

Análises mecânicas e de durabilidade em argamassas produzidas com baixo teor de cimento

Mechanical and durability analysis of cementary matrix produced with low cement content

Luciana Paula Tessaro Morelo 

Geilma Lima Vieira 

Resumo

Alternativas vêm sendo estudadas com o intuito de minimizar os grandes impactos ambientais provenientes da produção do cimento e aço. Inclusive, adotando cimentos compostos, com incorporação de materiais alternativos, diminuindo a necessidade de cimento nas misturas. Por conseguinte, este trabalho estudou a viabilidade de incorporação de resíduos siderúrgicos no desempenho mecânico e de durabilidade de argamassas, avaliando a substituição parcial e total do Cimento Portland por escória granulada de alto-forno moída (EGAF) e resíduo proveniente do processo de Dessulfurização de Gases de Combustão (FGD). Os resultados encontrados mostram que a associação desses resíduos em substituição ao cimento melhorou cerca de 40% o desempenho mecânico das argamassas. Além de apresentarem um menor módulo de elasticidade e menor absorção de água por capilaridade, propriedades que aumentam significativamente a durabilidade das matrizes. Os resultados de lixiviação de contaminantes não apresentaram nenhum contaminante em quantidade prejudicial. Os estudos apresentados demonstram que a utilização de FGD e EGAF simultâneos para substituir o Cimento Portland foram satisfatórios, obtendo desempenhos mecânicos e de durabilidade superiores aos de referência, viabilizando a utilização desses resíduos na produção de argamassas com baixo teor de cimento.

Palavras-chave: FGD. Escória granulada de alto-forno moída. Resistência à compressão. Argamassas com incorporação de resíduos.

Abstract

Alternatives have been studied in order to minimize the major environmental impacts arising from the production of cement and steel. Alternatives include adopting composite cements with the incorporation of alternative materials, to reduce the need for cement in the mixtures. Therefore, this study worked on the viability of incorporating steel residues in the mechanical performance of mortar and durability, evaluating the partial and total replacement of Portland Cement (PC) by granulated blast furnace slag (EGAF) and residue from the Desulfurization process of flue gases (FGD). The results found show that the association of these residues in place of cement improved the mechanical performance of the mortars by around 40%. In addition to having a lower modulus of elasticity and lower absorption of water by capillarity, properties that significantly increase the durability of the matrices. The contaminant leaching results did not show any contaminants in harmful amounts. The studies presented demonstrate that the simultaneous use of FGD and EGAF to replace Portland cement were satisfactory, obtaining better mechanical and durability performances than the reference ones, enabling the use of these residues in the production of mortars with low cement content.

Keywords: Flue gas desulfurization (FGD). Ground granulated blast furnace slag. Compressive strength. Mortars with incorporation of residues.

¹Luciana Paula Tessaro Morelo
¹Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória - ES - Brasil

²Geilma Lima Vieira
²Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória - ES - Brasil

Recebido em 15/03/23
Aceito em 11/01/24

Introdução

As argamassas e concretos têm seu uso amplamente difundido na construção civil, e seus constituintes estão dentre os materiais mais utilizados no mundo. Para atender a toda essa demanda de produção, são necessárias a extração de quantidades significativas de recursos naturais, que, por sua vez, geram grandes impactos ambientais (Scrivener; John; Gartner, 2016).

A queima do carvão nas indústrias de cimento e aço constitui-se em um importante emissor de gases poluentes, dentre eles, o dióxido de enxofre (SO_2), que por sua vez oferece risco tanto a saúde humana quanto ao meio ambiente. Diante disso, os países têm sido forçados a criar legislações que controlem a emissão desse contaminante (França, 2019).

Durante a queima do carvão, o enxofre reage com o oxigênio, formando dióxido de enxofre (SO_2) e trióxido de enxofre (SO_3), podendo causar danos para a saúde humana e nos equipamentos. O SO_2 está associado a poluição urbana, riscos à saúde e formação da chuva ácida. O SO_3 , dependendo da quantidade, pode formar ácido sulfúrico, causando corrosão nos equipamentos da usina (Carpenter, 2012).

Para controlar a emissão desse contaminante, dentre as alternativas viáveis, o processo de dessulfurização de gases de combustão (flue gas desulphurization - FGD) tem sido muito adotado, por conta de sua alta eficiência e menor custo quando comparado a outros processos. Porém, durante esse processo é gerado uma grande quantidade de resíduo, conhecido como FGD.

Os limites de emissão de dióxido de enxofre (SO_2) por usinas de energia vem sofrendo reduções e as usinas foram obrigadas a instalar equipamentos de dessulfurização de gases de combustão. Esse processo gera toneladas de resíduos FGD todos os anos. Logo, a utilização do FGD como coproduto é extremamente relevante, tanto no âmbito econômico, quanto de gestão de recursos e proteção do meio ambiente (Zhong; Ni; Li, 2012). A composição do gesso FGD seco ao ar é principalmente sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e calcita (CaCO_3). Para a incorporação, ele deve passar pelo processo de calcinação, transformando-se em hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) (Guo; Shi, 2013).

O processo de hidratação de cimentos contendo a incorporação de EGAF é mais lento, uma vez que a escória necessita de um ativador sulfático (gesso, anidrita) ou alcalino (óxidos, portlandita) para iniciar as reações e por possuir um processo de dissolução mais difícil do que o cimento, devido ao seu caráter vítreo. Portanto, há uma diminuição da taxa de precipitação dos produtos de hidratação responsáveis pela resistência mecânica, acarretando menores resistências iniciais, porém, é possível obter resistências iguais ou maiores do que misturas contendo somente CP, porém, em idades posteriores (Cabrera-Madrid; Escalante-García; Castro-Borges, 2016).

Os estudos de materiais alternativos para uso como aglomerantes em misturas estão sendo desenvolvidos com o intuito de reduzir o impacto ambiental da construção, incorporar resíduos e melhorar o desempenho de argamassas e concretos. Como a utilização de materiais alternativos incorporados nas matrizes cimentícias apresentam diferenças na química tradicional do Cimento Portland (CP), e não foram tão extensivamente utilizados, há menos informações sobre seus mecanismos de reação, desenvolvimento de propriedades e durabilidade (Juenger *et al.*, 2011), por isso, a importância em fomentar os estudos nessa área.

Uma das maneiras para intensificar os estudos de materiais alternativos é a busca por medidas que visem a utilização cada vez maior dos resíduos na construção civil, diminuindo a necessidade de áreas de descarte e impactos ambientais ocasionados por essa destinação. Este trabalho visou contribuir para o desenvolvimento das análises da substituição desses coprodutos na matriz cimentícia, verificar o seu comportamento e detalhar vantagens e desvantagens dessas substituições. Além de análises mecânicas, foi fundamental conhecer suas propriedades no âmbito ambiental, como a lixiviação de contaminantes e aspectos de durabilidade, como a maior ou menor suscetibilidade à penetração de água, cloretos e sulfatos.

Método

Materiais

Para a fabricação dos corpos de prova de argamassas foram utilizados os seguintes materiais:

- (a) cimento CPV-ARI, com caracterização fornecida pelo fabricante e apresentada na Tabela 1 e massa específica igual a $3,09 \text{ kg/dm}^3$;
- (b) agregado miúdo natural proveniente de jazida, com massa específica $2,65 \text{ kg/dm}^3$,

- (c) Dimensão Máxima Característica (DMC) 2,40mm, módulo de finura 1,82 e distribuição granulométrica apresentada na Figura 1; e
- (d) coprodutos siderúrgicos: escória granulada de Alto forno e FGD, oriundos da empresa ArcelorMittal Tubarão - Serra/ES. Os resultados da caracterização estão apresentados na Tabela 2.

Para a utilização da EGAF como adição mineral no CP, foi necessário atender os requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014) – Materiais Pozolânicos. Para tanto, estabeleceu-se que a finura aceitável para o resíduo deveria ser próxima a do CP. Logo, a quantidade de material retido na peneira de abertura de malha de 45µm deveria ser menor ou igual a 20%. Para isso, a escória granulada de alto-forno necessitou de dois ciclos de moagem em moinhos de bolas, que correspondeu a um total de 5 horas e 34 minutos. O moinho era composto por 50 kg de esferas de aço de diferentes diâmetros. A caracterização foi realizada após os ciclos de moagem.

O FGD foi utilizado conforme recebido da usina, sem necessidade de moagem. Antes de começar as misturas, as amostras foram devidamente homogeneizadas e quarteadas, segundo a NBR NM 27 (ABNT, 2001).

A composição química dos resíduos foi obtida através do ensaio FRX – Fluorescência de Raio-X e os resultados estão descritos na Tabela 3.

Nas Figuras 2 e 3 constam os gráficos de Difração de Raio X (DRX) dos materiais, com um espectrômetro da marca Bruker, modelo S2 Ranger. O FGD apresentou grande quantidade de picos cristalinos, dentre eles: calcita, anidrita, portlandita, celestita, quartzo e leucita, conforme apresentado na Figura 2.

No resultado do DRX da EGAF (Figura 3) praticamente não houve presença de picos cristalinos, comportamento típico de material com predominância de fases vítreas. Os únicos picos identificados no gráfico são referentes as Calcitas (CaCO₃).

Proporcionamento das misturas

O traço adotado nessa pesquisa foi o de 1:6 (Cimento: Areia – em volume) e foi definido baseado em outras pesquisas já realizadas na área de estudos em argamassas, conforme levantamento realizado por Vaz e Carasek (2019). Além disso, para atender o objetivo de avaliar o comportamento das argamassas variando os percentuais de resíduos, fixou-se a relação água/ aglomerante em 0,60 e montou-se uma matriz com diferentes percentuais de incorporação de resíduos e CP. Na Tabela 4 estão apresentadas todas essas composições de pastas.

Tabela 1- Laudo do cimento CPV - ARI

Ensaio Químicos					
Ensaio	NBR nº	Unid.	Média	Especif. NBR 16697 (ABNT, 2018c)	
Perda ao fogo	NM 18 (ABNT, 2012a)	%	9,47	≤ 6,50	
SO ₃	NBR 14656 (ABNT, 2001)	%	2,6	≤ 4,50	
RI	NM 15 (ABNT, 2012b)	%	1,68	≤ 3,50	
CaO	NM 13 (ABNT, 2013a)	%	1,41	não aplicável	
MgO	NBR 14656 (ABNT, 2001)	%	0,57	≤ 6,50	
Ensaio Físicos					
Ensaio	NBR nº	Unid.	Média	Especif. NBR 16697 (ABNT, 2018c)	
Blaine	NBR 16372 (ABNT, 2018a)	cm ² /g	4.819	não aplicável	
Ret. 75 mic	NBR 11579 (ABNT, 2013b)	%	0	≤ 6,00	
Expansibilidade	NBR 11582 (ABNT, 2016b)	mm	0	≤ 5,00	
Início de pega	NBR 16607 (ABNT, 2018b)	min	157	≥ 60	
Fim de pega	NBR 16607 (ABNT, 2018b)	min	225	≤ 600	
Resistência à Compressão					
Ensaio	NBR nº	Unid.	Desvio	Média	Especif. NBR 16697 (ABNT, 2018c)
Resist. Comp. 1D	NBR 7215 (ABNT, 2019)	MPa	2	19,8	≥ 14,00
Resist. Comp. 3D	NBR 7215 (ABNT, 2019)	MPa	1,32	32,3	≥ 24,00
Resist. Comp. 7D	NBR 7215 (ABNT, 2019)	MPa	1,3	37,5	≥ 34,00
Resist. Comp. 28D	NBR 7215 (ABNT, 2019)	MPa	1,38	43,4	não aplicável

Fonte: laudo da empresa CSN (Fevereiro 2022).

Figura 1 - Distribuição granulométrica

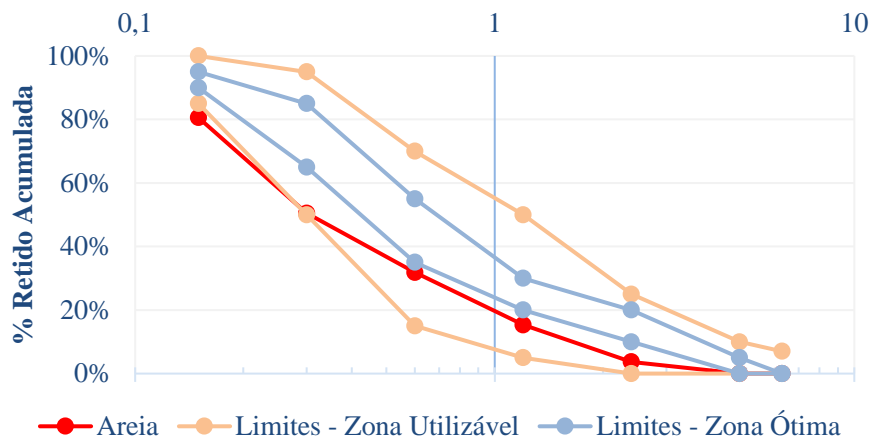


Tabela 2 - Caracterização EGAF moída e FGD

Propriedades		EGAF moída	FGD
Características físicas	Massa específica (g/cm ³)	2,827	2,101
	Massa unitária (g/cm ³)	-	0,425
	Finura #200 (%)	-	7,75%
	Finura #325 (%)	-	8,19%
	Superfície específica Blaine (cm ² /g)	4.361	9.716
Características químicas	Perda ao fogo (%)	-	22,00%
	pH	8,44	13,98
	Umidade	-	0,43%
	Matéria orgânica (%)	-	1,51%
	Teor de cloretos totais (%)	0,01%	4,08%
	Teor de sulfatos solúveis (%)	0,06%	9,04%

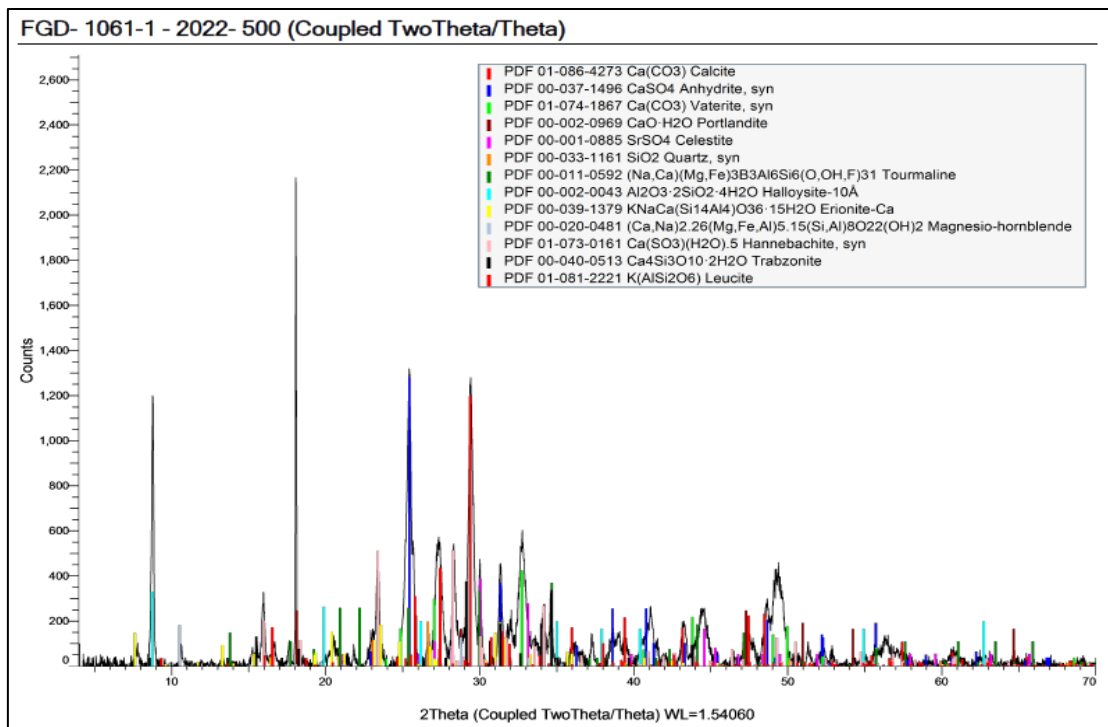
Tabela 3 - Composição química da EGAF e FGD

Amostra	CaO	SO ₃	Cl	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	SrO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Outros	PPC
EGAF	36,4	2,53	-	7,35	31,5	10,2	0,45	0,1	0,37	0,46	0,31	0,17	-	0,06	10,1
FDG	48,2	25,1	4,61	1,29	0,76	0,46	0,23	0,18	0,09	-	-	-	0,36	0,22	18,5

Fonte: CETEM (2023).

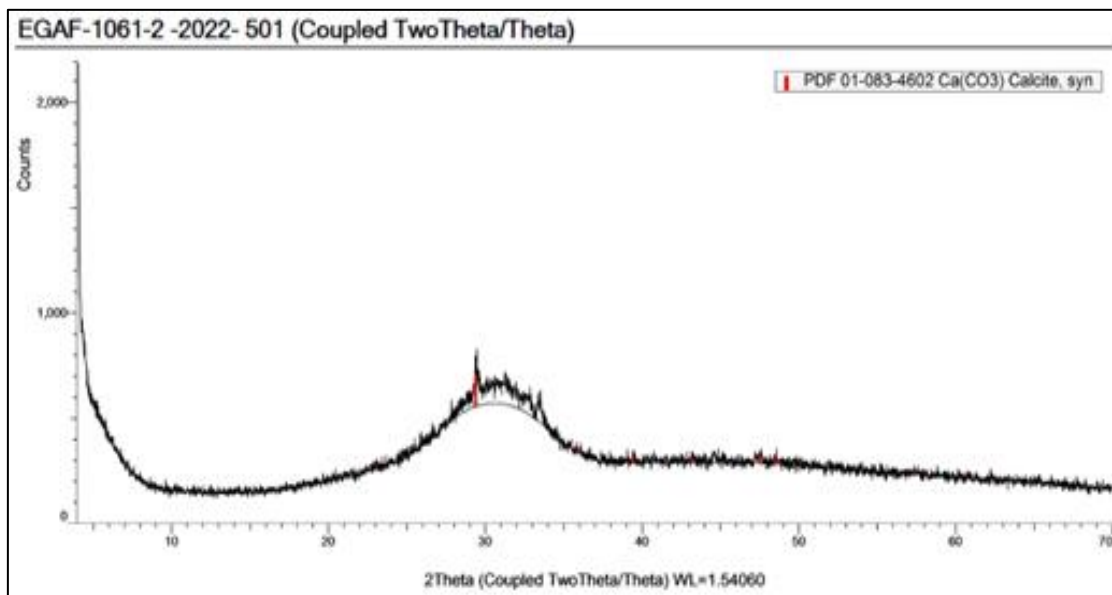
Nota: PPC: Perda por calcinação.

Figura 2 - DRX do FGD



Fonte: CETEM (2023).

Figura 3 - DRX da EGAF



Fonte: CETEM (2023).

Tabela 4 - Composição das pastas utilizadas nas argamassas

Traço		Composição		
		CP	EGAF	FGD
0	REF	100%	0%	0%
1	E60F10	30%	60%	10%
2	E70F10	20%	70%	10%
3	E00F25	75%	0%	25%
4	E60F25	15%	60%	25%
5	E70F25	5%	70%	25%
6	E00F30	70%	0%	30%
7	E60F30	10%	60%	30%
8	E70F30	0%	70%	30%

A dosagem e mistura das argamassas foram realizadas segundo critérios da NBR 7215 (ABNT, 2019).

Método

No estado fresco foram realizados os ensaios de Índice de Consistência (ABNT, 2016a), Densidade de Massa no estado fresco e Teor de Ar Incorporado (ABNT, 2005b), Retenção de Água (ABNT, 2005a) e Avaliação de tempos de pega através de técnica de Calorimetria.

E no estado endurecido foram realizados os ensaios de Resistência à Compressão (ABNT, 2019), Resistência à Tração por Compressão Diametral (ABNT, 2011), Módulo de Elasticidade Dinâmico (ABNT, 2008), Absorção de água por capilaridade (ABNT, 2005c), Teor de Cloretos através do Método Argentométrico, Teor de Sulfatos (ABNT, 2012c) e Lixiviação de Contaminantes (NSI, 2004).

Densidade de massa e teor de ar incorporado

Para a obtenção da densidade das argamassas, utilizou-se um recipiente cilíndrico de PVC, com massa e volume conhecidos. Como a massa do recipiente vazio era conhecida, calculou-se a densidade de massa. Já para a determinação do teor de ar incorporado, primeiramente realizou-se o cálculo da densidade de massa teórica, considerando todos os componentes anidros da argamassa e em seguida, com a densidade teórica e a densidade calculada, calculou-se o teor de ar incorporado das misturas.

Avaliação de tempos de pega através de técnica de Calorimetria

Para a realização do ensaio de calorimetria, utilizou-se o aquisitor de dados, Marca: Lynx/ Modelo: ADS 2002/ Com sensores: Termopar tipo k. As argamassas foram dosadas, colocadas em caixas de isopor e levadas para a câmara climática com temperatura e umidade controladas. Em cada amostra foi colocado um dos sensores para que fosse possível realizar as leituras de temperatura durante todo o tempo de ensaio. A câmara climática utilizada era marca: feutron/ Modelo: kpk200.

Para análise dos resultados, utilizou-se a técnica baseada em Betioli *et al.* (2009) para a determinação do início de pega das misturas. A técnica consiste em traçar uma reta paralela sobre período de indução, onde não há mudanças significativas de temperatura e uma paralela a inclinação da curva, conforme exemplo apresentado na Figura 4.

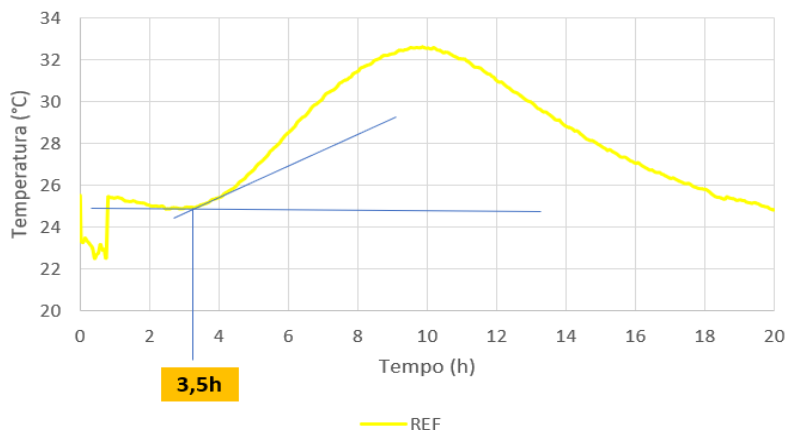
O ponto de encontro dessas duas retas é o ponto onde a temperatura começa a subir, após um período sem variação. Nesse ponto se estabelece o início de pega das misturas.

Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio do Módulo de Elasticidade Dinâmico foi realizado conforme as diretrizes da NBR 15630 (ABNT, 2008) nos corpos de prova com 28 dias de idade. Antes da execução dos ensaios, os corpos de prova ficaram 24 horas em estufa para secagem.

Realizou-se o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico através da técnica de velocidade de propagação de onda ultrassônica. A distância entre os transdutores era conhecida, uma vez que todos os corpos de prova tiveram suas medidas aferidas. Tomando nota do tempo gasto para a onda percorrer essa distância, calculou-se a velocidade da propagação da onda ultrassônica e posteriormente o módulo de elasticidade dinâmico.

Figura 4 - Curva temperatura x tempo do traço de referência



O aparelho de ultrassom utilizado neste ensaio era Marca: Proceq e Modelo: Pundit lab.

Absorção de água por capilaridade

Para execução deste ensaio, os corpos de prova permaneceram em câmara climática controlada, com temperatura do ar de (23 ± 2) °C e umidade relativa do ar de (60 ± 5) %, as amostras foram colocadas na posição vertical, dentro de uma bandeja com água até uma altura de 5mm, conforme Figura 5(a).

No ensaio de absorção de água por capilaridade, foram realizadas medições da massa dos corpos de prova com 10 e 90 minutos de ensaio. A variação da massa corresponde ao Coeficiente de Capilaridade.

Teor de cloretos totais e sulfatos

Para determinação do total de cloretos e sulfatos contido nas amostras, realizou-se a trituração de fragmentos das amostras da argamassa no estado endurecido. Após a trituração, foi executado o método Argentométrico/método de Mohr para os cloretos e o teor de sulfatos solúveis foi determinado seguindo a NBR NM 16 (ABNT, 2012c).

Lixiviação de contaminantes

A metodologia adotada para este ensaio está descrita na norma holandesa EA NEN 7375 (NSI, 2004). As amostras foram moldadas e permaneceram em cura úmida por um período de 120 dias. Após esse período, cada uma das amostras foi colocada em um recipiente cilíndrico com 2,30 litros de água ultrapura. Para analisar a composição química, filtrou-se a solução contida no recipiente em várias etapas: 6 horas, 1 dia, 2 dias e 6 horas, 4 dias, 9 dias, 16 dias, 36 dias e 64 dias.

A análise química do material lixiviado foi realizada pelo Laboratório de Espectrometria Atômica-LEA/Departamento de Química/CCE/UFES com um Espectrômetro de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS), Modelo NexION™ 300.

Após a análise dos dados das concentrações de cada elemento, foi realizado o cálculo da taxa de lixiviação total (Ei) para cada um dos compostos e essa taxa é comparada aos limites U1 e U2 informados pela própria norma, em mg/m².

O cálculo da taxa de lixiviação total (Ei) foi realizado de acordo com a Equação 1.

$$Ei = \frac{Ci \times V}{f \times A} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

Ei: concentração do componente, em mg/m²;

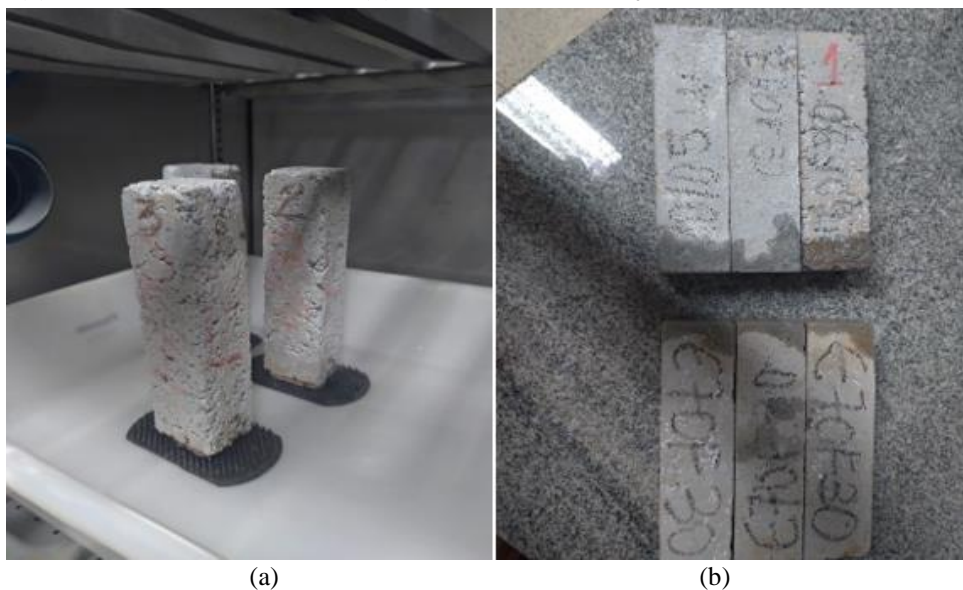
Ci: concentração do componente, em µg/l;

V: Volume contido no tanque, em l;

A: Área da superfície do corpo de prova em contato com a água, em m²; e

f: fator de conversão = 1.000 µg/mg.

Figura 5 - (a) Corpos de prova durante e (b) após ensaio de absorção de água por capilaridade



Resultados e discussões

Resultados no estado fresco

Índice de consistência

A média dos dados de Índice de consistência obtidos estão apresentados na Figura 6. Como a relação água/aglomerante foi mantida constante, observou-se que alguns traços apresentaram comportamento mais seco, o que impactou em índices de consistências menores.

Para verificar quais os fatores foram significativos para esse comportamento, foi realizado uma Análise de Variância - ANOVA, com 95% de confiabilidade. Todos os fatores foram significativos. A Figura 7 apresenta o efeito isolado da incorporação dos resíduos e o efeito da incorporação simultânea na propriedade de índice de consistência.

Na Figura 7(a) verificou-se que apesar de ter ocorrido um aumento no índice de consistência de 25 para 30% de substituição, a presença de FGD nas argamassas acarretou uma diminuição do espalhamento das misturas comparado ao traço de referência. Esse comportamento pode ser associado a uma maior superfície específica do FGD quando comparado ao CP. Quanto maior a superfície específica, maior a área específica e maior a necessidade de água na mistura para uma mesma trabalhabilidade, como a relação água/aglomerante foi fixado, houve a redução da trabalhabilidade devido a incorporação do FGD.

Já na incorporação isolada de EGAF (7b), ocorreu o comportamento contrário, quanto maior o percentual de incorporação, maior foi o índice de consistência.

A melhora da trabalhabilidade das misturas contendo EGAF pode estar associada a superfície mais lisa do material, o que favorece o deslizamento das partículas durante o ensaio (ACI, 2005).

Na Figura 7(c) com exceção do traço E70F30, os traços apresentaram índice de consistência próximos ou inferiores ao traço referência.

Johari *et al.* (2011) encontraram resultados semelhantes durante a pesquisa, onde a inserção da EGAF melhorou a trabalhabilidade da mistura e à medida que esse percentual de incorporação aumentou, houve também o aumento significativo da trabalhabilidade e atribuíram esse comportamento a melhora da dispersão das partículas de cimento e as características da EGAF, como a necessidade de pouca absorção de água durante a mistura.

Densidade de massa e teor de ar incorporado

O comportamento encontrado nessas duas propriedades foi inversamente proporcional. Quanto maior a densidade de massa da mistura, menor foi o teor de ar incorporado, conforme apresentado na Figura 8.

Na Figura 9 estão apresentados o efeito da incorporação de FGD e EGAF nas duas propriedades, após realização da ANOVA.

Ao avaliar o comportamento, observou-se que os traços contendo apenas FGD, até um percentual de 25% apresentam densidades menores que o traço referência e consequentemente, possuem os maiores teores de ar incorporado. Ao aumentar esse percentual para 30%, nota-se uma melhora nas duas propriedades.

Figura 6 - Índice de consistência

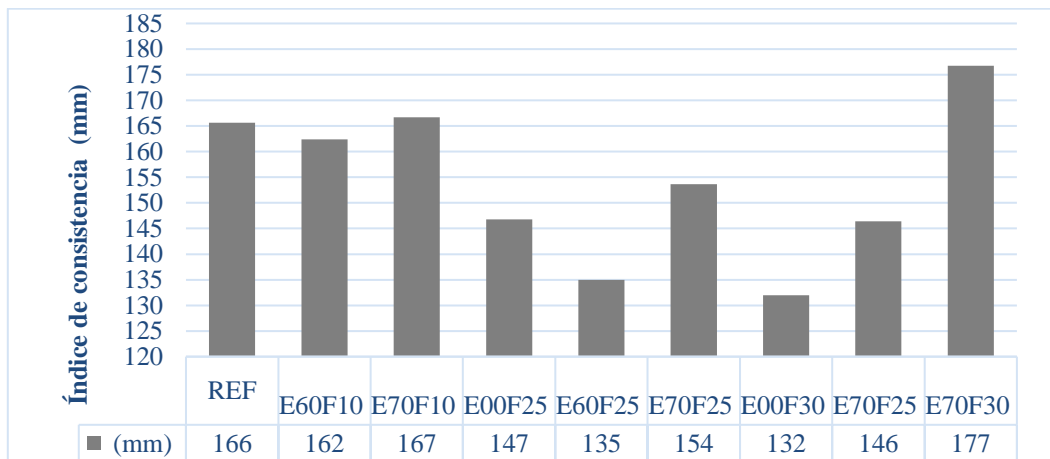


Figura 7 - Efeito isolado do percentual de substituição de: (a) FGD e (b) EGAF e (c) incorporação simultânea

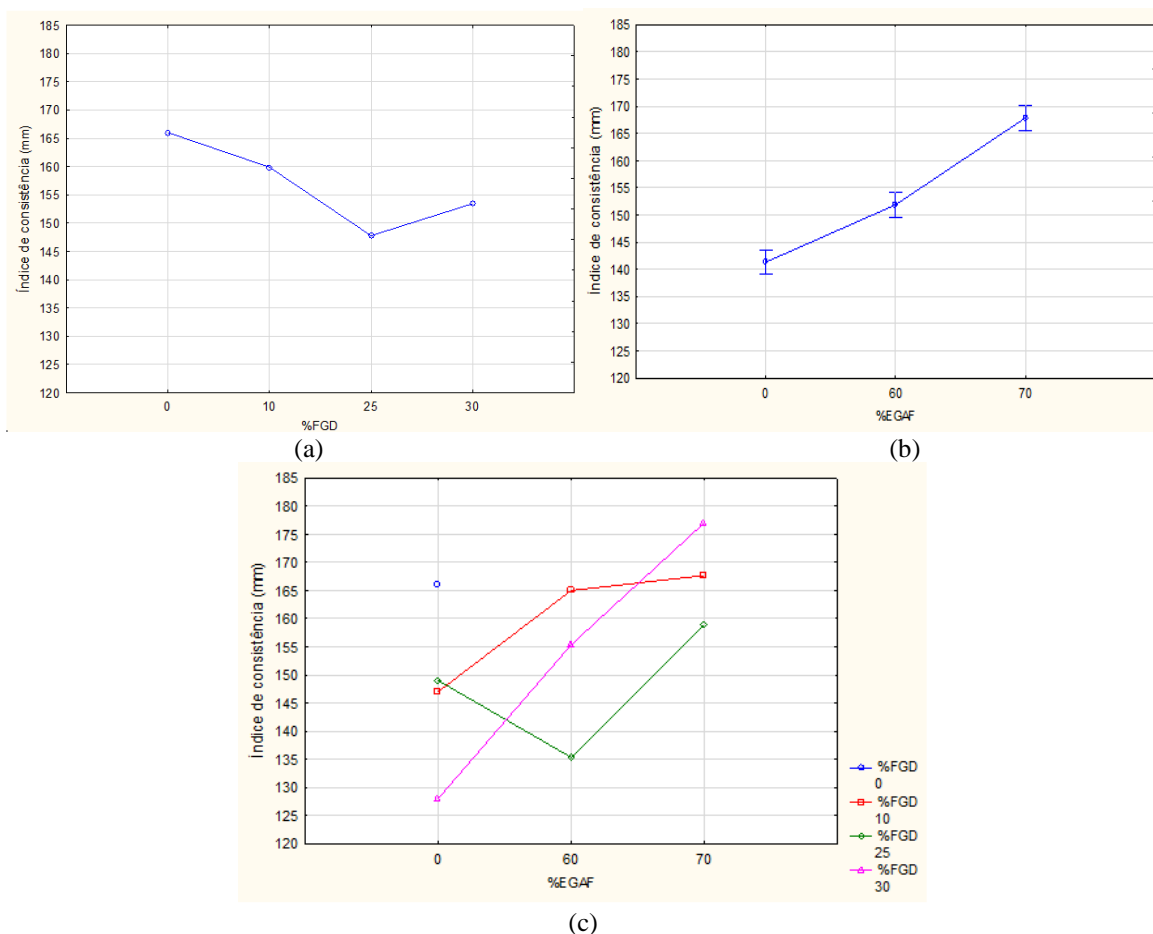


Figura 8 - Densidade de massa e teor de ar incorporado

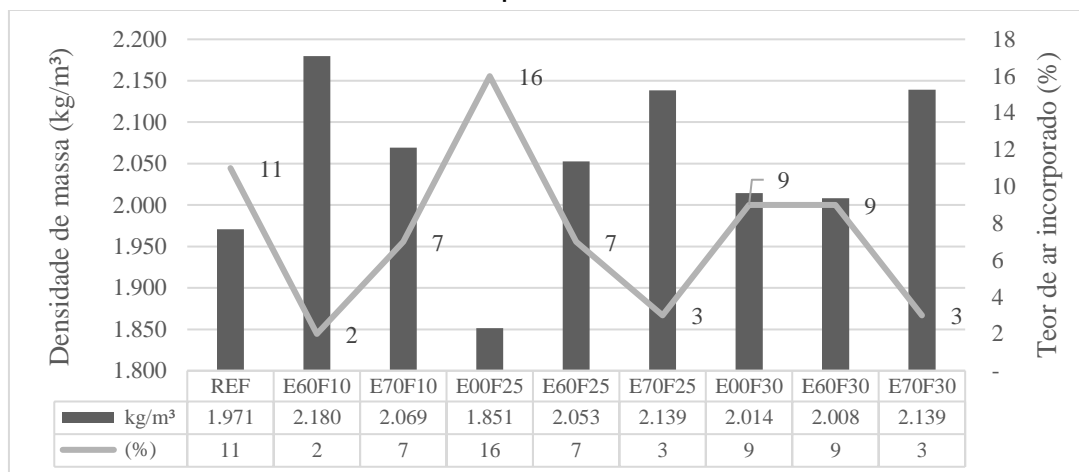
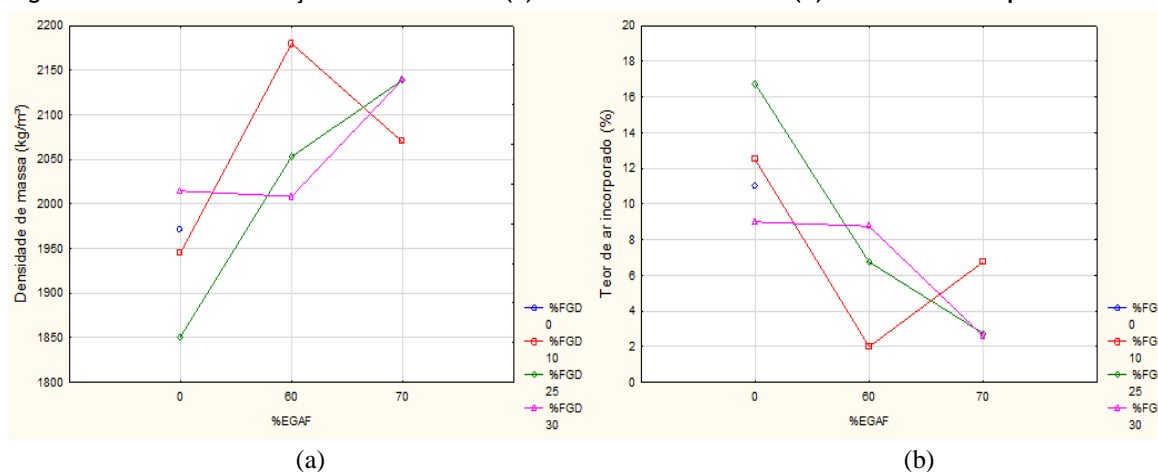


Figura 9 - Efeito da interação % FGD e EGAF (a) densidade de massa e (b) teor de ar incorporado



Além disso, ao incorporar a EGAF nas misturas, houve um aumento significativo na densidade de massa e conseqüentemente, a diminuição dos teores de ar incorporado. Esse comportamento vai ao encontro de diversas pesquisas que apontam que a incorporação de EGAF auxilia no ao preenchimento dos poros, ocasionando a diminuição da porosidade e conseqüentemente o aumento da densidade de massa, uma vez que os poros passam a conter as partículas de EGAF.

Ozbay *et al.* (2016) apontam que diversas pesquisas e documentos comprovam que a utilização da EGAF modifica o tamanho dos poros, diminuindo a porosidade das misturas e atribui esse comportamento principalmente a reação com o CH e a liberação de álcalis durante a hidratação do cimento.

Ademais, Dai *et al.* (2022) verificaram que a incorporação da EGAF na matriz resulta em uma melhor estrutura de poros e menor porosidade, uma vez que a EGAF possui partículas mais finas que absorvem o hidróxido de cálcio (CH) liberado pelo processo de hidratação do cimento e transformam em gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e aluminato de cálcio hidratado (C-A-H).

Calorimetria

Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 5.

Notou-se que a incorporação do FGD de forma isolada na mistura, não proporcionou o prolongamento dos tempos de pega, pois, apresentou valores inferiores aos demais traços contendo EGAF e o de referência. Sendo assim, o FGD isolado não apresenta desempenho favorável nessa propriedade.

No que tange os tempos de pega das amostras com 0% de incorporação de EGAF, observou-se que ao aumentar o percentual de incorporação de FGD nas argamassas, ocorreu uma redução no tempo de pega, logo,

o FGD isolado não apresentou desempenho favorável nessa propriedade. Ao substituir o cimento por FGD e EGAF simultaneamente, os tempos de pega aumentaram consideravelmente.

Guo e Shi (2013) observaram que a incorporação de FGD nas misturas que continham EGAF, prolongou o tempo de pega das matrizes quando comparadas as matrizes contendo apenas EGAF. Eles atribuíram esse prolongamento ao fato de que o FGD libera uma alta taxa de sulfatos na solução durante a hidratação do cimento, dessa forma, esses sulfatos reagem com os aluminatos tricálcicos da solução formando etringita, que por sua vez, cria uma espécie de camada que impede a difusão dos íons necessários para formar os hidratos necessários para o endurecimento das misturas.

Retenção de água

Os resultados encontrados para cada uma das misturas estudadas, estão apresentados na Tabela 6.

Nota-se que a propriedade de retenção de água não sofreu grandes influências dos resíduos estudados nessa pesquisa, uma vez que os resultados foram muito semelhantes, independente dos percentuais de incorporação de FGD e EGAF.

Nota-se que a propriedade de retenção de água não sofreu grandes influências dos resíduos estudados nessa pesquisa, uma vez que os resultados foram muito semelhantes, independente dos percentuais de incorporação de FGD e EGAF.

Resultados no estado endurecido

Resistência à compressão axial

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova moldados estão apresentados na Figura 10.

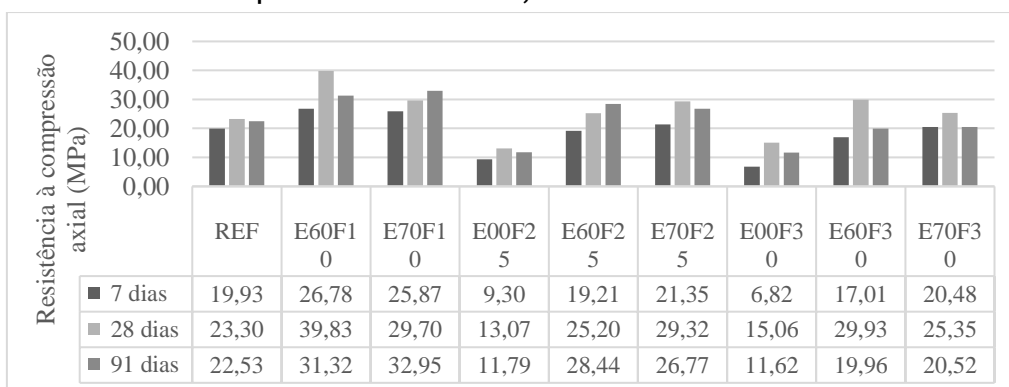
Tabela 5 - Tempos de pega

%EGAF	Início do tempo de pega (h)			
	%FGD			
	0	10	25	30
0	3,5		2,5	2,0
60		6,0	9,5	8,0
70		9,0	8,5	6,5

Tabela 6 - Retenção de água em %

%EGAF	Retenção de água (%)			
	%FGD			
	0	10	25	30
0	94		95	95
60		94	94	93
70		94	94	94

Figura 10 - Resistência à compressão nas idades de 7, 28 e 91 dias



A partir dos dados apresentados na Figura 10, verificou-se que a maior resistência a compressão aos 28 dias foi do traço E60F10, com 60 e 10% de EGAF e FGD, respectivamente.

Com todas as resistências encontradas, em todas as idades, foi realizada a análise de variância com o intuito de verificar quais variáveis foram significativas nessa propriedade. Os dados obtidos estão apresentados na Tabela 7, onde todas as variáveis foram significativas.

Na Figura 11 estão apresentados o efeito isolado do percentual de FGD e EGAF nas misturas.

Ao analisar o efeito isolado da incorporação do FGD, observou-se que o teor de incorporação de 10% foi o único que apresentou resistência maior que o traço de referência, os demais (25 e 30%) apresentaram uma redução da resistência à compressão.

O mesmo comportamento foi identificado por Teixeira (2019), onde ao avaliar o efeito isolado do FGD, identificou que ao aumentar o nível de adição de FGD de 5% para 10 e 15%, ocorreu uma diminuição da resistência à compressão. Análogo ao encontrado nessa pesquisa, os traços com até 10% de incorporação apresentaram resistência à compressão superior ao traço de referência.

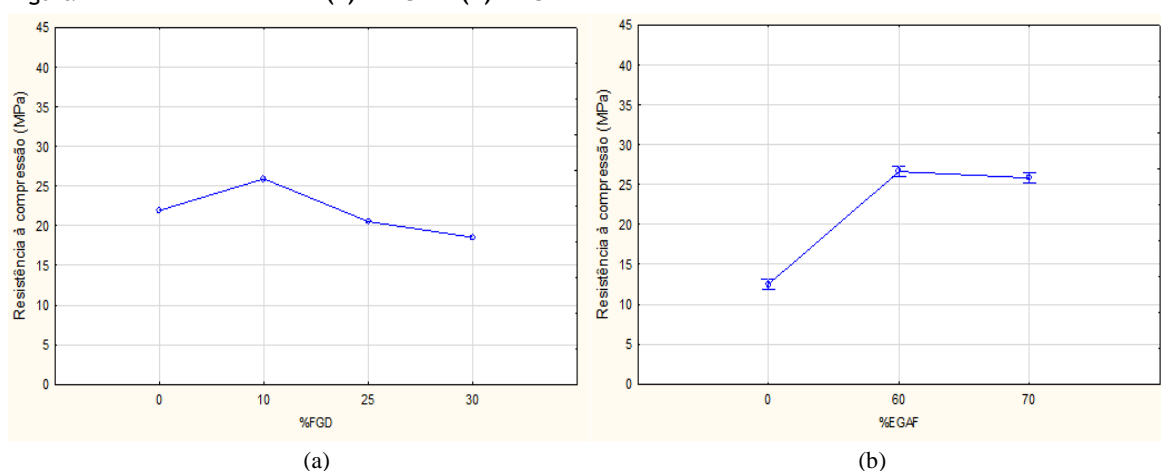
Jiang *et al.* (2018) também verificaram que a incorporação de FGD contribuiu para o aumento da resistência à compressão até um teor de adição de 5%. Para percentuais superiores também ocorreu uma inversão do comportamento. Eles associaram esse comportamento a diminuição dos produtos de hidratação do cimento que pode estar associada a alta taxa de liberação de sulfatos na solução, devido ao alto teor de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) contido no resíduo.

A incorporação isolada de EGAF nas misturas aumentou expressivamente o desempenho a resistência à compressão axial – Figura 11(b).

Tabela 7 - Análise estatística

Fatores	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Probabilidade
%FGD	1312,44	2	656,22	152,69	0,000	100,00%
%EGAF	5642,38	2	2821,19	656,46	0,000	100,00%
Idade	1176,60	2	588,30	136,89	0,000	100,00%
%FGD*%EGAF	243,69	4	60,92	14,18	0,000	100,00%
%FGD*Idade	128,34	4	32,08	7,47	0,000	100,00%
%EGAF*Idade	111,82	4	27,95	6,50	0,000	99,99%
%FGD*%EGAF*Idade	266,84	8	33,35	7,76	0,000	100,00%
Erro	464,14	108	4,30			

Figura 11 - Efeito isolado do (a) % FGD e (b) %EGAF



Uma das características que justificam o aumento da resistência à compressão com a incorporação da EGAF é a diminuição do tamanho dos poros e da porosidade total. Essa diminuição pode estar associada ao preenchimento dos poros por produtos de hidratação. Guo e Shi (2013) ao estudarem o aumento de 25 para 50% do percentual de substituição de EGAF, verificaram a diminuição de mais de 27% na porosidade total das misturas. Além disso, uma redução maior do que 60% no número de poros maiores de 500 angstrom (Å), sugerindo que a microestrutura da mistura contendo EGAF associada ao cimento é mais compacta. Quando esse percentual alcança níveis próximos de 70%, nota-se uma pequena redução da resistência. Esse efeito pode ser atribuído à diminuição de reagente alcalino (cimento), disponível na mistura para reagir com a escória. Uma vez que o CP hidratado fornece Hidróxido de Cálcio (CH) que favorece a dissolução da EGAF (Rubert *et al.*, 2018).

Na Figura 12 verifica-se a interação entre a incorporação simultânea dos resíduos e a idade.

Observa-se que todos os traços obtiveram aumento de resistência de 7 para 28 dias, independente dos percentuais.

Johari *et al.* (2011) descrevem que a incorporação de EGAF proporcionou uma redução da resistência inicial de concretos quando comparados as misturas de referência, contendo apenas CP. O desenvolvimento das resistências é mais lento e esse comportamento é ainda mais perceptível quando os percentuais de incorporação são muito elevados. Esse efeito pode ser atribuído ao efeito de dissolução, uma vez que parte do cimento foi substituído por EGAF, bem como a reatividade da EGAF.

Guo e Shi (2013) verificaram que ao utilizar FGD associado a EGAF houve um aumento de resistência à compressão das misturas quando comparados a traços contendo apenas EGAF. Além disso, identificaram que algumas impurezas presentes no FGD, como CaCO_3 (Carbonato de cálcio), Ca(OH)_2 (Hidróxido de cálcio) e outros íons solúveis de Fe (Ferro), K (Potássio) e Na (Sódio), melhoraram a microestrutura das matrizes cimentícias e com isso, aumentaram a resistência a compressão.

Aos 91 dias, alguns traços apresentaram uma redução na resistência a compressão. Porém, em todas as idades, a resistência teve um aumento significativo ao incrementar EGAF na mistura.

A redução da resistência após os 28 dias não era esperada, porém, outras pesquisas já obtiveram resultados semelhantes. Thomaz (2010) compilou algumas pesquisas para correlacionar a utilização de cimentos cada vez mais finos com a evolução da resistência à compressão, onde apresentaram resistências inferiores aos 91 dias. Ainda segundo Thomaz (2010), em 1950 Brewer e Burrows já estudavam a correlação crítica entre a finura do cimento e a durabilidade do concreto.

Bentz, Sant e Weiss (2008) compararam o desenvolvimento de tensões residuais em função do tempo, em pastas produzidas com cimento grosso e fino, com relação $a/c = 0,35$ e cura selada a uma temperatura 23°C . Os resultados encontrados estão apresentados na Figura 13.

Notaram que a pasta de cimento mais grosso apresentou tensões de tração muito inferiores aos da pasta de cimento fino e somente em idades mais avançadas, após 60 horas, enquanto as pastas com cimento fino já apresentaram tensões de tração após apenas 12 horas.

Figura 12 - Efeito da interação % FGD, %EGAF e idade

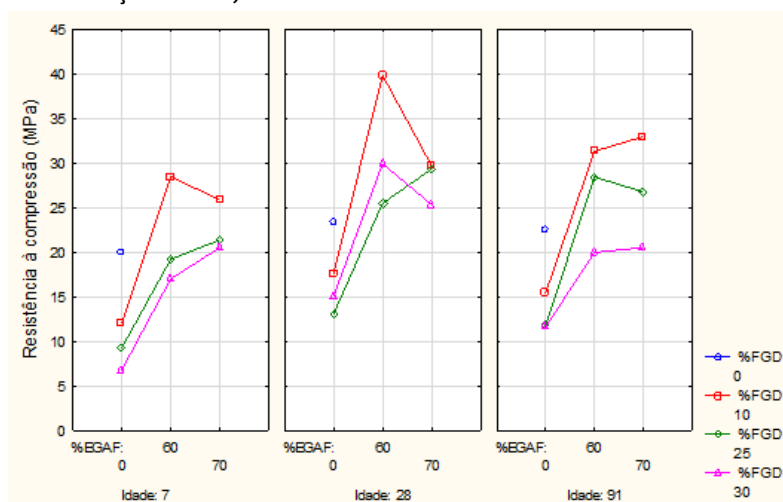
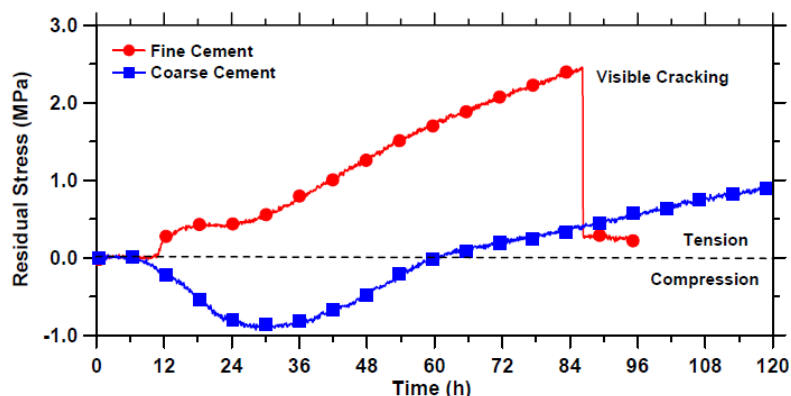


Figura 13 - Desenvolvimento de tensões residuais em função do tempo



Fonte: Bentz, Sant e Weiss (2008).

No estudo, foi identificado que a pasta de cimento fino apresentou altas taxas de tensão de tração, um pico de tensão de tração de 2,45 MPa, causou fissuração após 87 horas de ensaio, tensão superior ao de resistência de tração da amostra, logo, ocorreu o aparecimento de uma trinca visível. Já na pasta com cimento grosso nas primeiras idades identificou-se apenas taxas de compressão e as taxas de tração foram inferiores e em idades mais avançadas. As pastas produzidas com cimento grosso não desenvolveram fissuração, dessa forma, resultou em uma menor probabilidade de fissuração nos primeiros dias quando comparado a de cimento mais fino. Isso ocorreu principalmente por apresentarem menores deformações autógenas, o que contribuiu para uma tensão autógena diminuída (Bentz; Sant; Weiss, 2008).

Ainda segundo Bentz, Sant e Weiss (2008) as pastas de cimento fino, caracterizadas por sua alta resistência inicial, aumentam as deformações térmicas e autógenas, causando fissurações precoces.

Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados na Figura 14.

Os dados obtidos também foram analisados estatisticamente. Os fatores isolados de percentual de incorporação de FGD e EGAF e a idade, foram significativos, conforme Tabela 8.

A Figura 15 apresenta o efeito isolado da incorporação de cada um dos resíduos às misturas.

Analisando o efeito isolado do FGD, nota-se que com 10% de incorporação, houve um aumento da resistência em relação ao traço de referência, porém, ao aumentar o percentual de incorporação ocorreu uma redução da resistência à tração. Já quando o percentual de FGD variou de 25 para 30% não houve alteração, indicando que o aumento de incorporação do FGD não contribuiu para o aumento desta propriedade.

Essa redução da resistência para percentuais de incorporação acima de 10% pode estar associado ao fato de que a adição de FGD nas misturas favorece a formação de Portlandita (Ca(OH)_2), que possui um formato pseudo-hexagonal, que ao se acomodarem, ficam com seus planos de clivagem paralelos a aplicação da carga, interferindo na Resistência à Tração, favorecendo a ruptura nessas direções (Teixeira, 2019).

Ao analisar o efeito da incorporação da EGAF, nota-se um aumento expressivo da resistência à tração, porém, quando o percentual de EGAF ultrapassou os 60% de incorporação, houve uma pequena redução no valor da resistência à tração.

Como visto anteriormente quando os níveis de substituição são muito altos, e conseqüentemente, a quantidade de cimento fica muito baixa, a hidratação da EGAF pode ficar prejudicada, uma vez que ela sendo básica necessita de um ambiente alcalino para iniciar suas reações, e o cimento, quando presente na mistura, faz o papel de ativador alcalino, favorecendo a dissolução dessa EGAF acelerando as suas reações. Quando esse ativador alcalino está presente, porém, em menor quantidade, resulta em matrizes com resistências mecânicas menores, para uma mesma idade.

O efeito da interação de todos os fatores pode ser observado na Figura 16.

Os maiores valores de resistência, independentemente da idade, foram alcançados nos traços com incorporação de 10% de FGD. Observa-se que as resistências aos 91 dias, foram iguais para os traços contendo 60% de EGAF, independente do percentual de incorporação de FGD.

Comportamentos semelhantes foram encontrados em outras pesquisas, Oliveira Júnior *et al.* (2009) e Teixeira (2019) não observaram ganhos de resistências estatisticamente relevantes de 28 para 91 dias, confirmando uma baixa influência da incorporação de FGD nessa propriedade.

Apesar da interação dos fatores FGD, EGAF e a idade não ter sido significativa, os gráficos foram apresentados, pois, facilitam o entendimento do comportamento.

Lee e Yoon (2015) ao avaliarem o efeito da incorporação de materiais cimentícios em concretos de alta resistência identificam a melhora da resistência à tração à medida que a incorporação de materiais cimentícios melhoram a propriedade de resistência à compressão, porém, observaram que ao variar o tipo e a composição do material cimentício não houve efeitos significativos na resistência à tração.

Figura 14 - Médias de resistência à tração por compressão diametral

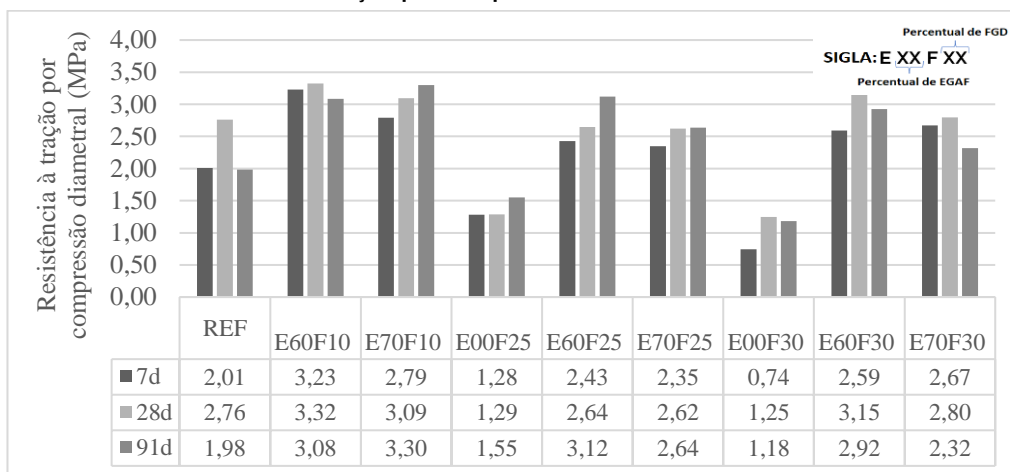


Tabela 8 - Análise estatística - tração

Fatores	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Probabilidade
%FGD	5,44	2	2,72	14,03	0,000	100,00%
%EGAF	68,18	2	34,09	175,78	0,000	100,00%
Idade	2,13	2	1,07	5,49	0,005	99,46%
%FGD*%EGAF	1,02	4	0,25	1,31	0,271	72,87%
%FGD*Idade	0,99	4	0,25	1,27	0,285	71,47%
%EGAF*Idade	0,13	4	0,03	0,17	0,954	4,61%
%FGD*%EGAF*Idade	1,91	8	0,24	1,23	0,288	71,18%
Erro	20,94	108	0,19			

Figura 15 - Efeito isolado do (a) % FGD e (b) %EGAF

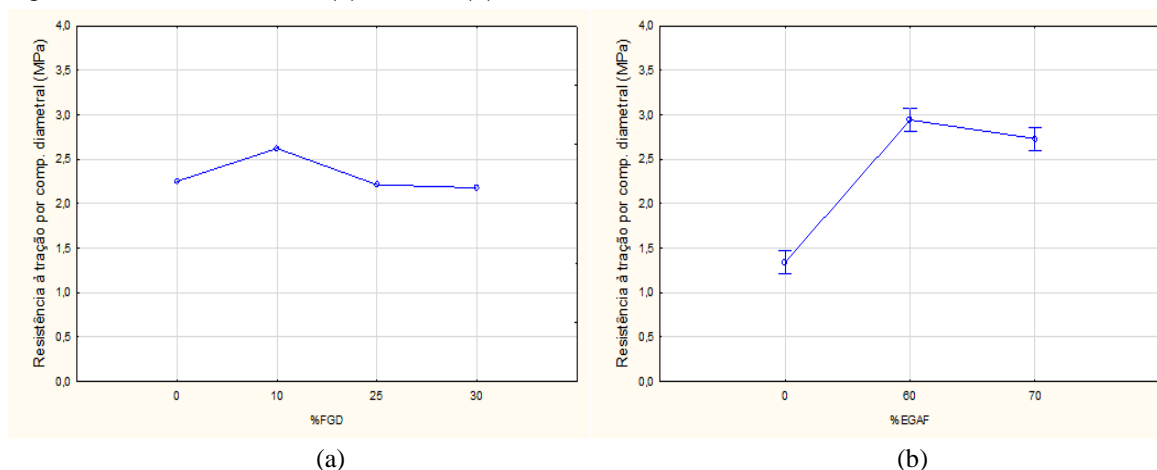
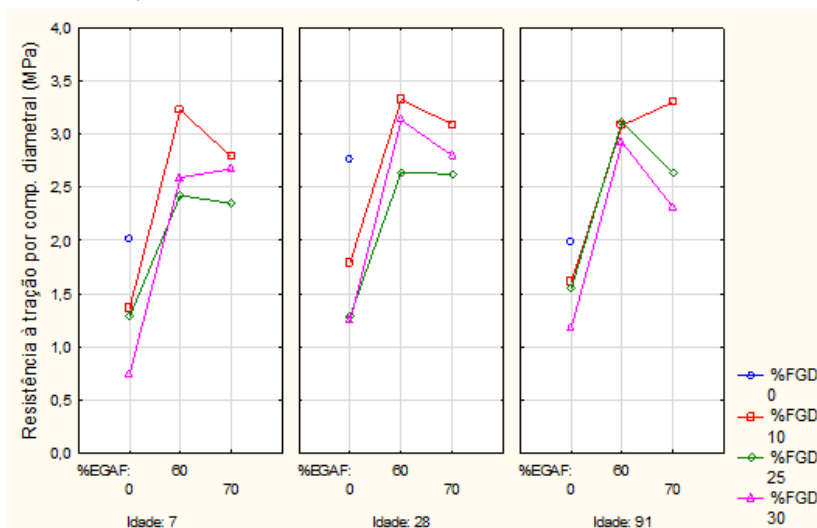


Figura 16 - Efeito da interação %FGD, %EGAF e a idade



Dessa forma, o aumento da resistência à tração é justificado pela melhora no desempenho frente a resistência à compressão e não propriamente por função de alguma característica do material cimentício.

Módulo de elasticidade dinâmico

Na Tabela 9 constam os resultados do ensaio de ultrassom de todos os traços ensaiados.

O módulo de elasticidade dinâmico e a capacidade da argamassa de absorver deformações são grandezas inversamente proporcionais, logo, quanto menor o valor do módulo, maior será a capacidade de absorver deformações (Silva, 2006).

O gráfico da Figura 17 foi elaborado para facilitar a visualização de todos os valores encontrados para essa propriedade, à medida que os percentuais de variação de FGD e EGAF foram alterados. Observou-se que a incorporação dos resíduos acarretou a diminuição do módulo de elasticidade. A única exceção foi o traço E60F10.

Ozbay *et al.* (2016) fizeram uma revisão de importantes pesquisas que utilizaram a incorporação de EGAF em matrizes cimentícias, e destacam que a propriedade do Módulo de Elasticidade não sofre tanta interferência com essa incorporação, comparada a propriedade de resistência à compressão, por exemplo. Atribuíram esse efeito ao fato de a incorporação de EGAF ser responsável pela diminuição da porosidade das misturas e pela formação adicional de C-S-H como resultado da reação pozolânica.

Os resultados desta pesquisa corroboram com essa conclusão de Ozbay *et al.* (2016), uma vez que as médias dos valores de Módulo de Elasticidade Dinâmico foram muito semelhantes, apesar dos diferentes percentuais de incorporação de EGAF e FGD nas misturas.

Absorção de água por capilaridade

Os resultados do Coeficiente de Capilaridade estão apresentados na Figura 18.

Observou-se que os coeficientes das matrizes contendo a incorporação isolada de FGD são superiores as matrizes contendo a incorporação de FGD e EGAF simultaneamente. Independente do traço, notou-se uma redução no coeficiente quando associado a incorporação da EGAF.

De acordo com Johari *et al.* (2011) os materiais cimentícios suplementares de uma forma geral, são responsáveis por uma diminuição do tamanho dos poros nas matrizes. Por outro lado, alguns materiais terão um efeito mais expressivo do que outros, devido a reatividade de cada material e a capacidade de atuar como preenchedor dos poros.

Dessa forma, pode-se inferir que o FGD não melhorou a porosidade da mistura, mas quando incorporado simultaneamente com a EGAF, contribuiu para a melhora dessa propriedade. Como já debatido anteriormente, a adição da EGAF torna as matrizes mais compactas, uma vez que reduz o tamanho dos poros.

Tabela 9 -Módulo de elasticidade dinâmico

Traço	Mód. Elasticidade (GPa)
REF	30
E60F10	32
E70F10	28
E00F25	28
E60F25	28
E70F25	29
E00F30	25
E60F30	29
E70F30	29

Figura 17 - Efeito da interação entre o %FGD e %EGAF

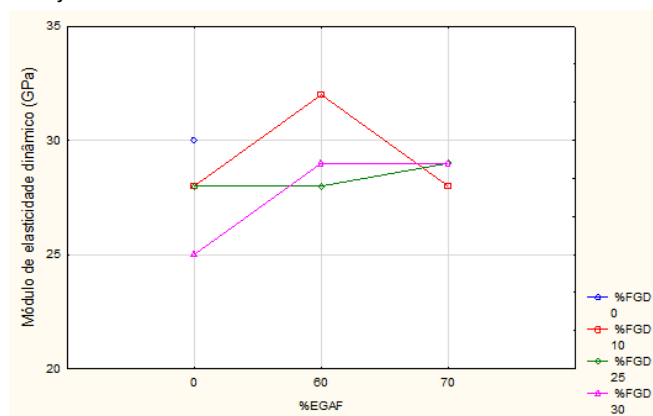
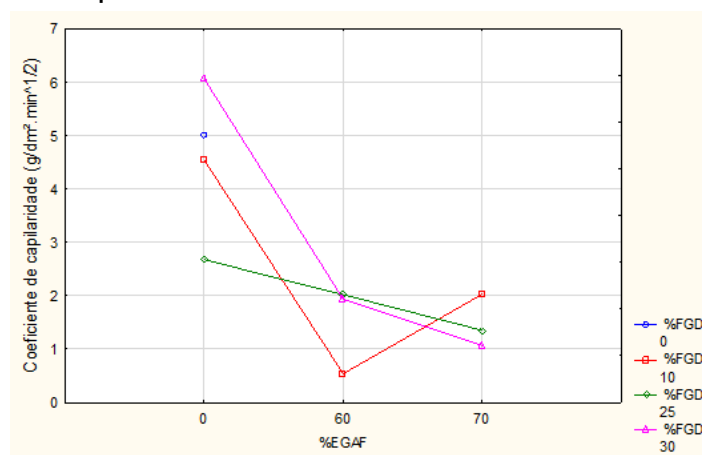


Figura 18 - Coeficiente de capilaridade



Teor de cloretos totais e sulfatos

A Tabela 10 apresenta os totais de cloretos e sulfatos encontrados.

Apesar do alto percentual de cloretos encontrados no ensaio de caracterização do FGD (4,08%), observa-se que ao incorporar o resíduo em matrizes cimentícias, esse percentual diminuiu drasticamente.

Teixeira (2019) descreve em sua pesquisa um comportamento semelhante. O FGD apresentou durante a caracterização valores altos de percentual de cloretos (6,50%), porém, os resultados dessa propriedade nos concretos foram inferiores. Esse efeito é provavelmente resultado do encapsulamento dos cloretos pela matriz de concreto, provavelmente pela reação com os aluminatos, promovendo a redução dos cloretos livres, obtendo valores compatíveis com o concreto referência.

Como não existe uma normatização para o teor máximo de cloretos em argamassas, utilizou-se os limites determinados para concreto armado (0,15%), para fins comparativos, logo, todos os traços teriam percentual de cloretos abaixo do máximo exigido pela norma.

No que diz respeito ao teor de sulfatos, dentre os valores encontrados, os traços E00F30 e E60F30 são os únicos que apresentaram valores superiores ao traço referência, no entanto, os resultados encontrados na matriz cimentícia são bem inferiores aos valores encontrados durante a caracterização dos resíduos. Dessa forma, foi possível inferir que parte desse sulfato pode ser da forma inerte e grande parte foi consumido para a formação de outros compostos.

Jiang *et al.* (2018) também estudaram a incorporação de FGD em matrizes com alto teor de EGAF e concluíram que os sulfatos foram o principal fator de ativação da EGAF nas primeiras idades, logo, parte dos sulfatos presentes na solução foram consumidos durante as reações de dissolução da EGAF.

Lei *et al.* (2017) identificaram que nas primeiras idades, os sulfatos se apresentam na forma de sulfoaluminato de cálcio hidratado monossulfatado (AFm) e que com o avanço da hidratação, é transformado em sulfoaluminato de cálcio hidratado trissulfatado (AFt), que preenche os poros, tornando a microestrutura da matriz mais compacta.

Zhong, Ni e Li (2012) avaliaram a liberação de sulfatos durante 3 semanas para analisar a quantidade de sulfatos liberados e concluíram que para argamassas com percentual de FGD igual ou inferior a 20%, essa liberação foi irrisória. Já para argamassas com percentual maior que 20% poderiam ocasionar um ataque moderado de sulfatos no concreto, sendo assim, recomendou a utilização da argamassa em materiais de baixa resistência, como rejuntamento, sub-base de estradas e concretos com baixa resistência.

Lixiviação de contaminantes

Os resultados calculados das taxas de lixiviação total (Ei), bem como os parâmetros U1 e U2 da norma estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 10 - Teor de cloretos e sulfatos

Traço	Teor de cloretos totais (%)	Teor de sulfatos (%)
REF	0,04%	0,71%
E60F10	0,03%	0,60%
E70F10	0,01%	0,38%
E00F25	0,07%	0,49%
E60F25	0,07%	0,64%
E70F25	0,11%	0,69%
E00F30	0,03%	0,86%
E60F30	0,12%	0,86%
E70F30	0,13%	0,56%

Tabela 11 - Taxa de lixiviação total em mg/m²

Elemento	Ei acumulado (mg/m ²)									Parâmetros (mg/m ²)	
	REF	E60F10	E70F10	E00F25	E60F25	E70F25	E00F30	E60F30	E70F30	U1	U2
As	ND*	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	40	300
Cd	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1	7,50
Cr	1,63	1,47	1,57	1,58	1,58	1,45	1,75	1,37	1,57	150	950
Cu	4,32	5,71	3,02	5,88	10,76	5,97	3,78	4,29	9,59	50	350
Pb	0,15	0,42	0,15	0,15	0,18	0,10	0,37	0,21	1,58	-	-
Mn	0,18	0,23	0,23	0,20	0,30	0,22	0,20	0,20	0,35	-	-
Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	-	-
Zn	6,00	17,11	18,16	5,52	15,02	6,20	16,96	12,25	14,06	200	1500

Nota: ND* - não detectável.

Verificou-se que todos os componentes estão com taxas de lixiviação total inferiores a U1. De acordo com a norma a classificação ambiental da matriz cimentícia vai interferir se o material poderá ou não ser utilizado nas edificações. Essa classificação pode ocorrer de 3 formas:

- (a) Taxa Ei de todos os elementos abaixo de U1 – Material sem restrição de uso;
- (b) Taxa Ei com valores entre U1 e U2 – Materiais sem restrição de uso, porém, ao final da sua vida útil será necessário a remoção e destinação adequada do material, para não ocorrer contaminação do ambiente; e
- (c) Taxa Ei com valores superiores a U2 – a utilização do material passa a ser restrita e para utilização, serão necessários tratamentos específicos para impossibilitar a lixiviação de contaminantes.

Dessa forma, segundo a classificação definida pela própria norma, todos os traços das matrizes cimentícias analisadas nessa pesquisa podem ser utilizados com segurança, uma vez que não houve lixiviação de nenhum contaminante em quantidade prejudicial. Isso significa que as argamassas pesquisadas com FGD e EGAF incorporadas em uma matriz cimentícia não acarretaram impactos ambientais negativos. Ou seja, os componentes químicos dos coprodutos que podem acarretar algum grau de periculosidade ambiental, apresentam um potencial de encapsulamento, quando incorporados em matrizes cimentícias de CP.

Conclusão

Considerações finais

Os resultados encontrados durante a execução deste trabalho indicam que a substituição do cimento pelos resíduos EGAF e FGD, principalmente de forma simultânea, foram satisfatórios em diversas propriedades. Abaixo estão descritas as principais considerações em cada propriedade:

- (a) índice de consistência: notou-se que a incorporação do FGD de forma isolada reduziu o espalhamento das amostras, devido a maior área superficial do resíduo e conseqüentemente maior necessidade de água na mistura, como o fator água/aglomerante foi fixado, houve a diminuição do espalhamento. Por outro lado, a associação dos dois resíduos melhorou o desempenho das matrizes, parte por conta da menor absorção de água pela EGAF e a melhora na dispersão das partículas de cimento;
- (b) densidade de Massa e teor de ar incorporado: os traços estudados apresentaram uma maior densidade de massa e conseqüentemente, um menor teor de ar incorporado nas misturas, com exceção dos traços contendo FGD isolado até 25%. A incorporação isolada do FGD até 25% não apresenta melhora dessas propriedades, porém, verifica-se que em maiores percentuais, o FGD se comporta como filler, preenchendo as zonas de transição e os poros das misturas, melhorando a densidade e conseqüentemente o teor de ar incorporado das matrizes cimentícias. Novamente, foi verificado uma melhora do desempenho ao utilizar os dois resíduos simultaneamente;
- (c) tempos de pega das misturas: quanto aos tempos de pega das misturas, verificou-se através das técnicas de calorimetria que o FGD, quando avaliado isoladamente, não proporciona o prolongamento dos tempos de indução das misturas, porém, observou-se uma redução da taxa de calor liberado quando comparado à referência. As amostras contendo a incorporação dos resíduos simultaneamente acarretou maiores tempos de pega e menores taxas de liberação de calor;
- (d) retenção de água: a substituição do cimento pelos resíduos não apresentou influencia nesta propriedade quando comparado ao traço contendo apenas CP;
- (e) a incorporação simultânea dos resíduos em substituição ao cimento melhorou o desempenho mecânico das argamassas;
- (f) resistência à compressão: os melhores resultados foram encontrados nas argamassas E60F10 e E70F10 de EGAF, o aumento das resistências foi de 40 e 46%, respectivamente, quando comparadas ao traço contendo somente cimento;
- (g) resistência à tração: os melhores desempenhos também foram encontrados nos traços E60F10 e E70F10, apresentando um incremento de 55 e 66% de resistência, respectivamente, quando comparados ao traço de referência. O traço com 0% de cimento, traço E70F30, obteve resistências superiores ao traço referência aos 28 dias, aumento de 8,5% de resistência à compressão e 17% de resistência à tração;
- (h) o ganho de desempenho mecânico nas argamassas com incorporação dos resíduos corrobora com os resultados encontrados de aumento da densidade de massa, a diminuição do teor de ar incorporado, a

consequente redução do tamanho de poros e a porosidade total das misturas. Além disso, a menor taxa de liberação de calor de hidratação.

- (i) módulo de elasticidade dinâmico: todos os traços contendo substituição obtiveram valores menores que o de referência, com exceção do traço E60F10 que obteve módulo de 32 GPa. A incorporação isolada de FGD apresentou ótimo desempenho nessa propriedade, o traço E00F30, com substituição de 30% de FGD apresentou uma redução de mais de 16% no módulo, o que aponta para um traço com maior capacidade de absorver deformações;
- (j) absorção e água por capilaridade: a incorporação isolada do FGD até 25% proporciona uma melhora nessa propriedade, com resultados de absorção de água por capilaridade inferiores ao de referência. Ao incorporar a EGAF simultaneamente com o FGD, o desempenho das argamassas é melhorado. O menor valor de absorção de água foi obtido no traço E60F10; e
- (k) cloretos e sulfatos: todos os traços apresentaram bom desempenho. No caso dos cloretos, não há um limitador para argamassas, porém, caso este trabalho fosse em concretos, todos os traços poderiam ser utilizados em elementos estruturais, pois, apresentaram o percentual de cloretos inferior a 0,15%. Dos valores que foram encontrados no ensaio de sulfatos os traços E00F30 e E60F30 são os únicos que apresentaram teor de sulfatos superior ao traço referência, no entanto, independentemente do valor de incorporação de FGD, os resultados encontrados nas argamassas foram bem inferiores aos valores encontrados durante a caracterização dos resíduos.

Os resultados de lixiviação de contaminantes demonstraram que todos os traços propostos podem ser utilizados com segurança, uma vez que não houve lixiviação de nenhum contaminante em quantidade prejudicial ao meio ambiente.

Conclusão

Os resultados encontrados demonstram que a utilização simultânea dos resíduos em argamassas foi satisfatória, uma vez que apresentaram melhores desempenhos mecânicos e de durabilidade. Os menores valores de módulo de elasticidade e menor absorção de água por capilaridade, representam argamassas com maior durabilidade, uma vez que é menos propensa a formação de fissuras e menor a chance de penetração de qualquer agente agressivo. Além disso, todas as amostras apresentaram ótimo desempenho frente aos ensaios de cloretos totais e sulfatos.

Portanto, os estudos apresentados demonstram que a utilização de FGD e EGAF simultâneos para substituir o CP são satisfatórios, obtendo desempenhos mecânicos e de durabilidade superiores aos de referência, além de segurança ambiental, viabilizando a utilização desses resíduos na produção de matrizes cimentícias com baixo teor de cimento.

Sugestão para trabalhos futuros

Sugere-se a continuação do estudo para formulação de uma argamassa com a substituição de Cimento Portland por FGD e EGAF objetivando o desenvolvimento de novos estudos para fomentar o conhecimento e possibilitar a aplicação real das misturas nas edificações. Para tanto, recomenda-se os seguintes trabalhos:

- (a) estudar o comportamento das resistências mecânicas das argamassas, principalmente, resistência à compressão, em idades superiores a 91 dias, objetivando a verificação do comportamento a longo prazo;
- (b) estudar novos traços das argamassas, como o traço E00F10, para verificar se a substituição isolada de FGD, porém, em baixos percentuais, também ocasionam a diminuição dos tempos de pega. Dessa forma, o resíduo pode ser utilizado como um aditivo acelerador de pega nas misturas;
- (c) realizar ensaios microestruturais (MEV) com maior precisão, possibilitando uma identificação e análise mais assertiva dos compostos hidratados formados, inclusive a identificação de formação de etringita tardia; e
- (d) avaliar a morfologia das partículas de resíduo por meio de coeficiente de forma, angularidade e rugosidade para verificar em quais propriedades, principalmente no estado endurecido, essas características morfológicas podem ter influenciado.

Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 233R03**: slag cement in concrete and mortar. Detroit, 2005.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: cimento Portland: determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**: cimento Portland: determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14656**: cimento Portland e matérias-primas: análise química por espectrometria de raios X: métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15630**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2018a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: cimento Portland: determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro, 2018c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: cimento Portland: determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndrico. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 13**: cimento Portland: análise química: determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 2013a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 15**: cimento Portland: análise química: determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 16**: cimento Portland: análise química: determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2012c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: cimento Portland: análise química: determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: agregados: redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2000.
- BENTZ, D.; SANT, G.; WEISS, W. Early-age properties of cement-based materials. I: influence of cement fineness. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 20, n. 7, 2008.
- BETIOLI, A. M. *et al.* Effect of HMEC on the consolidation of cement pastes: isothermal calorimetry versus oscillatory rheometry. *Cement and Concrete Research*, v. 39, n. 5, p. 440-445, 2009.
- CABRERA-MADRID, J. A.; ESCALANTE-GARCÍA, J. I.; CASTRO-BORGES, P. Resistencia a la compresión de concretos con escoria de alto horno. Estado del arte re-visitado. *Revista ALCONPAT*, v. 6, p. 64–83, 2016.

- CARPENTER, A. M. **Low water FGD Technologies**. London: IEA Clean Coal Centre, 2012.
- CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL. **Laboratório da Sede Regional do Espírito Santo**. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2023.
- DAI, J. *et al.* Effect of content and fineness of GGBS on pore structure of cement paste. **Journal of Wuhan University of Technology - Materials Science**, v. 37, p. 933-947, 2022.
- FRANÇA, Í. W. L. de. **Avaliação do efeito de aditivos na dessulfuração de gases de combustão (FGD) em unidade piloto de DAS**. Fortaleza, 2019. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- GUO, X.; SHI, H. Influence of thermally treated Flue Gas Desulfurization (FGD) gypsum on performance of the slag powder concrete. **Journal of Wuhan University of Technology Materials Science**, v. 28, p. 1122-1127, 2013.
- JIANG, L. *et al.* Utilization of flue gas desulfurization gypsum as an activation agent for high-volume slag concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 205, 2018.
- JOHARI, M. A. M. *et al.* Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. **Construction and Building Materials**, p. 2639-2648, 2011.
- JUENGER, M. C. G. *et al.* Advances in alternative cementitious binders. **Cement and Concrete Research**, v. 41, 2011.
- LEE, J. H.; YOON, Y. S. The effects of cementitious materials on the mechanical and durability performance of high-strength concrete. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 19, p. 1396-1404, 2015.
- LEI, D.-Y. *et al.* Study on properties of untreated FGD gypsum-based high-strength building materials. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 765-773, 2017.
- NETHERLANDS STANDARDIZATION INSTITUT. **EA NEN 7375**: leaching characteristics of moulded or monolithic building and waste materials. Delft, 2004.
- OLIVEIRA JUNIOR, L. A. *et al.* Influence of steel fibers and mineral additions on cracking behavior of reinforced concrete tension members. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 2, n. 2, p. 142-165, 2009.
- OZBAY, E. *et al.* Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties--a review. **Construction and Building Materials**, v. 105, Feb. 2016.
- RUBERT, S. *et al.* Hydration mechanisms of supersulfated cement. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 1, p. 1-10, 2018.
- SCRIVENER, K.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. **Eco-efficient cements**: potential, economically viable, solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry. Paris: UN Environment, 2016.
- SILVA, M. G. da (coord.). **Concreto de alto desempenho com elevados teores de escória de alto-forno**: estratégia para consolidar o mercado da escória de alto-forno. Vitória: Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, 2006. Relatório Técnico, Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas (NEXES).
- TEIXEIRA, R. A. **Concretos produzidos com adição de resíduo proveniente do sistema de dessulfuração de gases (FGD): avaliação de aspectos mecânicos, ambientais e de durabilidade**. Vitória, 2019. 202f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.
- THOMAZ, E. C. S. **Propriedades dos concretos nos primeiros dias**: influência da finura dos cimentos: análise de artigos do autor Dale P. Bentz. Notas de aula. 2010.
- VAZ, F. H. B.; CARASEK, H. Resistência de aderência de revestimentos de argamassa - contribuição por meio de mapeamento e revisão sistemática de literatura para futuras pesquisas no tema. **Cerâmica**, v. 65, n. 374, p. 303-318, 2019.
- ZHONG, S.; NI, K.; LI, J. Properties of mortars made by uncalcined FGD gypsum-fly ash-ground granulated blast furnace slag composite binder. **Waste Management**, v. 32, p. 1468-1472, 2012.

Luciana Paula Tessaro Morelo

Conceitualização, Curadoria de Dados, Análise de Dados, Pesquisa, Metodologia, Validação de Dados e Experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Centro Tecnológico | Universidade Federal do Espírito Santo | Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras | Vitória - ES - Brasil | CEP 29060-390 | Tel.: (27) 99203-1224 | E-mail: lptmorelo@gmail.com

Geilma Lima Vieira

Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Supervisão, Validação de dados e experimentos Redação - revisão e edição.

Centro Tecnológico | Universidade Federal do Espírito Santo | Vitória - ES - Brasil | Tel.: (27) 99232-5753 | E-mail: geilma.vieira@ufes.br

Editor: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.