanning electron microscopy. The mechanical, physical and durability properties were more influenced at early ages by cement and at older ages by silica fume. Dosing by particle packing promoted greater matrix densification, increasing mechanical properties and extending durability, enabling the generation of high-performance mortars. It is concluded that silica fume influences the evolution of the analyzed properties and needs to be considered in the development of high performance mortar mixtures.

Keywords: Sílica fume; Steel waste; Structural mortars; High performance mortars; Cement composites with waste

1 INTRODUÇÃO

Os materiais cimentícios suplementares são primordiais na produção dos concretos e argamassas estruturais atuais (ALMADA *et al*. 2023; LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011). Assim, identifica-se o uso de vários materiais para esta finalidade, por exemplo: cinzas volantes, resíduos de vidro, escórias de alto-forno, resíduos de rochas ornamentais, cinzas de alguns produtos agrícolas (KHATTAB *et al*., 2021). Neste contexto, se insere a sílica ativa que pode ser obtida como resíduo do processo de fundição na indústria de silício e ferrosilício (KHATTAB *et al*., 2021). Durante o processo de redução, uma parte do gás monóxido de silício (Si-O) escapa pela carga do forno com gases residuais. É então oxidado ao ar, resfriado em temperatura ambiente e separado por filtros eletrostáticos ou mangas filtrantes. Pode ter entre 75% e 95% de sílica não cristalina (amorfa) (SIDDIQUE, CHAHAL, 2011).

A sílica ativa é usada como pozolana para melhorar as propriedades de concreto e argamassas estruturais como resistência mecânica e durabilidade (KHATTAB *et al*., 2021). Com a redução da permeabilidade, há proteção do aço contra a corrosão (KIM *et al*., 2011). É importante realizar estudos sobre a avaliação das propriedades mecânicas, físicas e de microestrutura da ação da sílica ativa ao longo da idade de argamassas estruturais de alta resistência, para entender o seu comportamento ao longo do tempo.

Deste modo, este artigo avalia a inserção de sílica ativa proveniente de resíduos de siderurgias para produção de argamassas estruturais de alta resistência, sob um estudo do seu comportamento, em relação ao efeito do empacotamento de partículas de modo a promover a maximização do uso e avaliar as propriedades mecânicas, físicas, de durabilidade e de microestrutura de uma argamassa estrutural de alto desempenho.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os materiais utilizados neste trabalho foram: cimento CPV-ARI, sílica ativa areia normal (fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas -IPT), aditivo superplastificante (polímeros policarboxilatos, com a densidade de 1,12kg/L) e água potável. A sílica ativa obtida é proveniente do processo de fabricação do silício metálico e ferro silício captada em filtros manga. Em razão de solicitação da empresa, seus nomes e suas respectivas localizações foram omitidos.

As características dos materiais foram avaliadas quanto às suas características físicas como: distribuição do tamanho das partículas feito por granulômetro por difração a laser e massa específica por picnometria em gás hélio; e as químicas por fluorescência de raios-X (FRX), com fusão de tetraborato de lítio e perda ao fogo (LOI) por calcinação da amostra à 1000ºC.

Para a dosagem das argamassas, utilizou o software de empacotamento de partículas, Elkem Materiais Mixture Analyzer (EMMA). Por meio do EMMA foi possível elaborar os cálculos para encontrar as curvas de empacotamento experimentais. 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 (ALMADA *et al*. 2023; PINTO *et al*, 2021; RAUL *et al*, 2021).

Após a definição do traço dos materiais secos, o teor de água e aditivo superplastificante foram determinados. Para isso, foi utilizado o espalhamento na (*Flow table*) (ABNT NBR 13276, 2016) com 23±1cm.

Utilizou-se a betoneira para misturar os corpos de prova, em seguida utilizou-se a mesa vibratória para o adensamento. Para o processo de cura, deixou os corpos de prova submerso em água. Após a cura, foram determinadas a resistência à compressão (5 corpos de prova cúbicos - 5x5x5 cm^3) (CEN EN 12390-3, 2009); resistência à tração na flexão (3 corpos de prova prismáticos - 4x4x16 cm^3) (CEN EN 12390-3, 2009); absorção de água por capilaridade (4 corpos de prova cilíndricos - θ5x10 cm^2)(ABNT NBR 9779, 2012); absorção de água por imersão, porosidade e massa específica (ABNT NBR 9778, 2009); módulo de elasticidade dinâmico (ASTM C215, 2008) foi obtido pelo método de frequência ressonante forçada no modo longitudinal; resistividade elétrica superficial (corpo de prova cilíndrico de Ø10x20 cm) (ABNT NBR 9204, 2012) e; TGA (Thermogravimetric Analysis) e pela DTA (Differential Thermal Analysis) com cadinho de Alumina e atmosfera de nitrogênio 50 [$ml.min^{-1}$]. Para a avaliação da hidratação do compósito, moldou-se um corpo de prova cúbico (5x5x5 cm^3) pastas. Nas mesmas condições de adensamento daqueles utilizados no ensaio de compressão, com o objetivo de manter as características das argamassas, fazendo com que a

comparação seja mais fidedigna. Após a cura, os corpos de prova foram cortados em serra de disco diamantado, extraindo-se da região interna amostras de dimensões aproximadamente (1x1x1) cm³ para fazer as imagens de MEV-EDS. Identificou-se os elementos, via mapeamento químico com detector EDS.

3 RESULTADO E ANÁLISES

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A granulometria da sílica ativa e do cimento (Quadro 1) demonstra que a primeira é mais fina com o cimento, como esperado, todavia, acredita-se que exista uma faixa ainda mais finas (menor que 1 µm) que não possa ser detectada pelo granulômetro. A sílica ativa é também mais leve (30% menor) e assim a dosagem por meio do empacotamento tende ser mais adequada para dimensionar da proporção destes materiais, uma vez que considera o volume ocupado pelas partículas na matriz. A massa específica de 2,20 g/cm³ foi a mesma encontrada por Wu *et al*, (2016).

Quadro 1- Propriedades físicas dos materiais

Característica		Sílica ativa	Cimento
Granulometria (µm)	D_{10}	3,76	7,30
	D_{50}	13,74	28,00
	D_{90}	24.41	47,00
Massa Específica (g/cm³)		2,200	3,122

Quanto a composição química (Quadro 2), constata-se que o material é composto predominantemente por SiO_2, contudo tem também taxas consideráveis de Fe_2O_3 e Al_2O_3, sendo que materiais pozolânicos podem ter alumínio.

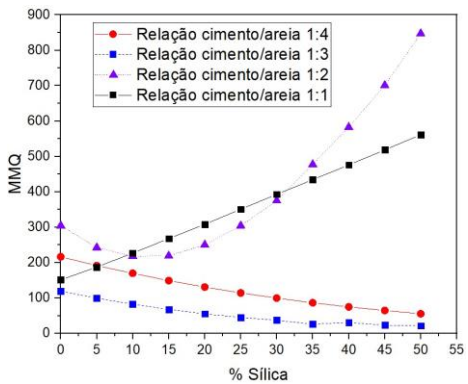
Quadro 2 - Composição química dos materiais.

Material	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	P_2O_5	Na_2O	K_2O	MnO	SO_3	LOI
Sílica ativa	13,60	61,00	11,30	3,44	1,86	0,91	0,36	0,70	2,31	0,26	-	5,27
Cimento	3,08	18,20	4,37	60,9	0,60	0,24	0,25	0,15	0,68	0,07	3,96	6,62

3.2 DOSAGEM POR EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Na Figura 1 estão apresentados os dados obtidos pelo empacotamento de partículas. Para isso utilizou-se os resultados obtidos por meio do método dos mínimos quadrados (MMQ). O traço que apresentou um dos melhores (menores) resultados de MMQ, foi o traço de 1:3 (cimento/areia) (Figura 1). Embora os resultados de MMQ com os teores de 30% a 50% apresentaram um MMQ melhor, em razão da trabalhabilidade optou-se por escolher o teor de 25% de sílica ativa, uma vez que Sahoo *et al*., (2019) e Bhanja e Sengupta, (2005) também utilizaram 25% de sílica ativa em suas pesquisas.

Figura 1 - Resultados dos MMQ da relação de cimento/areia em relação a sílica ativa.

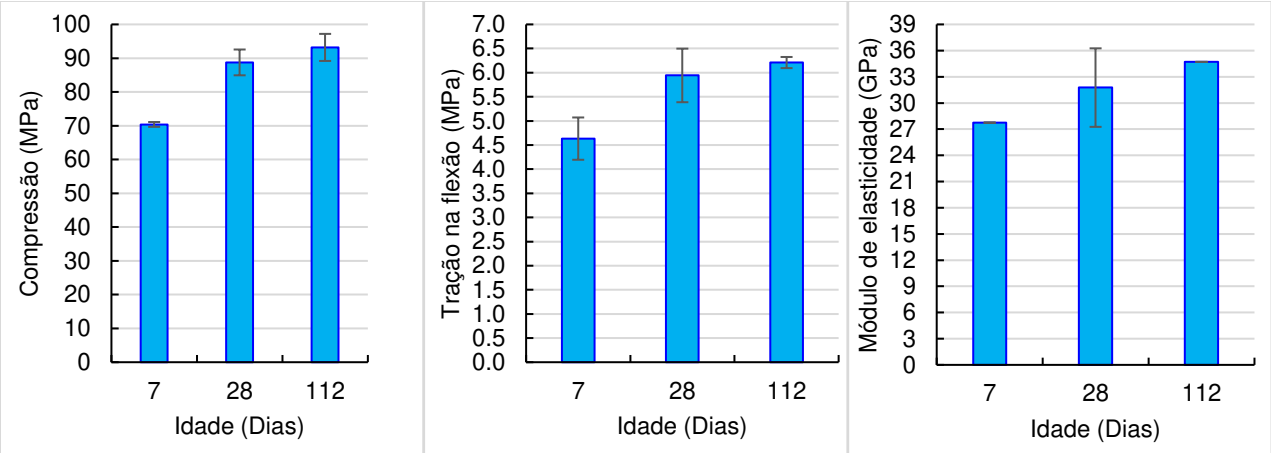


Após o programa fornecer a curva e a quantidade de cada materiais, realizou-se o ajuste experimental do traço, pela medição de consistência de 260±15 mm, definindo os teores de água e aditivo superplastificante. Fixou-se o teor de água em 0,375 e encontrou-se o teor de 2% de aditivo superplastificante.

3.3 PARÂMETROS FÍSICOS E DE DURABILIDADE DAS AMOSTRAS

Quanto aos parâmetros mecânicos, pode-se destacar (Figura 2) o aumento da resistência à compressão mais elevado até os 28 dias (26,08%), sendo bem menor entre 28 e 112 dias (5,00%). Este resultado foi similar ao da tração na flexão (aumento de 28,27% e 4,49% respectivamente). O valor da resistência à compressão de 28 dias, 88,76 MPa foi superior aos valores de 71,50 MPa (BHANJA E SENGUPTA, 2005) e 46 MPa (SAHOO *et al*, 2019), encontrado na bibliografia. Similar a resistência à tração na flexão, que para 28 dias, 5,94 MPa foi superior aos valores 5,27 MPa (BHANJA E SENGUPTA, 2005) e 3,64 MPa (SAHOO *et al*, 2019). Um dos motivos para o aumento da resistência mecânica, pode ser devido ao empacotamento de partículas, e nas primeiras idades a sílica ativa atuar como uma gente nucleante e depois como pozolana.

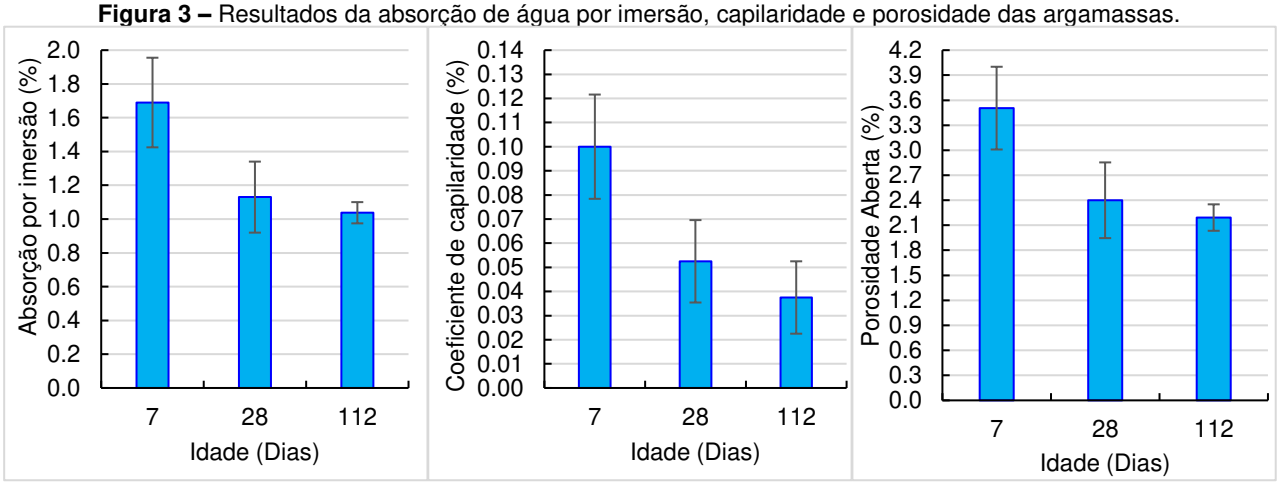
Figura 2 – Resultados da compressão, tração na flexão e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas.



Observa que as argamassas se comportam como de alta resistência (acima de 50 MPa) e assim apresentam elevados valores de Módulo de elasticidade dinâmico. Todavia, a variação do módulo de elasticidade dinâmico foi mais discreta com um aumento de 14,48% entre 7 e 28 dias e de 9,27% entre 28 e 112 dias. Ou seja, a densificação na matriz aumentou de forma mais homogênea, demonstrando que o CPV reagiu mais até 28 dias e que a partir desta data os ganhos foram provenientes da sílica ativa.

Em relação os indicadores de durabilidade, ressalta-se inicialmente os baixos valores detectados, demonstrando se tratar de uma argamassa de alto desempenho. Quanto aos valores em si, detecta-se uma queda de 33,14% na absorção de água por imersão entre 7 e 28 dias. Valor próximo a queda de porosidade constatada (31,53%). Isto demonstra que as reações da sílica ativa junto ao cimento fecharam os poucos poros existes o que é corroborado pelos resultados entre 28 e 112 dias que demonstram uma redução de 8,65% na porosidade e 8,19% na absorção. Isto ocorre devido ao refino da microestrutura, aumentando a durabilidade do material (KAREIN *et al.*, 2017).

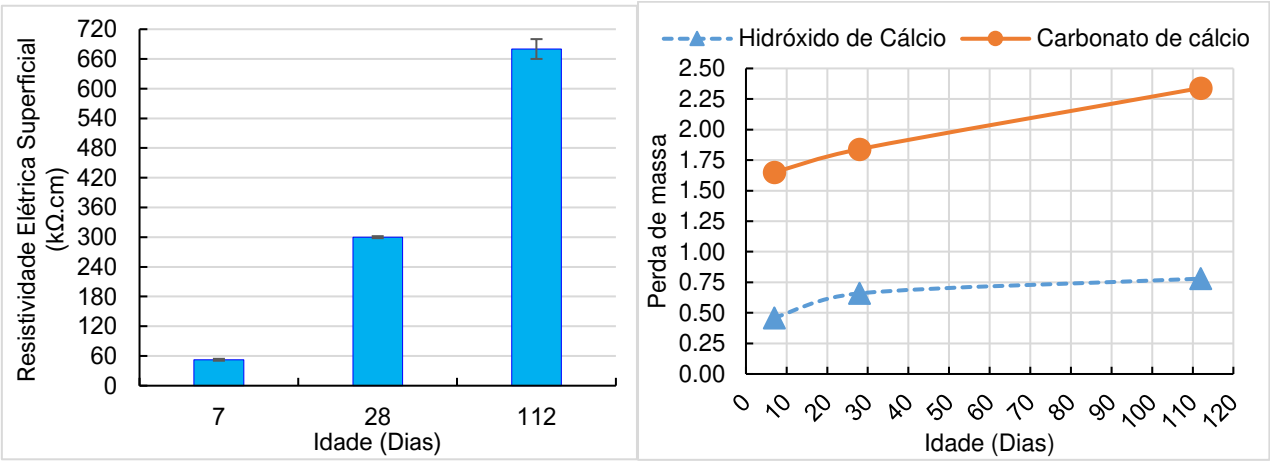
Figura 3 – Resultados da absorção de água por imersão, capilaridade e porosidade das argamassas.



A redução detectada na absorção de água por imersão e na porosidade pode ser identificada também no coeficiente de capilaridade, no qual pode-se detectar uma queda de 47,50% entre 7 e 28 dias e de 28,57% entre 28 e 112 dias. Corroborando com a reação da sílica ativa fechando os poros ou sua conectividade.

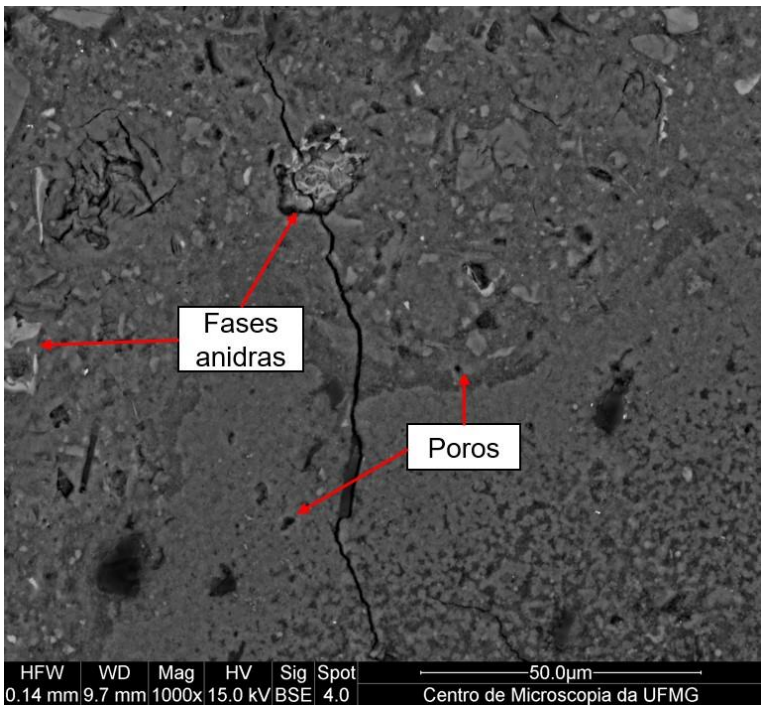
Pela análise da termogravimetria (Figura 4) é perceptível o encontro de valores baixos de perda de massa, tanto na faixa de temperatura referente ao hidróxido de cálcio quando do Carbonato de cálcio. Isto demonstra a colmatação dos poros pela atividade pozolânica. O que corrobora com os resultados atuais (porosidade, absorção) e com o aumento da resistividade elétrica (728,33% entre 7 e 28 dias e 126,67% entre 28 e 112 dias) tornando a argamassa de alta durabilidade. A resistividade elétrica superficial de 28 dias, 300 kΩ.cm foi bem superior a 47,5 kΩ.cm (KAREIN *et al.*, 2017), estando na faixa caracterizada como insignificante quanto ao potencial de corrosão (BALESTRA *et al.,* 2020).

Figura 4 – Resultados da resistividade elétrica superficial e perda de massa na termogravimetria das argamassas.



Imagens da microestrutura (Figura 5) corroboram com os resultados mecânicos e indicadores de durabilidade. Uma vez que se constatou um baixo teor de índice de poros e das fases anidras. Assim sendo, apresentando uma microestrutura compacta aumentando as propriedades mecânicas e de durabilidade, corroborando com Rostami e Behfarnia (2017). A trinca na imagem é devido a preparação da amostra. O processo de mistura maior (para ativação do aditivo superplastificante) gerou uma adequada dispersão dos materiais convergindo para uma matriz mais homogênea.

Figura 5 – Microestrutura da matriz (cimento, sílica ativa).



4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados deste estudo, pode-se observar que a argamassa atingiu bons resultados mecânicos com valores de alta resistência à compressão (93 MPa), à tração na flexão (6,21MPa). Similarmente teve-se os resultados de durabilidade elevados com baixos valores para absorção de água por imersão (1,04%) e porosidade aberta (2,19%) e alto valores de resistividade elétrica superficial (680 kΩ.cm) com baixo potencial de corrosão. Observou-se baixos valores de perda de massa na termogravimetria e uma microestrutura densa, com poucos poros e mais homogênea, próprios de argamassas de alta resistência.

Conclui-se que as propriedades mecânicas, físicas, de durabilidade e microestruturais foram mais influenciadas nas primeiras idades pelo cimento e nas idades maiores pela sílica ativa. A presença da sílica ativa dosada pelo empacotamento de partículas promoveu uma maior densificação da matriz aumentando as propriedades mecânicas e ampliando a durabilidade, possibilitando a geração de argamassas de alto desempenho. A presença da sílica ativa obtido do processo de fabricação do silício metálico e ferro silício influencia na evolução das propriedades analisadas e precisa ser considerada nos desenvolvimentos dos traços, sobretudo para argamassas de alto desempenho. O uso do software para estudo do empacotamento foi importante e otimizou a parte experimental da pesquisa.

5 AGRADECIMENTOS

A equipe de pesquisa agradece às agências de fomento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio prestado a este estudo.

REFERÊNCIAS

ALMADA, B. S.; Silva Neto, G. A.; Prado, D. F.; Aguilar, M. T. P.; Garcia, D. C. S.; Silva, G. J. B.; Santos W. J. Evaluation of the microstructure and micromechanics properties of structural mortars with addition of iron ore tailings. **Journal of Building Engineering**. v. 63, n. A, 105405. ISSN 2352-7102. 2023. Doi. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105405.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **ABNT NBR 9204**: Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrico-volumétrica — Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **ABNT NBR 9779**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão, Rio de Janeiro, 2012.

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, 2005.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **ABNT NBR 10007**: Amostragem de Resíduos sólidos – Rio de janeiro, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM C215-19**: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

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. Doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116979

BHANJA, S.; SENGUPTA, B. Influence of silica fume on the tensile strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 743–747, 2005. Doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.024

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

KHATTAB, R.M.; SADEK, H.E.H.; TAHA, M. A.; EL-RAFEI, A. M. Recycling of silica fume waste in the manufacture of β-eucryptite ceramics. **Materials Characterization**. v. 171, 110740. 2021. doi: https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110740.

KIM, Y. H.; JANG, S. H.; KIM, Y. W. Joining of silicon carbide ceramics using a silicon carbide tape. **International Journal of Applied Ceramic Technology**. v. 93, n. 10. 2010. Doi: https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03867.x.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. Cement and Concrete Research, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011. Doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001

MOTAHARI KAREIN, S. M. *et al*. A new approach for application of silica fume in concrete: Wet granulation. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 573–581, 2017.
Doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.132PINTO, F. B. et al. Mixture design for self-compacting concrete using a virtual particle packing method Projeto de mistura para concreto autocompactante usando um método de embalagem virtual de partículas. **Brazilian Journal of Development,** v. 7, n. 5, p. 50029–50049, May, 2021. Doi: https://doi.org/10.34117/bjdv7n5-415

ROSTAMI, M.; BEHFARNIA, K. The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 262–268, 2017. Doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.072

SAHOO, K. K.; SARKAR, P.; DAVIS, R. Mechanical properties of silica fume concrete designed as per construction practice. **Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials**, v. 172, n. 1, p. 20–28, 2019. Doi: https://doi.org/10.1680/jcoma.16.00085

SIDDIQUE, R.; CHAHAL, N. Use of silicon and ferrosilicon industry by-products (silica fume) in cement paste and mortar. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 55, n. 8, p. 739-744. 2011. Doi: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.004.

RAUL, B.A.S; MANOEL, M.B.N; VANESSA, A.F.M, B. et al. **Aplicação do software EMMA na análise do empacotamento máximo de partículas utilizando o Metacaulim**. In: XVII Congresso Internacional sobre patologia e reabilitação de construções, 2021, Fortaleza. v. 1, p. 779–786, 2022. Disponível em: http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/CINPAR.2021.098.

WU, Z.; SHI, C.; KHAYAT, K. H. Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC). **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 97–109, 2016. Doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.005.