
Análise microestrutural de argamassas com agregados alternativos de areia de descarte de fundição e isoladores elétricos de porcelana

Microstructural analysis of mortars with alternative aggregates of foundry waste sand and porcelain electrical insulators

Marco Antonio Campos^{1*}, Luciano Passos², André Munhoz de Argollo Ferrão², Armando Lopes Moreno Júnior²

RESUMO

O uso de materiais alternativos e reciclados em argamassas resulta em benefícios não apenas à construção civil, mas para toda a sociedade, pois estes materiais não serão descartados na natureza. Os setores metalúrgico e cerâmico são responsáveis por considerável descarte de materiais, caso da areia de descarte de fundição, metalúrgico, e dos isoladores elétricos de porcelana, cerâmico. A caracterização física e química destes materiais permite de início sua utilização na construção civil em substituição aos agregados comuns. Portanto, este trabalho estudou as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade, nas idades iniciais, de argamassas com diferentes teores e combinações de areia de fundição e isoladores de porcelana substituindo o agregado miúdo comum. Os resultados de resistência à compressão simples aliados a análise microestrutural de seus compostos atestam a utilização da areia de fundição e dos isoladores de porcelana em substituição a areia em argamassa.

Palavras-chave: Argamassa; Areia de fundição; Isolador de porcelana; Reciclagem; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The use of alternative and recycled materials in mortars results in benefits for society as a whole, because these materials will not be discarded in nature. The metallurgical and ceramic sectors are responsible for considerable disposal of materials such as foundry sand, metallurgical and porcelain electrical insulators, ceramics. The physical and chemical characterization of these materials allows their use in civil construction to replace common aggregates. So, this work studied the physical, mechanical and durability properties, in the early stages, of mortars with different combinations of foundry sand and porcelain insulators replacing the common fine aggregate. The results of simple compressive strength allied to the microstructural analysis of its composites attest to the use of foundry sand and porcelain insulators as a substitute for sand in mortar.

Keywords: Mortar; Foundry sand; Porcelain insulator; Recycling; Sustainability.

¹ Consultor em Engenharia Civil e em Materiais de Construção Alternativos.

*E-mail: engenheiro marcoantonio@hotmail.com

² Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas – FECFAU-UNICAMP.

INTRODUÇÃO

As pesquisas acadêmicas na área de materiais de construção procuram, muitas vezes, aplicar materiais provenientes de resíduos ou de descarte substituindo, em especial, os agregados miúdo e graúdo, e o cimento em argamassas, concretos e em subprodutos. Os resíduos da indústria cerâmica, isoladores elétricos de porcelana – IEP, e da indústria metalúrgica, areia de decarte de fundição – ADF, são materiais com potencialidade para esta aplicação visto que pesquisas anteriores já comprovaram sua utilização.

Entretanto, a realização de novas pesquisas e ensaios são ideais para que os mesmos possam ser utilizados na construção civil reduzindo o passivo do seu descarte, resultando em benefícios, para seus setores produtivos nos campos financeiro, com a geração de renda a partir de seu beneficiamento e comercialização, e ambiental, com a redução do descarte na natureza.

Ambos os materiais utilizados nesta pesquisa não têm uma metodologia de reaproveitamento difundida e aplicada em escala comercial no país, mas que deveria ser considerada. A areia de decarte de fundição é um material com grande volume gerado e que contém na sua composição areia, argila, carvão e material fino, que após a queima em altas temperaturas possui uma potencial atividade pozzolânica.

Compreendendo um descarte médio de aproximadamente 85% da geração de materiais fundidos, a produção nacional da indústria de fundição foi da ordem de 2,50 milhões de toneladas, incluindo peças em ferro fundido, aço e metais não ferrosos, apenas para o ano de 2021 tem-se aproximadamente 2,1 milhões de toneladas de ADF (ABIFA, 2021).

Aliando sua composição com o grande volume gerado, outro ponto pró-utilização da ADF refere-se ao elevado custo de descarte em aterros sanitários, por este motivo muitas indústrias de fundição acabam por armazenar em seus pátios esta areia pois não há, nas imediações, aterro para receber este resíduo além da inviabilidade financeira do descarte. Deve-se na inicial classificar o tipo de areia de fundição e com isso destinar e reaproveitar a ADF na construção civil ou em outro setor industrial (CHEGATTI, 2016; ABIFA, 2018).

Os isoladores de porcelana possuem um passivo inferior a areia de fundição, estima-se que a produção anual dos IEP é da ordem de 30.000 toneladas, por este motivo é possível que uma metodologia de reaproveitamento das peças do controle de qualidade fabril e de substituição não foi até o momento aplicada pelas cerâmicas produtos e pelos setores de utilização, como as concessionárias elétricas (CAMPOS, 2018).

Pesquisas anteriores comprovam a utilização da areia de fundição e dos isoladores de porcelana na construção civil, sendo assim um indicador para a continuidade de estudos. Por este motivo e a partir do trabalho de Campos *et al.* (2018), o qual os resultados nas propriedades

mecânicas indicaram uma potencialidade de combinação de agregados de ADF e IEP em argamassas a verificação da formação dos produtos de hidratação através da análise microestrutural é válida.

Portanto, o objetivo geral deste trabalho foi elaborar uma argamassa de referência, com 100% de agregado miúdo comum, areia, e comparar sua resistência à compressão simples, aos 7 e 28 dias, e a formação dos produtos de hidratação através da análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV), aos 28 dias de idade, em argamassas contendo 100% de areia de descarte de fundição (ADF), 100% de isoladores elétricos de porcelana (IEP) e combinações de 1/3 de ADF e 2/3 de IEP, 2/3 de ADF e 1/3 IEP.

Os ensaios de resistência mecânica indicam que quanto maior o teor de areia de descarte de fundição menores foram seus resultados, ao passo que as argamassas com maiores quantidades de isoladores de porcelana apresentaram resistência próxima ao traço de referência. Na análise microestrutural foram identificados os mesmos compostos, não influenciando o agregado no processo de hidratação.

Através desta análise conclui-se na inicial a potencialidade da utilização de agregados de areia de descarte de fundição e de isoladores elétricos de porcelana em substituição total ou combinada do agregado miúdo comum, areia, em argamassas, podendo com a aplicação em escala comercial contribuir para a diminuição do volume de descarte destes resíduos.

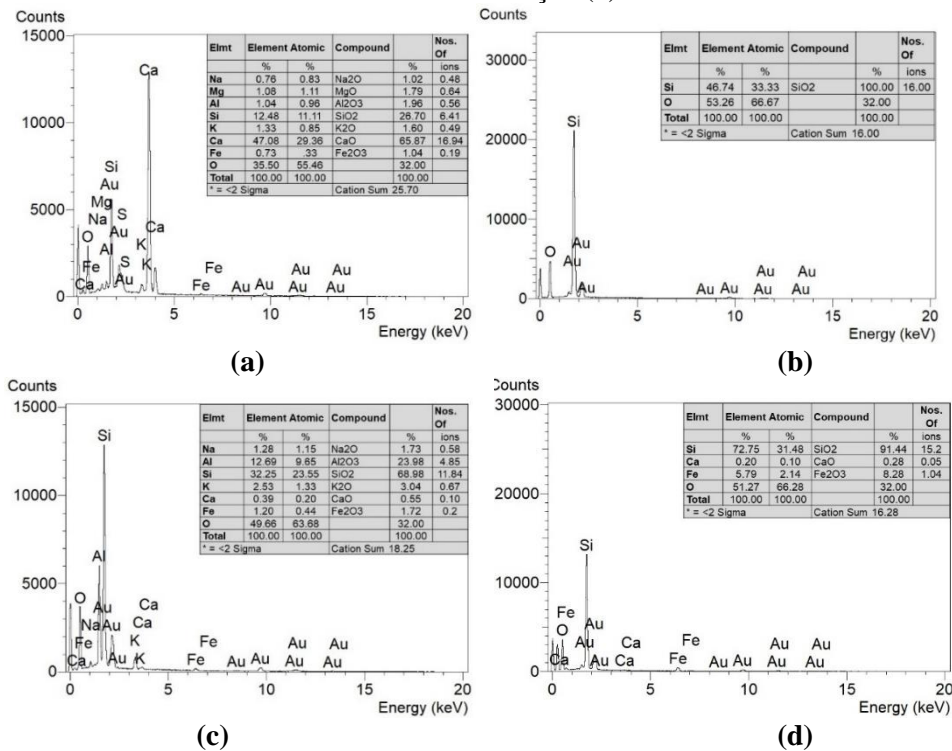
MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste trabalho foram caracterizados inicialmente em relação a sua composição através dos ensaios de MEV/EDS: cimento Portland CPV-ARI – Alta Resistência Inicial, Figura 1 (a); Agregado miúdo comum, areia média, Figura 1 (b); Agregado miúdo de isolador elétrico de porcelana (IEP), Figura 1(c); Agregado miúdo de areia de descarte de fundição (ADF), Figura 1 (d).

Os isoladores elétricos de porcelana utilizados na pesquisa foram obtidos através do controle de qualidade fabril antes da aplicação do material cimentante para a fixação da haste, portanto, eram apenas corpos de porcelana. Foram fornecidos moídos por uma indústria cerâmica da cidade de Pedreira, interior de São Paulo.

A areia de descarte de fundição foi proveniente de uma indústria de bombas centrífugas mono e multiestágio, localizada no município de Itapira, interior do estado de São Paulo, a qual forneceu o material com a granulometria utilizada nesta pesquisa. Para ambos materiais alternativos, ADF e IEP, como foram fornecidos moídos e pronto para utilização não foi possível identificar o tipo de fonte utilizada, como o tipo de isolador ou o tipo de peça de fundição produzida.

Figura 1 - EDS Cimento Portland CPV-ARI (a), Areia (b), Isolador de porcelana (c), Areia de descarte de fundição (d).



Fonte: Elaboração dos autores, 2022

Tabela 1 – Caracterização dos agregados miúdos.

Ensaio	Areia média	Areia de Fundição	Isolador de Porcelana
Composição Mineralógica	Inócuos: quartzo, minerais máficos	Areia de quartzo fina, moldagem de peças de ferro	Isoladores elétricos de porcelana: argila, feldspato e quartzo
	Friáveis: fragmentos de rocha alterada		
Grau de Esfericidade	Alta	Alta	Alta
Grau de Arredondamento	Subarredondado	Arredondada	Subanguloso
Superfície do Grão	Fosco	Fosco	Fosco
Módulo de Finura	2,7	1,34	1,16
Dimensão Máxima (mm)	1,2	1,2	0,6
Massa Específica (g/cm ³)	2,6	2,33	2,43
Massa Unitária (g/cm ³)	1,48	1,52	1,41
Absorção de Água (%)	0,19	0,50	0,05
Torrões de Argila e Materiais Friáveis (%)	0	0	0
Teor de Material Passante na Peneira 75 µm (%)	2,85	4,08	4,75

Fonte: Campos *et al.* (2018)

Observa-se o grande teor de silício (Si), em todos os agregados. Este silício combina com o oxigênio formando o dióxido de silício, sílica (SiO_2), que é de extrema importância para hidratação do cimento e consequente aumento de resistência, quando em conjunto com o CaO, presente no cimento, na formação do composto C-S-H (CAMPOS *et al.*, 2018). Os agregados miúdos, comum e alternativos, têm suas propriedades e características apresentadas na Tabela 1.

A Tabela 2 ilustra as quantidades de materiais necessárias para moldar quatro corpos-de-prova cilíndricos de argamassa de 5,0x10,0 cm em atendimento a NBR 7215 (1996), norma que também preconizou o processo de moldagem.

O traço da argamassa é de 1:3:0,55 (cimento:agregado miúdo:água) e a relação água-cimento foi fixada em 0:55 para todos os traços. A cura foi do tipo submersa, isto é, os corpos-de-prova, após a desmoldagem, foram mantidos submersos em água até 24 horas antes de sua ruptura.

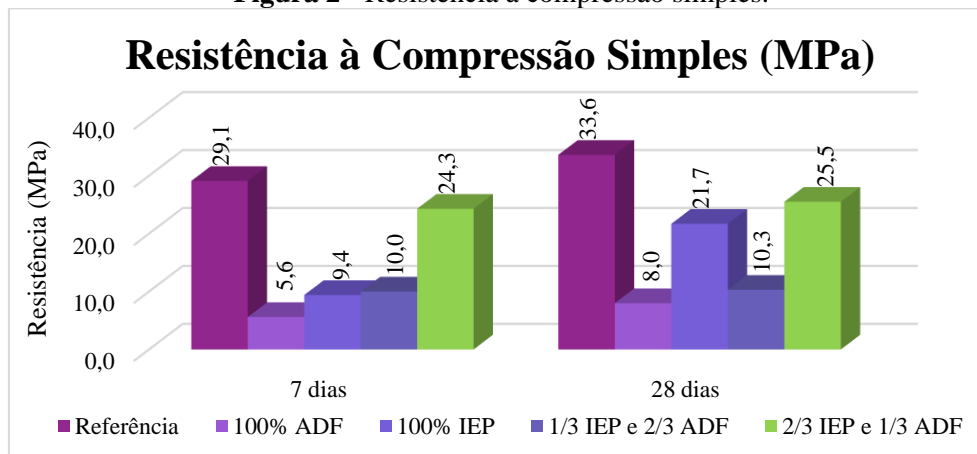
Tabela 2 - Quantidade de materiais em gramas para os traços de argamassa.

Traço	Cimento Portland	Agregado miúdo	Areia ADF	Areia IEP	Água
Referência	624,00	1.872,00	-	-	343,20
100% Areia ADF	624,00	-	1.872,00	-	343,20
100% Areia IEP	624,00	-	-	1.872,00	343,20
1/3 IEP e 2/3 ADF	624,00	-	1.248,00	624,00	343,20
2/3 IEP e 1/3 ADF	624,00	-	624,00	1.248,00	343,20

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os traços de argamassa foram ensaiados à resistência à compressão simples nas idades de 7 e 28 dias, figura conforme a NBR 7215 (1996). Na Figura 2 tem-se a representação em gráfico dos valores médios destas resistências.

Figura 2 - Resistência à compressão simples.



Fonte: Adaptado Campos *et al.* (2018)

Observa-se em todas as idades que o traço de argamassa referência, isto é, com 100% do agregado miúdo comum, areia, apresentou carga de ruptura superior aos traços com agregados alternativos, devido entre outros fatores o melhor empacotamento dos grãos de areia, a não presença da areia de descarte de fundição (ADF) e uma atividade pozolânica tardia dos isoladores elétricos de porcelana (IEP).

Para a idade inicial, 7 dias, o traço 100% ADF apresentou resistência 80% inferior a argamassa de referência. Para os demais traços esta diferença foi menor com 67% inferior para a argamassa 100% IEP, 65% para o traço 1/3 IEP e 2/3 ADF, e 16% para a argamassa 2/3 IEP e 1/3 ADF.

Aos 28 dias esta tendência se repetiu, pois novamente a argamassa de referência atingiu a maior carga de ruptura à compressão simples. Ocorreu uma grande evolução de resistência para o traço 100% IEP, atribuída a uma atividade pozolânica tardia das partículas de menor granulometria da porcelana.

As combinações de areia de descarte de fundição e isoladores elétricos de porcelana tiveram sua hidratação nas primeiras idades, pois apresentou uma pequena elevação entre 7 e 28 dias. Nestas condições os índices, em comparação a referência, foram inferiores a 76% para o traço 100% ADF, 35% para a argamassa 100% IEP, 70% para o traço 1/3 IEP e 2/3 ADF, e de 24% para a argamassa 2/3 IEP e 1/3 ADF.

A evolução da resistência entre as idades ensaiadas foi de 15% para o traço referência, 43% para a argamassa 100% ADF, 130% para o traço 100% IEP, 3% para a argamassa 1/3 IEP e 2/3 ADF e de 5% para o traço 2/3 IEP e 1/3 ADF. Mesmo com resistência à compressão simples muito inferior a referência o traço com 100% ADF apresentou uma elevação expressiva de 43% entre 7 e 28 dias, com tendência a evoluir para outras idades avançadas.

Figura 3 - Expansão das argamassas nas primeiras horas de moldagem.



Fonte: Adaptado Campos *et al.* (2018)

As argamassas com areia de descarte de fundição apresentaram as menores resistência à compressão simples, apresentando estes traços uma expansão de seu volume, que ocorreu nas primeiras horas após a moldagem, conforme apresentado na Figura 3.

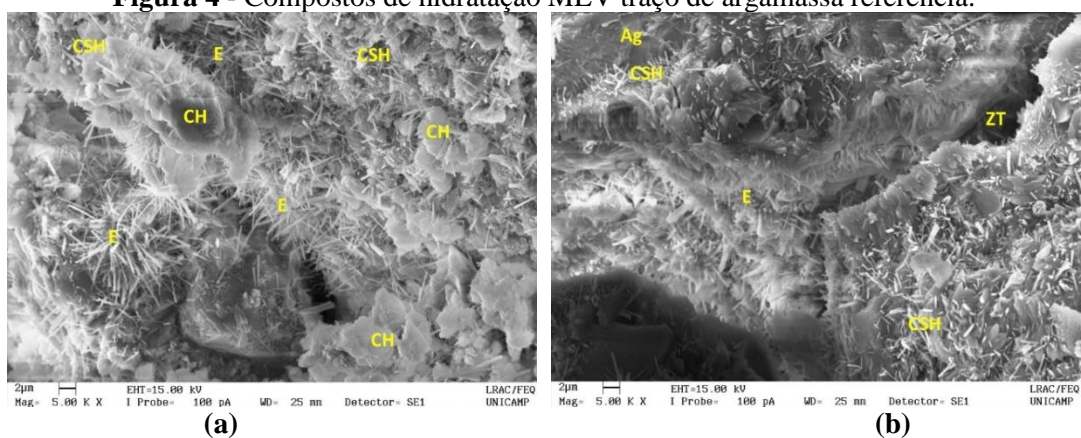
Atribui-se esta expansão a absorção da água de amassamento, o que gerou este inchamento da partícula de ADF. Como as partículas de areia de fundição absorveram a água de amassamento faltou água para a completa hidratação do cimento, motivo pelo qual as argamassas com maiores teores de ADF apresentaram as menores resistências à compressão simples, conforme foi constatado na Figura 2.

Aos 28 dias de idade todos os traços de argamassa foram ensaiados pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) no equipamento Microscópio Eletrônico de Varredura com Detector de Energia Dispersiva de raios X, Modelo do MEV: Leo 440i, Modelo do EDS: 6070, Marca MEV/EDS: LEO Electron Microscopy/Oxford (Cambridge, Inglaterra) disponível no Laboratório de Caracterização de Biomassa, Recursos Analíticos e de Calibração da Faculdade de Engenharia Química da Unicamp, para identificação dos produtos de hidratação do cimento e preenchimento da zona de transição agregado-pasta.

Todos estes produtos de hidratação observados nos diferentes traços de argamassa estão em comum com a bibliografia especialmente na formação dos compostos na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento no concreto conforme Mehta; Monteiro (2008 - p. 43, fig. 2.14 (b)) e Scrivener (1989 - p. 141, fig. 23). Alguns trabalhos acadêmicos também identificaram similaridade nos compostos formados quando da utilização de isoladores elétricos de porcelana (SHIROMA, 2016; CAMPOS, 2018).

Para o traço referência foram verificados os compostos etringita (E), portlandita (CH) e C-S-H, Figura 4 (a), além da presença destes na zona de transição (ZT) agregado-pasta, e até seu crescimento sobre o agregado (Ag), Figura 4 (b).

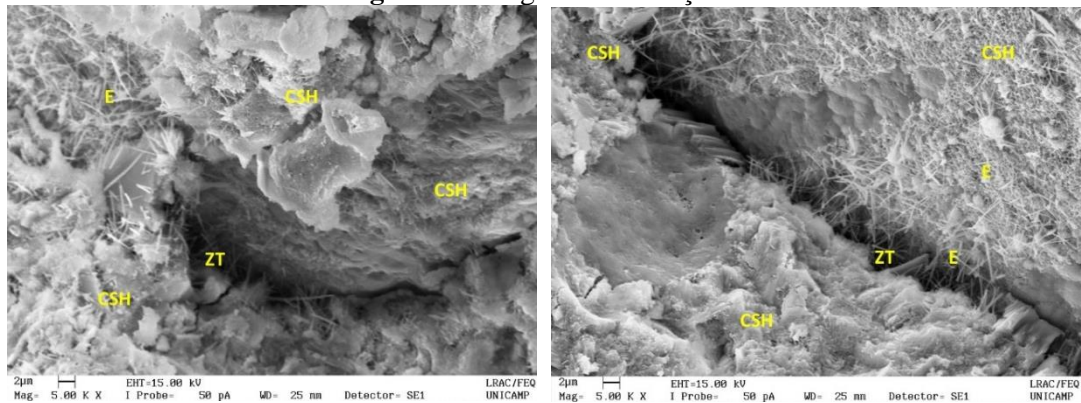
Figura 4 - Compostos de hidratação MEV traço de argamassa referência.



Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

O traço com 100% de areia de descarte de fundição, 100% ADF, apresentou uma zona de transição agregado-pasta (ZT) bem identificável, pois conforme observado nas idades iniciais, houve uma maior absorção de água pelo agregado de areia de fundição, o que contribuiu para este mais destacado e visível vazio na zona de transição. Com o tempo tende a diminuir este vazio da zona de transição em decorrência de seu preenchimento pelos compostos como C-S-H e etringita (E), Figura 5.

Figura 5 - Imagem MEV traço 100% ADF.

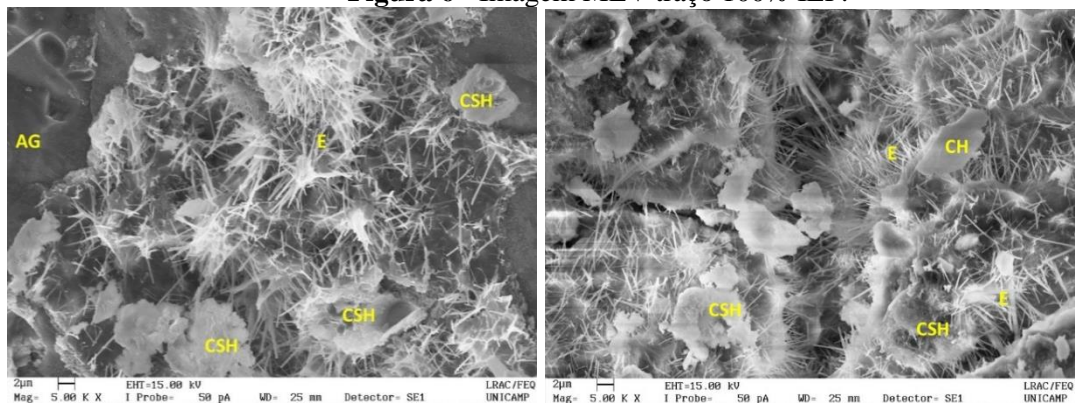


Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

A etringita e o C-S-H foi observado desenvolvendo sobre o agregado (Ag) no traço de argamassa com 100% de isolador de porcelana, 100% IEP, Figura 6. Destaca-se também, através da análise visual sem a quantificação, a maior quantidade de etringita nas imagens analisadas neste traço em relação aos traços referência e 100% ADF.

Em comparação ao traço 100% ADF a argamassa 100% IEP possui menores vazios de espaço na zona de transição, pois como o isolador de porcelana tem baixo teor de absorção de água, assim, a água de amassamento estava mais livre para ser absorvida pelo cimento e desenvolver seus produtos de hidratação que contribuem também para o aumento de resistência.

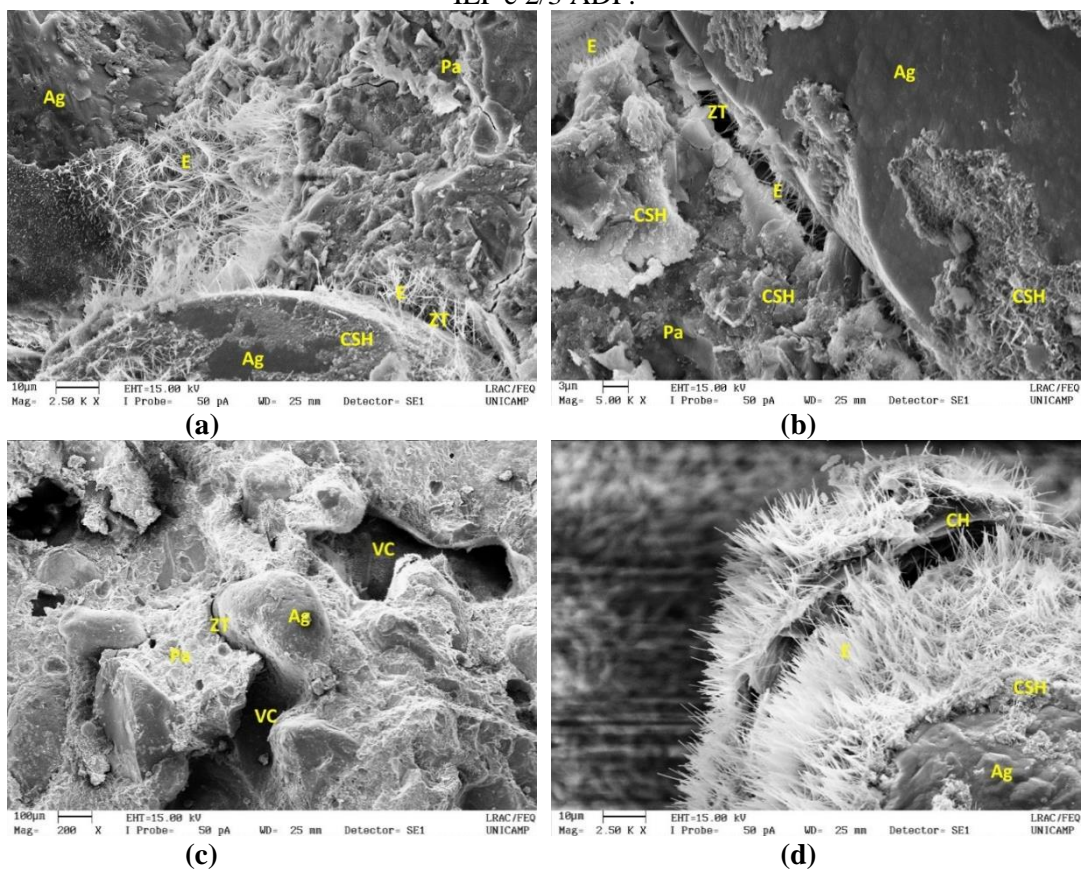
Figura 6 - Imagem MEV traço 100% IEP.



Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

Quando da combinação de isoladores de porcelana e areia de descarte de função, o traço 1/3 IEP e 2/3 ADF apresentou vazio na zona de transição (ZT) agregado (Ag) pasta (Pa) de pequenas dimensões, Figura 7 (a) e (b). O vazio capilar (VC) também foi observado e é atribuído a absorção da água de amassamento pelo agregado de areia de fundição, Figura 7 (c). Os cristais de etringita (E), a portlandita (CH) e o C-S-H foram observado formando sobre os agregados (Ag), Figura 7 (d).

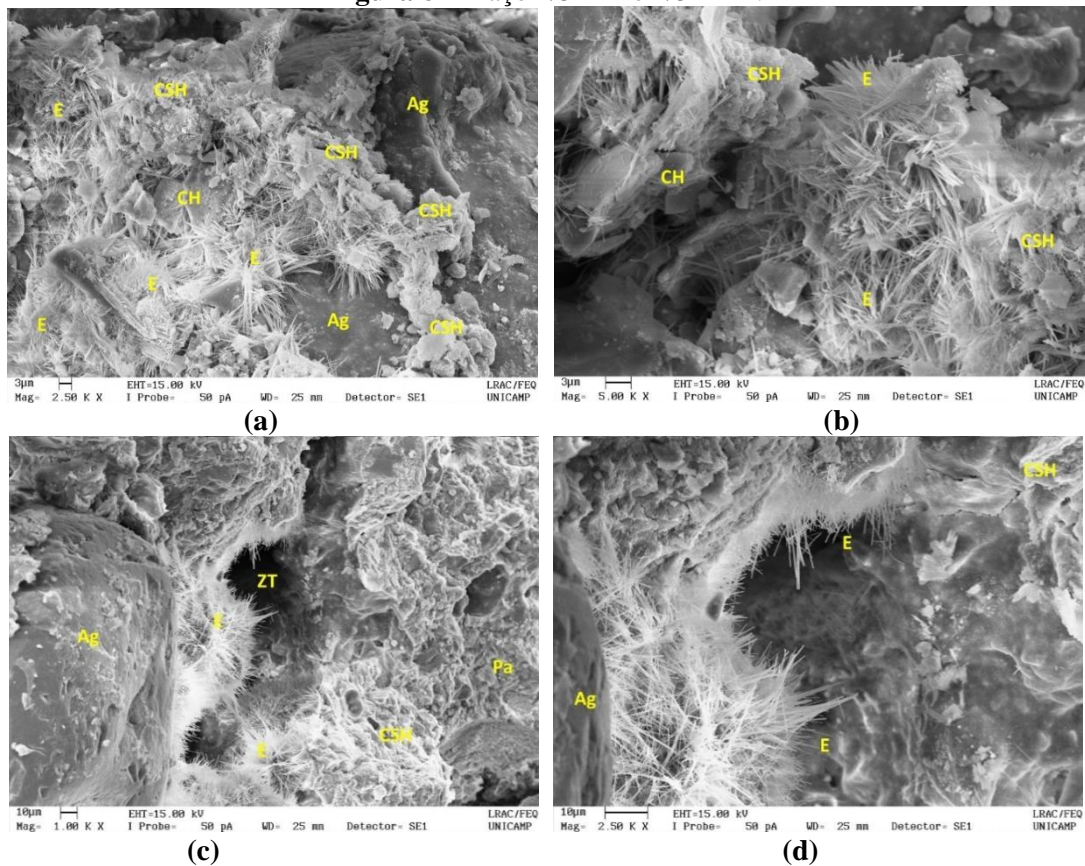
Figura 7 - Preenchimento da zona de transição agregado-pasta com composto de hidratação (a) e (b), presença de vazios capilares (c) e compostos de hidratação sobre o agregado (d), traço 1/3 IEP e 2/3 ADF.



Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

Em relação aos compostos de hidratação o traço 2/3 IEP e 1/3 ADF apresentou uma melhor distribuição quando de sua presença nas análises por MEV, Figura 8 (a) e (b), onde observa-se o agregado (Ag), C-S-H, etringita (E) e portlandita (CH). Há também a zona de transição (ZT), Figura 8 (c), com o preenchimento deste vazio pelos cristais de etringita, Figura 8 (d).

A análise microestrutural, aos 28 dias, mostrou que independentemente dos traços de argamassa há presença dos principais produtos de hidratação, caso do C-S-H, este em maior quantidade devido a grande quantidade de sílica nos componentes da argamassa, portlandita – CH, e etringita estando em conformidade com a bibliografia.

Figura 8 - Traço 2/3 IEP e 1/3 ADF.

Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

CONCLUSÕES

A areia de descarte de fundição, ADF, e os isoladores elétricos de porcelana, IEP, são materiais os quais seus resíduos e rejeitos do controle de produção fabril e substituição de peças inservíveis podem ser aplicados na construção civil, como substitutos dos agregados, miúdo e/ou gráudo, ou como adição ao cimento Portland em matrizes cimentícias, bastando em um primeiro instante apenas a moagem destes resíduos.

Ao analisar a composição da areia de fundição e dos isoladores de porcelana identificam-se altas quantidades de sílica que combinada aos produtos de hidratação do cimento resulta na composição do composto C-S-H que confere maior resistência aos concretos e argamassas.

A presença do C-S-H, da etringita e da portlandita foi observada em todos os traços de argamassa desta pesquisa e comprovada através da análise da microestrutura das argamassas com o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) aos 28 dias de idade.

Conseqüentemente, as argamassas com maiores teores de IEP apresentaram, aos 7 e 28 dias, elevada resistência à compressão simples. Porém, por absorver a água de amassamento

resultando em expansão em seu volume, as argamassas com maiores teores de ADF apresentaram as menores resistências, fato este que pode ser contornado com uma hidratação inicial da areia de fundição e até mesmo com ADF de fonte diferente a que foi utilizada neste trabalho.

A queima em altas temperaturas é outro fator aliado para a utilização destes resíduos, pois elimina toda e qualquer matéria orgânica que poderia ter o material. Soma-se a estes fatores o grande volume destes resíduos com a produção estimada, no ano de 2021, de isoladores de porcelana na ordem de 30.000 toneladas e a areia de descarte de fundição com 2,5 milhões de toneladas no ano de 2021.

É necessário que novas pesquisas sobre o tema sejam desenvolvidas para diminuir o volume destes materiais descartados. Para isso novos estudos devem ser realizados com outros teores de combinações de ADF e IEP, além de maior caracterização das propriedades mecânicas e de durabilidade os quais permitam a aplicação em matrizes cimentícias, argamassas, concretos e seus subprodutos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO – ABIFA. **Indústria da Fundição: Expectativa de Mercado**. Abril de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO – ABIFA. Setor de fundição deve fechar 2021 com crescimento de +20% - Novas altas são previstas para os próximos anos. **Fundição & Matérias-Primas**, Novembro de 2021, p. 16-17, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7211** - Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7215** - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7218** - Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 30** - Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 45** - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 46** - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 52** - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

CAMPOS, M. A. **Isoladores elétricos de porcelana na construção civil: Propriedades, pesquisa e aplicação.** 1. ed. Riga, Letônia: Novas Edições Acadêmicas, 2018.

CAMPOS, M. A.; PASSOS, L.; ARGOLLO FERRÃO, A. M. de; MORENO JUNIOR, A. L. Utilização de fíler cerâmico e sílica ativa em argamassas com baixo teor de cimento Portland: Determinação de resistência à compressão. In: 23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2018, Foz do Iguaçu. **Anais[...]** Foz do Iguaçu, 2018.

CHEGATTI, S. **Areias Descartadas de Fundação.** Contexto, Gerenciamento e Impacto. Editora Appris, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo, IBRACON, 2008.

SCRIVENER, K. L. The Microstructure of Concrete. In: SKALNY, J. P. **Materials science of concrete.** Westerville: The American Ceramic Society, 1989. 334 p. p. 127-162.

SHIROMA, L. **Caracterização de resíduo de porcelana de concessionárias de energias como substituição ao cimento Portland.** 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

Recebido em: 15/01/2022

Aprovado em: 05/02/2022

Publicado em: 10/02/2022