



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ERIC MATHEUS ANDRADE RODRIGUES

**DESENVOLVIMENTO DE CIMENTO SUPERSULFATADO COM A
INCORPORAÇÃO DE ESCÓRIA BASIC OXYGEN FURNACE (BOF)**

CRATEÚS
2023

ERIC MATHEUS ANDRADE RODRIGUES

DESENVOLVIMENTO DE CIMENTO SUPERSULFATADO COM A INCORPORAÇÃO
DE ESCÓRIA BASIC OXYGEN FURNACE (BOF)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dra. Heloína Nogueira da Costa.

CRATEÚS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- R612d Rodrigues, Eric Matheus Andrade Rodrigues.
Desenvolvimento de Cimento Supersulfatado com a incorporação de escória Basic Oxygen Furnace (BOF) / Eric Matheus Andrade Rodrigues Rodrigues. – 2023.
52 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Heloína Nogueira da Costa.
1. Cimento supersulfatado. 2. Escória de aciaria BOF. 3. Resistência à compressão. I. Título.
CDD 620
-

ERIC MATHEUS ADNDRADE RODRIGUES

DESENVOLVIMENTO DE CIMENTO SUPERSULFATADO COM A INCORPORAÇÃO
DE ESCÓRIA BASIC OXYGEN FURNACE (BOF)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Civil.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Heloína Nogueira da Costa (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Jorge Luis Santos Ferreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ma. Tatiane Lima Batista
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus e a toda a minha família, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me deu força e determinação para concluir meus objetivos ao longo dessa caminhada.

A professora Dra. Heloína Nogueira da Costa, pela sua ótima orientação seja na parte de disponibilidade, ajuda ou dedicação, auxiliando nas diversas etapas e sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.

Aos professores participantes da banca examinadora Mestre Jorge Luis Santos Ferreira e a Mestra Tatiane Lima Batista, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Agradeço também ao Laboratório de Materiais da Construção Civil do Campus de Crateús e o do Campus de Fortaleza, as quais disponibilizaram o espaço para a minha pesquisa, e além disso, agradeço também ao meu Grupo de Pesquisa em Reaproveitamento de Resíduos e Subprodutos para a Produção de Cimentos Ambientalmente Amigáveis (ReActive) que muito colaborou na realização deste trabalho.

Também deixo aqui minha gratidão aos meus pais, Edigar e Alexandra, que nunca mediram esforços para proporcionar tudo que eu precisasse e sempre me deram apoio, amor e sempre me inspiraram e motivaram a alcançar meus objetivos. As minhas irmãs, Ávilla e Ellen, as quais me encorajaram a superar desafios e demonstraram sempre o seu amor e suporte nos mais diversos momentos. Além deles, também quero citar mais pessoas da minha família as quais muito me ajudaram ao longo desse trajeto, sendo meus avôs, Fernando, Lúcia e Antônia, meus primos, Levi e Mariah e meus tios, Railson e Daniele. Agradeço a toda a minha família que me ajudou ao longo de não apenas esse ciclo universitário e neste trabalho, mas também durante toda a minha vida. Sem o apoio deles, esse trabalho não seria possível ser realizado.

Agradeço também, a minha namorada Mylenna, que acompanhou todo esse ciclo me dando força, amor e amizade, nos mais variados momentos, me guiando a ter resiliência nas diversas situações e ajudando firmemente na construção desse trabalho, sem ela este trabalho não poderia ter sido realizado.

Agradeço também, aos meus amigos Iuri, Helber, Vanutti e Michael Douglas, que estiveram presentes em vários trabalhos, dificuldades, conquistas e momentos no geral, aos quais me fortaleceram com sua amizade. Além deles, também agradeço a todos os meus colegas de faculdade e professores que me ajudaram de alguma maneira ao longo desse trajeto.

E por fim, também quero agradecer aos meus amigos de fora da faculdade, sendo o Eduardo, Felipe, Gabriel, Jonatas, Matheus e Natã, pela amizade e o apoio de muito tempo, e que também demonstraram ao longo dessa etapa.

“O que não te desafia, não te transforma,
crescer dói e dá trabalho.”

(CARNEIRO, CAIO 2020)

RESUMO

A grande e constante produção de cimento tem uma expressiva parcela de liberação de dióxido de carbono (CO₂), sendo extremamente prejudicial para o meio ambiente. Por isso, nota-se a constante busca por fontes alternativas, como é o caso do cimento supersulfatado (CSS), que é constituído por escória de alto forno, sulfato de cálcio e algum ativador alcalino. No Brasil, esse cimento tem pouco destaque, enquanto em outros países tem uso difundido, inclusive possuindo normas regulamentadoras específicas. Em paralelo, milhões de toneladas de aço são produzidas diariamente, tendo a escória de alto forno maiores índices de reaproveitamento, enquanto, os outros tipos de escória são pouco usufruída, como é o caso da escória basic oxygen furnace (BOF). Esta escória foi utilizada em diversos trabalhos voltados ao uso como agregados ou materiais cimentícios suplementares. Contudo, foi pouco explorada na literatura para a produção desse tipo de cimento. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver cimento supersulfatado com a incorporação de escória BOF, sendo realizadas pastas de CSS com diferentes composições em suas matrizes cimentícias. Foram produzidas pastas cimentícias e realizada a análise mecânica de cada pasta, por meio do ensaio de resistência à compressão aos 7 e 28 dias. Também foi realizada uma análise estatística utilizando o Statistica versão 7.0. As baixas resistências à compressão encontradas se devem, muito provavelmente, ao fato das escórias utilizadas não atenderem as exigências mínimas da norma europeia EN 15743/2010. As análises estatísticas demonstraram que existiu uma significativa diferença na resistência mecânica entre as pastas de CSS. Também foi feita a análise microestrutural, por meio das imagens obtidas com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), e as análises térmicas realizadas com a Termogravimetria (TGA) e a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), sendo possível identificar que as pastas com a escória BOF tiveram a cinética de reação alterada, com relação ao processo de hidratação do cimento supersulfatado. Essa identificação se torna possível a partir da correlação das imagens microscópicas obtidas e os gráficos de temperatura gerados nos quais apontam o pico da reação de cada composto das amostras confeccionadas de CSS.

Palavras-chave: Cimento supersulfatado. Escória de aciaria BOF. Resistência à compressão.

ABSTRACT

The large and constant production of cement has a significant amount of CO₂ release, with carbon dioxide being extremely harmful to the environment. That is why the constant search for alternative sources, such as supersulfated cement (SSC) since it is made up of blast furnace slag, calcium sulfate and some activator alkaline. In Brazil, there is still no great emphasis on CSS, although in other countries there is even a specific standard. Even so, millions of tons of steel are produced daily, with only blast furnace slag a highlight for reuse, while the others are little used, as is the case of basic oxygen furnace (BOF) slag. The last mentioned slag has already demonstrated its usefulness in several works depending on its composition, however, little explored in the literature for the production of this type of cement. Therefore, the present work seeks to develop supersulfated cement with the incorporation of BOF slag, using CSS pastes with different compositions in their cementitious matrices. Then, the mechanical analysis of each paste is carried out, through the compressive strength test at 7 and 28 days, verifying that there is a significant difference in relation to the values found for each paste. A statistical analysis was also performed using Statistica version 7.0. The low compressive strengths found are most likely due to the fact that the slag used does not meet the minimum requirements of the European standard EN 15743/2010. Statistical analyzes showed that there was a significant difference in mechanical strength between CSS pastes. A microstructural analysis was also carried out, using images obtained with the Scanning Electron Microscope (SEM), and thermal analyzes performed with Thermogravimetry (TGA) and Differential Scanning Calorimetry (DSC), making it possible to identify that the pastes with the BOF slag had altered reaction kinetics in relation to the hydration process of the supersulfated cement. This identification becomes possible from the correlation of the microscopic images obtained and the temperature graphs generated, which indicate the peak of the reaction of each compound in the samples made from CSS.

Keywords: Supersulfated Cement. BOF steel slag. Compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Representação do processo de hidratação do cimento supersulfatado, sendo A e B escórias de alta reatividade e C e D, escórias de baixa reatividade	22
Figura 2	– Liberação de calor acumulada durante o processo de hidratação do CSS	23
Figura 3	– Fluxograma das etapas da pesquisa.....	29
Figura 4	– a) GGBS natural; b) GGBS após o peneiramento; c) BOF natural; d) BOF após o peneiramento	30
Figura 5	– a) exposição dos moldes; b) moldes com os corpos de prova	32
Figura 6	– Corpo de prova submetido ao ensaio de resistência à compressão.....	33
Figura 7	– Microscopia eletrônica de varredura da amostra T1 (GGBS + Sulfato de Cálcio + Cimento Portland).....	38
Figura 8	– Microscopia eletrônica de varredura da amostra T2 (GGBS + Sulfato de Cálcio + CaOH)	39
Figura 9	– Microscopia eletrônica de varredura da amostra T3 (GGBS + Sulfato de Cálcio + NaOH).....	40
Figura 10	– Microscopia eletrônica de varredura da amostra T4 (GGBS + BOF + Sulfato de Cálcio + Cimento Portland).....	41
Figura 11	– Microscopia eletrônica de varredura da amostra T5 (GGBS + BOF + Sulfato de Cálcio + CaOH).....	42
Figura 12	– Microscopia eletrônica de varredura da amostra T6 (GGBS + BOF + Sulfato de Cálcio + NaOH).....	43
Figura 13	– Termogravimetria e Calorimetria Exploratória Diferencial de cada traço de CSS.....	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resistência à compressão do CSS em cada traço.....	35
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cimento Supersulfatado	19
Tabela 2 – Características físicas das escórias.....	30
Tabela 3 – Porcentagem da composição em massa de óxidos das escórias	31
Tabela 4 – Tabela de traço para a composição do CSS (em porcentagem/gramas).....	32
Tabela 5 – ANOVA das variáveis analisadas para as pastas de CSS em cada período....	36
Tabela 6 – Teste de Tukey das variáveis analisadas para as pastas de CSS.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Analysis of Variance
BOF	Basic OxygenFurnace
CSS	Cimento Supersulfatado
GGBS	Escória granulada de alto forno
IABr	Instituto Aço Brasil
LMCC	Laboratório de Materiais da Construção Civil
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
pH	Potencial hidrogênico
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contextualização	16
1.2	Objetivo Geral	17
1.3	Objetivos específicos.....	17
1.4	Justificativa.....	17
1.5	Delimitação de estudo.....	18
1.6	Estrutura de Pesquisa.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Cimento Supersulfatado.....	19
<i>2.1.1</i>	<i>História.....</i>	<i>19</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Principais características.....</i>	<i>19</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Matéria-prima e processo de hidratação.....</i>	<i>21</i>
<i>2.1.4</i>	<i>Vantagens e desvantagens.....</i>	<i>25</i>
<i>2.1.5</i>	<i>Principais utilizações</i>	<i>26</i>
2.2	Escória BOF.....	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1	Materiais	29
<i>3.1.1</i>	<i>Escórias</i>	<i>29</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Ativadores</i>	<i>31</i>
3.2	Métodos.....	31
<i>3.2.1</i>	<i>Traços para confecção do cimento supersulfatado</i>	<i>31</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Ensaios</i>	<i>32</i>
<i>3.2.2.1</i>	<i>Resistência à compressão.....</i>	<i>32</i>
<i>3.2.2.2</i>	<i>Microscópio eletrônica de varredura (MEV).....</i>	<i>33</i>
<i>3.2.2.3</i>	<i>Termogravimetria (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)</i>	<i>34</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Resistência à compressão	35
4.2	Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	38
4.3	Termogravimetria (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	43
5	CONCLUSÃO	46
5.1	Sugestões de trabalhos futuros	46
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A grande quantidade de produção do cimento Portland (CP) afeta diretamente, e de maneira negativa, o meio ambiente. As buscas por aglomerantes alternativos que permita a redução do consumo desse material são intensas, e dentre eles pode-se citar o cimento supersulfatado (CSS). Este tipo de cimento geralmente tem sua composição constituída de escória de alto forno (80%-85%), sulfato de cálcio (10% - 15%) e algum ativador alcalino (cerca de 5%), sendo por exemplo o cimento Portland (LUZ; HOOTON, 2019).

A matriz cimentícia do CSS é livre, ou quase livre, de clínquer que é um componente do cimento Portland que demanda bastante energia e liberação de CO₂ em sua fabricação, agredindo em grande escala o meio ambiente (GRACIOLI *et al.*, 2015). O destaque para esse tipo de cimento não se deve apenas ao menor impacto ambiental, mas também ao seu menor calor de hidratação e ter uma boa durabilidade a agentes químicos (JUENGER *et al.*, 2011).

A escória granulada de alto-forno (GGBS) é o material com a maior porcentagem na composição do cimento supersulfatado (CSS). A GGBS tem sua obtenção no processo de redução do minério de ferro, nas siderúrgicas, e sua composição química está fortemente relacionada ao tipo de combustível (carvão mineral ou vegetal) utilizado na produção do ferro gusa (BEUTLER; LUZ; BONINI, 2020).

Além desse tipo de escória, também são geradas outras escórias de aciarias no processo siderúrgico. Enquanto a escória granulada de alto-forno é amplamente utilizada na fabricação do cimento Portland, as escórias de aciaria já são comumente descartadas (COSTA, 2020). Dentre essas escórias de aciaria pode-se destacar a escória Basic Oxygen Furnace ou Forno de Oxigênio Básico (BOF). Esse tipo de escória tem sua produção realizada durante o processo de transformação do ferro-gusa proveniente do alto-forno siderúrgico em aço (XIE *et al.*, 2017). Estima-se que a produção de escória BOF represente cerca de 10 % em peso do aço produzido no processo do conversor (ZEPPER *et al.*, 2022). No Brasil, em 2017, a produção de aço bruto foi 11,1 Milhões de toneladas (IABr, 2017), sendo que para cada tonelada de aço gerado, cerca de 120 kg são de escória BOF (WIMMER *et al.*, 2014). Desse modo, a disponibilidade do material atrai a atenção de pesquisadores para utilização como alternativa ao cimento Portland (HAN *et al.*, 2015; LI, 2003).

A partir desse contexto, o presente trabalho busca verificar o desenvolvimento do cimento supersulfatado com a incorporação da escória BOF, com o intuito de encontrar uma

alternativa para a composição e fabricação desse tipo de cimento, com um melhor aproveitamento de resíduos e que seja eficiente para os seus diversos fins.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo principal é produzir cimento supersulfatado com a incorporação da escória BOF em sua composição.

1.3 Objetivos específicos

Objetivos específicos:

1. Verificar a resistência à compressão do cimento supersulfatado formado com três diferentes ativadores alcalinos, sem e com a presença de escória BOF em sua composição;
2. Avaliar a formação de produtos cimentantes por meio das análises microestrutural e térmica;

1.4 Justificativa

A alternativa pelo cimento supersulfatado (CSS) se deve principalmente ao fato da sua produção ser quase isenta de calcário, e com isso se tem menores gastos energéticos e um menor impacto ambiental com a diminuição dos gases responsáveis pelo efeito estufa (GRACIOLI, *et al.*, 2020).

Do ponto de vista econômico, a partir do uso do CSS seria possível obter uma matriz cimentícia de menor custo, uma vez que, grande parte da sua composição é originada de resíduos que seriam descartados como é o caso da GGBS e BOF, diminuindo assim a grande quantidade extração de novos recursos de produção.

No âmbito ambiental, o baixo ou nulo teor de clínquer do cimento supersulfatado é importante para o meio ambiente, já que o clínquer é o responsável pela emissão da maior quantidade CO₂ na indústria do cimento. Em 2016, a produção de cimento foi responsável por gerar cerca de 2,2 bilhões de toneladas de CO₂, o que equivale a 8% do total mundial (BBC NEWS, 2018). Por isso, é essencial aproveitar o máximo dos resíduos gerados na indústria do aço, a fim de diminuir esse impacto ambiental.

A originalidade da pesquisa está relacionada ao uso da escória BOF em cimento supersulfatado, que pode trazer para a sociedade uma nova alternativa de material cimentício. Além de agregar à literatura e ao mercado da construção civil novas alternativas de materiais a serem estudados e futuramente aplicados, também pode diminuir consideravelmente os impactos causados ao planeta Terra, que tem como uma grande preocupação as substâncias agravantes para o aquecimento global, como é o caso do gás carbônico (CO₂).

1.5 Delimitação de estudo

Esse estudo delimita-se a analisar a viabilidade da incorporação da escória BOF na confecção de cimento de supersulfatado (CSS), à base de escória de alto forno, ativado com sulfato de cálcio e álcalis.

1.6 Estrutura de Pesquisa

O presente trabalho está dividido em cinco etapas: introdução, referencial teórico, materiais e métodos, resultados e discussões, por fim, as conclusões.

Na seção introdução, encontra-se o contexto da pesquisa, introduzindo o conceito de cimento supersulfatado e apresentando os objetivos da pesquisa e sua justificativa. Posteriormente, no referencial teórico serão abordados os tópicos do cimento supersulfatado e da escória BOF.

Em seguida são apresentados os materiais e métodos, onde se encontra uma descrição das características dos materiais e procedimentos metodológicos. Logo após são apresentados resultados e discussões sobre cada caso da pesquisa realizada. Por fim, as conclusões do trabalho e as referências bibliográficas utilizadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico está apresentada a história do CSS, assim como, as principais características, as principais utilizações, as vantagens e as desvantagens. Além disso, também têm-se as principais características das escórias de alto forno e a da escória BOF (basic oxygen furnace), sulfato de cálcio e os ativadores alcalinos.

2.1 Cimento Supersulfatado

2.1.1 História

Em 1908, o cimento supersulfatado foi desenvolvido e patenteado pelo químico alemão Hans Kühl (PINTO; JUNIOR; LUZ, 2018). O início da sua produção ocorreu pelos anos de 1914, na Alemanha e em 1932, na França e Bélgica (AITCIN, 2008). E o grande ponto para a sua utilização foi com a descoberta de que as escórias de alto forno, antes pouco utilizadas, possuem características de ligantes hidráulicas resistentes, ou seja, demonstraram ter boas características aglomerantes, como o clínquer, na presença de água (RUBERT, 2015). Devido à escassez do clínquer de cimento Portland, depois da Segunda Guerra Mundial, ocorreu um aumento na utilização desse tipo de cimento (JUENGER *et al.*, 2011).

No entanto, devido à mudança de matérias-primas utilizadas nos processos siderúrgicos, principalmente o teor de óxido de alumínio (Al_2O_3), em 1970 a utilização do CSS foi reduzida por ter a composição química da escória alterada (JUENGER *et al.*, 2011; GRUSKOVNJAK, *et al.*, 2008).

Mais tarde, ao longo da década de 1990, esse tipo de cimento voltaria a ser amplamente divulgado, sendo normatizado pela norma europeia EN 15743/2010 e indiana IS 6909/1990.

2.1.2 Principais características

A partir da norma EN 15743/2010 foi possível estabelecer os percentuais de referência para a composição do cimento supersulfatado. A norma em questão ainda busca padronizar a confecção do cimento supersulfatado para que se tenha um ponto de referência, como pode ser ilustrado na Tabela 1:

Tabela 1 – Cimento Supersulfatado

TIPO	NOTAÇÃO	COMPOSIÇÃO (porcentagem em massa) ^{a)}	
		Constituintes Principais	Constituintes adicionais

			Escória granulada de alto-forno S	Sulfato de cálcio Cs	Cimento Portland K	Outros A
CSS	Cimento Supersulfatado	CSS	≥ 75	$5 \geq Cs \geq 20$	$0 \geq K \geq 5$	$0 \geq A \geq 5$
a) Os valores da tabela referem-se à soma dos constituintes principais e dos constituintes adicionais.						

Fonte: Adaptado da norma europeia EN 15743/2010.

Para a norma europeia, não se tem uma exigência de quantidade mínima de óxido de alumínio (Al_2O_3) contida na escória, porém requer duas condições que são:

- a) Que a soma dos principais óxidos ($CaO + MgO + SiO_2$) da escória seja maior ou igual que 66,7%;
- b) Que a relação $(CaO + MgO) / SiO_2$ deve apresentar um valor maior que um (1).

Por outro lado, a norma indiana IS 6909/1990 detalha os requisitos para a produção e teste de cimento supersulfatado. Ainda é destacada a forma de produção na qual descreve a necessidade de ser feito por moagem ou de uma mistura de escória granulada de alto forno, sulfato de cálcio e uma pequena quantidade de cimento Portland comum, ou ainda qualquer outra fonte de cal. O cimento ainda deve ser moído mais fino do que o cimento Portland comum, e o método de fabricação seco granulada da escória de alto-forno da mistura deve ser pelo menos 70% em massa. O cimento supersulfatado deve atender aos requisitos químicos quando testado pelos métodos da IS 4032:1985. Também deve atender os requisitos físicos especificados pela norma indiana, como o caso de ter que apresentar um módulo de finura inferior a 400 m^3/Kg e apresentando uma expansão, de acordo com a IS 4031 (Part 3):1988, que seja inferior a 5 mm, além do tempo de pega especificado na mesma norma, que não pode ser inferior a 30 minutos e nem superior a 600 minutos. Tanto o fabricante deve garantir que o tipo de cimento atenda essas especificações, como também o laboratório no qual farão os testes correspondentes deve ser mantido adequado de acordo com os métodos da norma.

O CSS possui baixo gasto energético e tem sua composição praticamente isenta de clínquer, o que são aspectos importantes (WOLTRON, 2009). Vale destacar que uma das suas principais características é a boa resistência ao ataque de sulfato de sódio (TRENTIN, 2020), o que o torna interessante em aplicações em ambientes agressivos.

2.1.3 *Matéria-prima e processo de hidratação*

A escória de alto forno é a matéria-prima base para a produção de CSS. Esse material é um subproduto gerado na produção de ferro-gusa, formado da reação entre a dolomita, o calcário e as cinzas do carvão mineral, com as impurezas do minério de ferro. Em 2013, no Brasil, foi gerado cerca de 590 Kg de escória de alto-forno por tonelada de aço produzido, sendo que nesse mesmo ano, o setor siderúrgico foi responsável pela produção de cerca de 34,2 milhões de toneladas de aço (PICANÇO *et al.*, 2017).

Durante a produção do ferro gusa, o alto-forno é carregado com o minério de ferro (uma mistura de óxido de ferro, sílica e alumina). Em seguida, para retirar as impurezas desse minério, é comum utilizar um material fundente, como o calcário (CaO_3) (WANG, 2016). Dentre os resíduos gerados nesse processo, o principal é o dióxido de silício (SiO_2), que em reação com o óxido de cálcio (CaO), o óxido de magnésio (MgO) e a alumina (Al_2O_3), formam a escória (MASOUDI, 2018).

Segundo Gruskovnjak *et al.* (2008), ainda que a escória seja totalmente amorfa, a sua composição química deve ser apropriada para se obter resultados satisfatórios na fabricação de CSS. Um fator de grande contribuição para obtenção de maiores resistências à compressão do cimento supersulfatado é a quantidade dos óxidos de CaO e Al_2O_3 na escória de alto forno, uma vez que determina as reações de hidratação no tempo conveniente para as possíveis aplicações (LIU *et al.*, 2015).

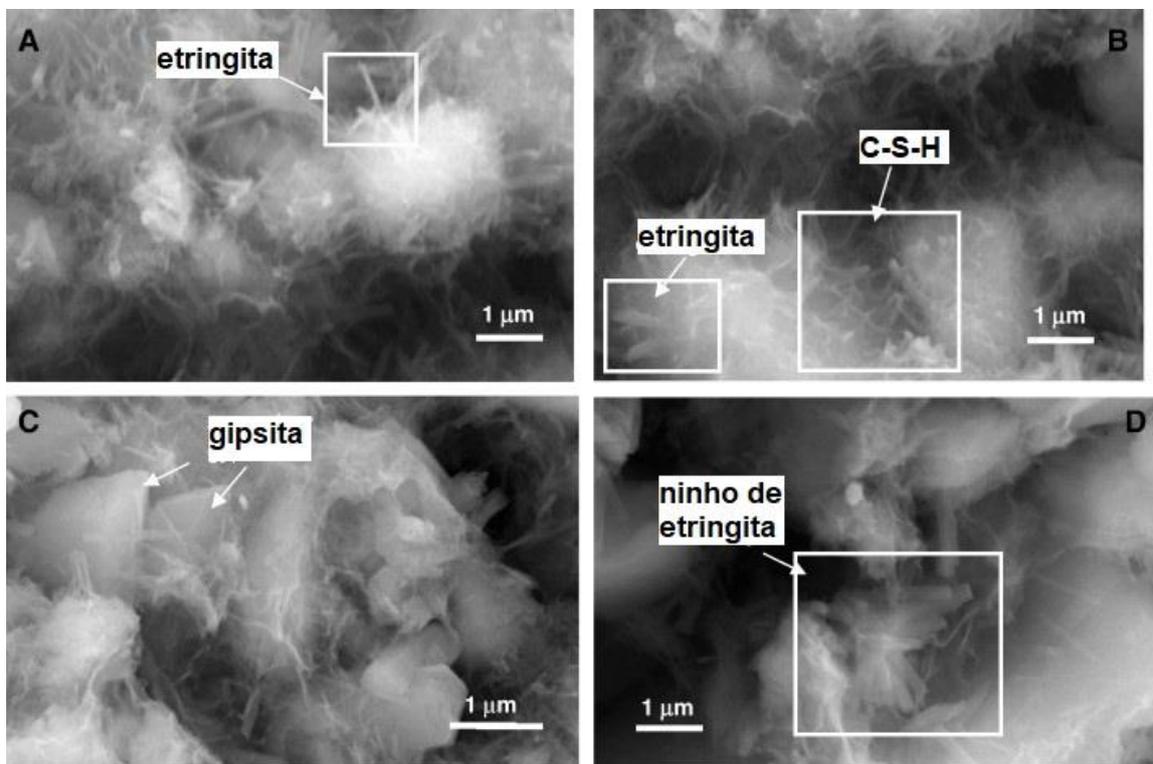
Além da composição química, a finura da escória está diretamente relacionada à melhora na reação por conta da maior superfície de contato (HOOTON, 2000). Com isso, o aumento da finura do material, irá melhorar a resistência à compressão do cimento ao longo do tempo.

Os autores Gruskovnjak *et al.* (2008) também identificaram que escórias de alta reatividade é um fator que determina um maior desenvolvimento de resistência mecânica nas idades iniciais. Contudo, as escórias de baixa reatividade adicionadas de hidróxido de cálcio e sulfato de alumínio demonstram ter um bom aumento de resistência mecânica, entre 7 e 28 dias, chegando a ser até superior ao da escória com alta reatividade. Vale salientar que a reatividade estar ligada à solubilidade que a escória possui, uma vez que as escórias precisam de um ambiente mais alcalino para que sejam ativadas, na reação, e tomem um aspecto vítreo desejado.

Os autores supracitados, ainda fizeram a análise por meio de imagens obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV), como está representada na Figura 1. Para isso

eles utilizaram escórias com alta reatividade (HR – High reactivity) e com baixa reatividade (LR – Low reactivity), na fabricação de CSS, e uma composição de 15% de anidrita natural e 0,5% de hidróxido de potássio (KOH), como ativador alcalino. A partir das imagens obtidas foi possível identificar que, primeiramente na escória HR, ocorreu a formação de agulhas de etringita que preencheram a porosidade da matriz e o desenvolvimento de uma maior resistência inicial ao longo dos primeiros 7 dias. Enquanto na escória LR, a hidratação dos compostos ainda não estava totalmente completa ao longo dos primeiros 7 dias, além de uma considerável redução na formação da etringita produzida na pasta.

Figura 1 – Representação do processo de hidratação do cimento supersulfatado, sendo A e B escórias de alta reatividade e C e D, escórias de baixa reatividade

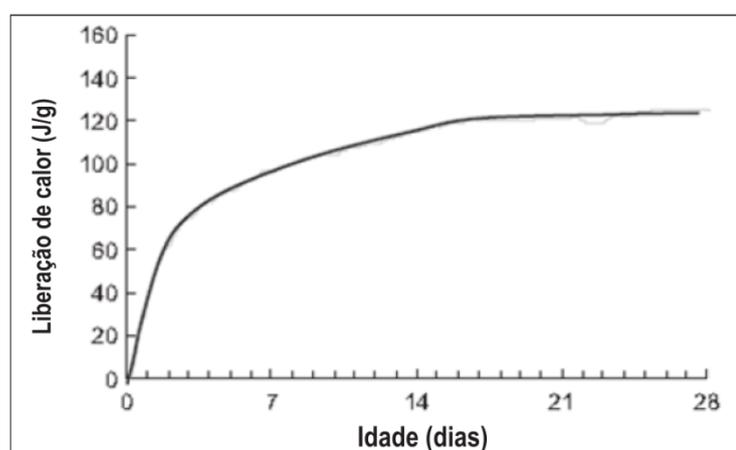


Fonte: Adaptado de Gruskovnjak *et al.* (2008).

Assim, Gruskovnjak *et al.* (2008) perceberam que a escória de alta reatividade possuía uma maior dissolução por conta de uma maior formação de etringita, uma vez que continha menor quantidade de óxido de magnésio (MgO) e maior quantidade de óxido de alumínio (Al_2O_3). Portanto, para a escória possuir uma maior reatividade e maior resistência à compressão, um fator determinante seria a elevada proporção de óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de cálcio (CaO) na composição (PAL; MUKHERJEE; PATHAK, 2003; LUZ; HOOTON, 2015).

Outra característica do cimento supersulfatado é que o mesmo possui um calor liberado bem inferior ao do cimento Portland, já que possui uma emissão de calor total obtida apenas de 108,70 J/g (LIU *et al.*, 2015). Enquanto o cimento Portland resistente a sulfatos Tipo V tem cerca de 300 J/g aos 7 dias de hidratação (NEVILLE; BROOKS, 2013). Segundo Juenger *et al.* (2011), o calor de hidratação do CSS é ainda menor, visto que cerca de 90 J/g de calor são liberados nos primeiros 7 dias de hidratação. A cinética do processo é caracterizada por um pico inicial relativo à liberação de calor, visto que após 2 dias, cerca de 50% de calor já foi liberado no processo de hidratação do CSS, conforme a Figura 2:

Figura 2 – Liberação de calor acumulada durante o processo de hidratação do CSS



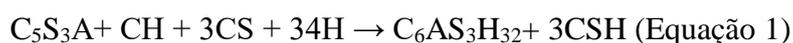
Fonte: Adaptado de Matschei; Bellmann; Stark (2005).

O sulfato de cálcio, que é o segundo componente mais importante do CSS, é comumente oriundo da gipsita (ZHANG; QIAN, 2017). Também pode ser utilizado o fosfogesso, que é um subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados, desde que atenda aos requisitos mínimos de resistência à compressão (GRACIOLI *et al.*, 2020). As diferentes fontes do sulfato de cálcio do CSS, obtidas em função da temperatura de calcinação, podem ser utilizadas na fase hemihidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), como fosfogesso, na fase de di-hidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e anidra (CaSO_4), também chamada de anidrita (SCHAEFER, 2013). A calcinação é a responsável por eliminar as moléculas de água na composição, obtendo assim a anidrita (DUTTA; BORTHAKUR, 2014). Em alguns estudos, os resultados de resistência à compressão do CSS integrando fosfogesso foram iguais ou, em outros casos, superior ao da fonte convencional (GRACIOLI; VARELA; LUZ, 2015; GRACIOLI *et al.*, 2015).

Os ativadores alcalinos mais utilizados na formação de CSS são o cimento Portland, a cal hidratada ou o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), os hidróxidos de metais alcalinos (KOH e NaOH) ou ainda a mistura desses componentes (JUENGER *et al.*, 2011). A quantidade de

ativador alcalino que é adicionada na formação do cimento supersulfatado é de extrema relevância, visto que, com a presença de um ativador alcalino, o pH tende a aumentar, o que beneficia a dissolução da escória. O ativador alcalino, responsável pelo aumento do pH no CSS, está diretamente relacionado à sua resistência mecânica, visto que para ocorrer a formação dos produtos de hidratação o pH deve estar entre 11 e 12, e quando em excesso pode diminuir a resistência à compressão (MATSCHEI; BELLMANN; STARK, 2005; JUENGER *et al.*, 2011). Com isso, é possível perceber que a solubilidade dos ativadores tem relação direta com a resistência à compressão.

Quando se escolhe, por exemplo, o cimento Portland como ativador alcalino, a escória é ativada no momento em que entre em contato com o hidróxido de cálcio, proveniente da hidratação da fração de cimento Portland, com o sulfato de cálcio (RUBERT, 2015). Dentre as várias reações químicas que ocorrem, a principal é a que promove a formação da etringita e dos silicatos de cálcio, como mostrado na Equação 1:



Na Equação 1, é possível ver que a combinação da gehlenita (C_5S_3A)¹ com o hidróxido de cálcio (CH)², derivado da hidratação do cimento Portland, a anidrita ou sulfato de cálcio (CS)³ e na presença de água (H)⁴ forma inicialmente a etringita ($C_6AS_3H_{32}$)⁵, responsável pela resistência nos primeiros sete dias, visto que logo após esse período ela é finalizada. Após dois ou três dias, aparecem os silicatos hidratados de cálcio ($3CSH$)⁶, que manifesta um crescimento gradual ao longo do processo de hidratação, sendo o responsável pela resistência em idades tardias do CSS (GROUNDS; NOWELL; WILBURN, 1994).

Vale ressaltar que se devem ter cuidados quanto à instabilidade da etringita formada. Segundo Palou *et al.* (2005), a etringita é sensível a fatores como: pH, relação $Al(OH)_4^- / SO_4^{2-}$, que logo se torna monossulfato, o que se torna prejudicial para a etringita. Ainda segundo os autores, essa conversão se dá por conta da ausência de sulfatos no sistema, uma vez que no início das reações de hidratação, as partículas de anidrita são envoltas pela etringita e não se dissolve o suficiente. Simultaneamente, o C-S-H é formado e é liberado hidróxido de cálcio

¹ $C_5S_3A = Ca_2Al_2Si_2O_7$

² $CH = Ca(OH)_2$

³ $3CS = 3CaSO_4$

⁴ $H = H_2O$

⁵ $C_6AS_3H_{32} = Ca_6Al_2(OH)_{12}(SO_4)_3 \cdot 26H_2O$

⁶ $C-S-H = CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$

ao meio racional e aumentando o pH da solução. Com isso, favorecendo a degradação da etringita.

Esse fenômeno é reforçado pelos estudos de Mun et al. (2007), que ao produzirem CSS com 1 a 10% de ativador alcalino, observaram que grandes quantidades de ativador alcalino aumentam o pH da solução, atingindo valores acima de 13, o que prejudica a formação da etringita.

2.1.4 Vantagens e desvantagens

Em comparação aos diversos tipos de cimento Portland, o cimento supersulfatado se destaca por gerar em sua fabricação uma menor quantidade de dióxido de carbônico (CO₂), cerca de 90% menor, ajudando diretamente na preservação da camada de ozônio (GRUSKOVNJAK et al., 2008). A matéria-prima desse tipo de cimento é, na grande maioria, materiais residuais, como a escória de alto forno, e tem baixo consumo de clínquer. Ademais, outros resíduos podem ser utilizados em sua composição como é o caso do fosfogesso, fonte de sulfato de cálcio, que tem sua formação a partir da elaboração de fertilizantes agrícolas (DING et al., 2014).

Além disso, o CSS também mostra boa resistência ao ataque de sulfato de sódio e alguns ácidos, um baixo calor de hidratação, menor penetração de íons de cloreto, baixa permeabilidade e uma maior estabilidade sob carga (RUBERT, 2015). Esse tipo de cimento ainda expressa uma matriz com menor quantidade de hidróxido de cálcio livre, o que dificulta a degradação da matriz sólida em ambientes agressivos.

Ainda segundo Juenger et al. (2011), os aglomerantes supersulfatados, em suas idades iniciais, possuem uma baixa resistência à compressão, contudo, com uma cura apropriada pode chegar ao mesmo resultado que o cimento Portland em 28 dias, possuindo uma boa durabilidade e menor grau de hidratação. Em vários cimentos supersulfatados o grau de hidratação das escórias de alto forno, identificado a partir de amostras seladas com idades entre 28 e 90 dias, é cerca de 15 a 25% (GRUSKOVNJAK et al., 2008; MATSCHEI; BELLMANN; STARK, 2005; TAHA et al., 1981). A boa durabilidade está relacionada à baixa porosidade capilar do CSS, quando comparado ao cimento Portland, na qual pode ser identificada pela técnica de porosimetria de intrusão de mercúrio (RUBERT, 2015).

O CSS não possui uma boa resistência a carbonatação, o que pode acabar degradando a etringita e provocar um aumento na porosidade (JUENGER et al., 2011). Além disso,

segundo o trabalho de Matschei, Bellmann e Stark (2005), a instabilidade da etringita em pH elevado é responsável pela criação de monossulfato.

2.1.5 Principais utilizações

As principais utilizações do cimento supersulfatado são a de ser indicado para obras de estações de esgoto, lajes de fundação massiva, cortinas subterrâneas, obras em zonas costeiras, instalações agrícolas, engenharia de túneis, sistemas subterrâneos especiais de drenagem e obras de engenharia onde se deseja prevenir a reação álcali-agregado e o ataque por sulfatos (RUBERT, 2015).

O CSS também se mostra eficaz em minimizar fissuras térmicas, uma vez que conforme Wang *et al.* (2016) investigaram o uso do cimento supersulfatado em concretos massa apresentou um menor pico de calor de hidratação (52,5 °C) quando comparado ao cimento Portland (78 °C). Também vale destacar que, na cidade de Wildon na Áustria, uma estação de tratamento de esgoto foi construída utilizando o cimento supersulfatado Slagstar®. Utilizando um consumo de cimento de 380 a 450 kg/m³ e uma relação de água/cimento de 0,34 a 0,44 foi possível chegar a uma resistência à compressão em torno de 80 MPa (NOVAK; SCHNEIDER; LANG, 2005). Além desse caso, o CSS Slagstar® também já foi utilizado em uma obra de silos de cimento, no qual apontou um melhor desempenho estético quando comparado ao silo feito com cimento Portland (WOLTRON, 2009).

No Brasil, ainda não se tem um registro de aplicação, e mesmo encontrando alguns casos na literatura internacional, ainda é uma alternativa cimentícia pouco explorada, principalmente no que diz respeito a sua vida útil em estruturas reais, o que demanda um estudo mais aprofundado e novas pesquisas acerca do CSS.

2.2 Escória BOF

A escória BOF (Basic Oxygen Furnace ou Forno de Oxigênio Básico) é um subproduto da fabricação do aço. Essa escória também é conhecida como escória LD (Linz-Donawitz). No processo siderúrgico a escória BOF é produzida no processo de transformação do ferro-gusa. Nessa operação, ocorre a reação entre o ferro-gusa com cal, silicatos, óxidos de alumínio, óxidos de manganês, óxidos de magnésio e ferritas, dependendo da qualidade do aço produzido (XIE *et al.*, 2017).

Conforme Geyer (1996), a relação CaO/SiO_2 da escória granulada de alto-forno varia de 0,9 a 1,2, enquanto que a da escória LD tem essa relação variando em torno de 4, e por isso ainda não é um material com um processo consolidado para a formação de cimento e concreto. Isto ocorre devido a presença de cal livre (CaO), que tende a expandir e sua estabilização é lenta, podendo acarretar na fragmentação do concreto construído com essa escória (GUMIERI, 2002).

Entretanto, segundo Zepperet *et al.* (2022), esse tipo de escória pode substituir o cimento por motivos como o fato de possuir fase comparável, em quantidades suficientes, com as fases principais presentes no cimento, como é o caso do C_2S (Silicato dicálcico). Além disto, a escória BOF possui uma alta disponibilidade, visto que são 10% em peso da quantidade de aço produzida no processo do conversor.

Devido à diversidade de minérios de ferro, misturas, métodos de fabricação de aço e processos de resfriamento, as composições químicas da escória BOF são bastante variáveis (JIANG *et al.*, 2018). A escória BOF é composta principalmente por 40-60% de óxido de cálcio (CaO), 10-20% de dióxido de silício (SiO_2), 20-30% de óxido de ferro III (Fe_2O_3) (FeO/Fe), 1-6% de óxido de alumínio (Al_2O_3) e 2-10% de óxido de magnésio (MgO). Outrossim, o restante dos óxidos menores são o óxido de manganês (MnO), o pentóxido de difósforo (P_2O_5), o óxido de sódio (Na_2O), o óxido sulfúrico (SO_3), entre outros. O alto teor de CaO e MgO presente na escória de BOF está atrelado a alta dosagem de fluxos para minimizar as impurezas, enquanto que os óxidos de ferro presentes são oriundos do resíduo do próprio ferro que não foi recuperado durante a conversão do ferro fundido em aço (GEISELER, 1996 ; YILDIRIM; PREZZI, 2011).

Geralmente, a escória de BOF possui basicidade consideravelmente alta (razão de óxidos alcalinos para óxidos ácidos), e se encontra em diferentes fases minerais, incluindo silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), ferrita dicálcica (C_2F), MgO , Fase CaO e RO (solução sólida de CaO , MgO , MnO e FeO) (BELHADJ *et al.*, 2012 ; HAN *et al.*, 2015 ; WANG *et al.*, 2013a ; YILDIRIM; PREZZI, 2011).

A escória BOF pode ser definida como um material escuro e rochoso (devido ao alto teor de ferro) com superfície angular e interior cavernoso. O material é, aproximadamente, 30% maior do que um agregado normal (4,75 mm), contendo cerca de $3,4 \text{ g/cm}^3$ de peso específico. Além disso, a escória BOF possui alta dureza e estruturas porosas (PANG; ZHOU; XU, 2015; ADEGOLOYE *et al.*, 2015).

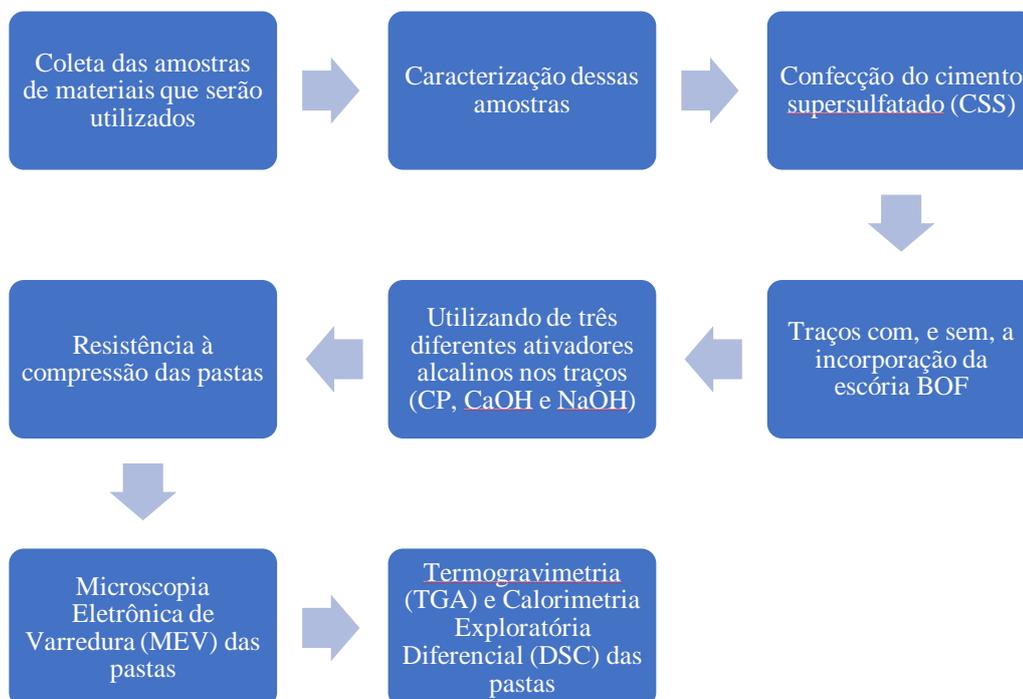
Dessa forma, devido à carência de trabalhos que utilizem a escória BOF como alternativa na composição de cimento supersulfatado, justifica-se a importância e a

autenticidade da presente pesquisa em analisar a eficácia dessa variada matriz cimentícia do CSS.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse tópico, serão apresentados os procedimentos experimentais da presente pesquisa. O fluxograma das etapas pode ser visualizado na Figura 3:

Figura 3 – Fluxograma das etapas da pesquisa



Fonte: Autor (2023).

3.1 Materiais

Os materiais utilizados foram as escórias de alto forno e de oxigênio básico (BOF), o sulfato de cálcio (CaSO_4), a água (H_2O) e três tipos de ativadores alcalinos que são o cimento Portland, o hidróxido de cálcio (CaOH) e o hidróxido de sódio (NaOH).

3.1.1 Escórias

As escórias de alto forno e de forno de oxigênio básico (BOF) são produzidas pela Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP). A empresa está localizada no complexo do Pecém. Os precursores citados foram caracterizados pela determinação da massa específica, pela finura por meio da peneira 45 μm e pela composição química.

A massa específica foi calculada utilizando como base os parâmetros da ABNT NBR 16605 (2017). Para a finura por meio da peneira 45 μm , utilizou-se como base os parâmetros da ABNT NBR 15894-3.

Foi realizada a coleta da escória granulada de alto forno (GGBS) em seu estado natural (Figura 4a), para ser moída no moinho de bolas e em seguida peneirada na peneira de malha 150 μm para ficar pronta pra uso (Figura 4b). A escória BOF em seu estado natural (Figura 4c) passou pelo processo de britagem, moagem e peneiramento na peneira de malha de 150 μm (Figura 4d).

Figura 4 – a) GGBS natural; b) GGBS após o peneiramento; c) BOF natural; d) BOF após o peneiramento



Fonte: Autor (2023); Costa (2022).

Os dados da caracterização das escórias estão disponíveis na Tabela 2:

Tabela 2 - Características físicas das escórias

Característica	Escória GGBS	Escória BOF
Massa Específica (g/cm^3)	3,06	3,13
Finura na peneira de 45 μm (%)	54,8	49,05

Fonte: Autor (2023); Costa (2022).

A composição química da escória de alto forno foi obtida por espectroscopia por energia dispersiva de raios-x no Laboratório de geologia da UFC. A composição química da escória BOF foi fornecida por Costa (2022). Os dados estão na Tabela 3.

Tabela 3 - Porcentagem da composição em massa de óxidos das escórias

Elementos	Escória GGBS	Escória BOF
Al₂O₃	10,30	1,94
CaO	32,06	53,1
CO₂	24,19	-
Fe₂O₃	-	34,40
K₂O	-	0,14
MgO	3,86	-
MnO	-	2,97
SiO₂	29,57	5,64
SO₃	-	0,83
ZnO	-	0,06

Fonte: Autor (2023); Costa (2022).

3.1.2 *Ativadores*

Utilizou-se o sulfato de cálcio dihidratado P.A, da marca Neon e com massa específica de 2,3 g/cm³, água (H₂O) e diferentes dosagens das escórias GGBS e BOF. Os ativadores alcalinos empregados foram o cimento Portland composto com fíler (CP II F - 32), cuja massa específica é em torno de 2,8 g/cm³; o hidróxido de cálcio (CaOH)P.A da marca Synth e contém massa específica de 2,24 g/cm³ conforme fabricante; e o hidróxido de sódio (NaOH) P.A da marca Nox e com massa específica de 2,13 g/cm³ conforme fabricante.

3.2 Métodos

3.2.1 *Traços para confecção do cimento supersulfatado*

Com base na norma europeia EN 15743/2010 definiu-se os percentuais de escórias, de sulfato de cálcio e de ativador alcalino, conforme apresentado na Tabela 5. Foram feitos

traços de referência o CSS, sem a presença da escória BOF, e traços com a incorporação da escória BOF.

Tabela 4 – Tabela de traço para a composição do CSS (em porcentagem/gramas)

TRAÇO PARA A COMPOSIÇÃO DO CSS (EM PORCENTAGEM/GRAMAS)							
	GGBS	BOF	SULFATO	ATIVADORES			ÁGUA
				CP	CaOH	NaOH	
T1	80% (560 g)	-	15% (105 g)	5% (35 g)	-	-	40% (280 g)
T2	80% (560 g)	-	15% (105 g)	-	5% (35 g)	-	40% (280 g)
T3	80% (560 g)	-	15% (105 g)	-	-	5% (35 g)	40% (280 g)
T4	50% (350 g)	30% (210 g)	15% (105 g)	5% (35 g)	-	-	40% (280 g)
T5	50% (350 g)	30% (210 g)	15% (105 g)	-	5% (35 g)	-	40% (280 g)
T6	50% (350 g)	30% (210 g)	15% (105 g)	-	-	5% (35 g)	40% (280 g)

Fonte: Autor (2023).

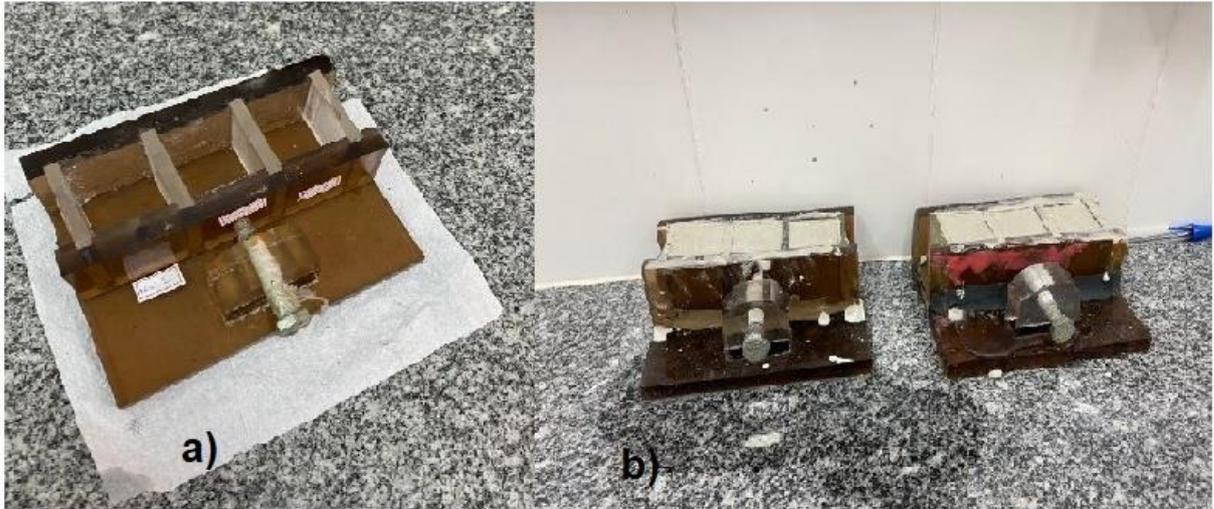
Os componentes foram misturados durante 4 minutos. Inicialmente, realizou-se a mistura mecânica durante 1 minuto na velocidade de 1700 rotações por minuto (rpm). Em seguida, realizou-se homogeneização manual por 1 minuto e finalizou-se com 2 minutos de mistura mecânica na mesma velocidade.

3.2.2 Ensaios

3.2.2.1 Resistência à compressão

Após o processo no misturador, foram moldados corpos de prova em moldes cúbicos de 4 x 4 x 4 cm, conforme a Figura 5. Sendo a confecção feita no laboratório de materiais da construção civil da Universidade Federal do Ceará Campus Crateús, e foram catalogados de acordo com suas características.

Figura 5 – a) exposição dos moldes; b) moldes com os corpos de prova



Fonte: Autor (2023).

Os corpos de provas foram submetidos ao teste de resistência à compressão, pelos parâmetros técnicos da NBR ABNT 13279 (2015), sendo o ensaio realizado no laboratório de materiais da construção civil (LMCC), na Universidade Federal do Ceará Campus do PICI em Fortaleza. As pastas foram rompidas com 7 e 28 dias após expostas à cura em temperatura ambiente, como é possível ver na Figura 6.

Figura 6 – Corpo de prova submetido ao ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autor (2023).

Vale ressaltar que os corpos de prova foram guardados em sacos plásticos, visando minimizar uma perda excessiva de umidade e uma consequente retração por secagem.

Para cada traço foram produzidos três corpos de prova, cujos resultados de resistência à compressão foram submetidos à análise do desvio padrão e da média aritmética, como também análise estatística por meio do *software* Statistica, versão 7.0, a fim de verificar se o valor da variável de resposta em diversos níveis, difere entre si e se existe uma relativa significância ou não. Para isso foi executado o teste ANOVA (Analysis of Variance) e o teste de Tukey.

3.2.2.2 *Microscópio eletrônica de varredura (MEV)*

A Microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi aplicada para identificar a morfologia e os produtos de reação por meio de imagens capturadas em superfície (SE) com magnificação de 10.000x. Essa análise foi realizada em microscópio modelo QUANTA FEG 450, fabricado pela companhia FEI, conforme procedimento da Central Analítica/UFC.

3.2.2.3 *Termogravimetria (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)*

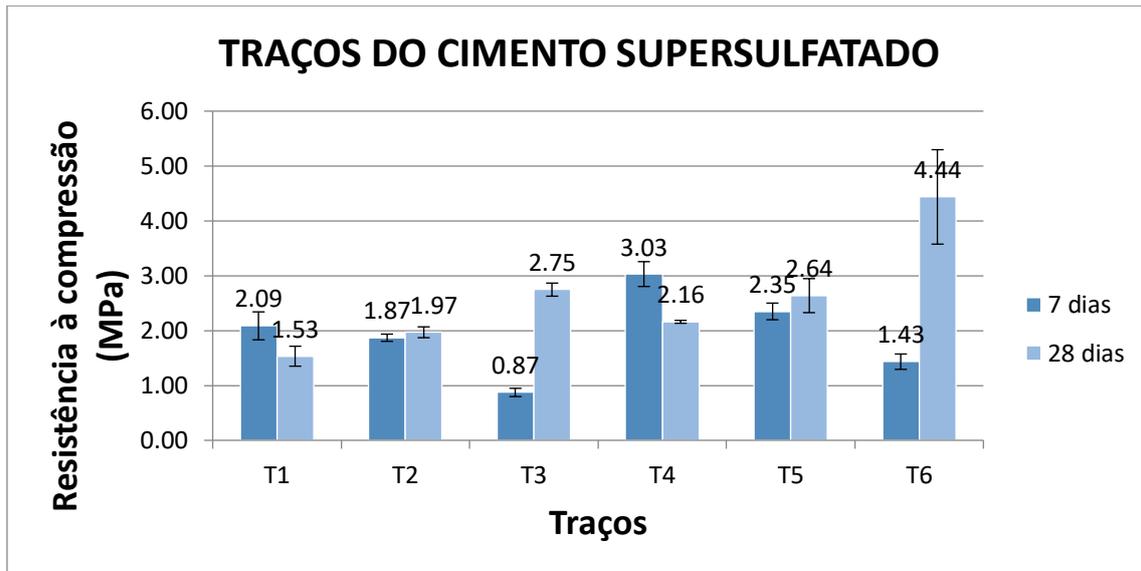
A Termogravimetria (TGA) foi utilizada para identificar os padrões de decomposição de produtos de reação por meio da perda de massa. Utilizou-se também a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), a qual mediu as mudanças de energia ao variar a temperatura, permitindo caracterizar os processos de transição do material. Nessa análise foi utilizado o equipamento NETZSCH STA 449F3, modelo STA449F3A-1067-M. A temperatura variou de 25°C a 900°C, a uma taxa de aquecimento de 10°C/min, com atmosfera de nitrogênio, conforme procedimento do Laboratório de Materiais Avançados/UFC.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resistência à compressão

No Gráfico 1 estão apresentados os resultados da resistência à compressão aos 7 e 28 dias das pastas produzidas, conforme a Tabela 4.

Gráfico 1 – Resistência à compressão do CSS em cada traço



Fonte: Autor (2023).

É possível perceber que, no Gráfico 1, com exceção dos traços 1 e 4, todos obtiveram uma resistência maior ao chegarem aos 28 dias. No entanto, os valores de resistência podem ser considerados baixos quando comparados às pastas de cimento Portland, que geralmente alcançam valores acima de 40 MPa aos 28 dias (PILAR *et al.*, 2016). Diante disso, é necessário compreender que o processo de hidratação do cimento supersulfatado ocorre de forma mais lento que o processo de hidratação do cimento Portland, e o primeiro cimento citado pode atingir valores maiores apenas em idades mais avançadas (NOOR-UL-AMIN, 2014; DING *et al.*, 2014).

Além disso, os baixos valores de resistência à compressão podem estar relacionados à composição química da escória GGBS, visto que a soma dos principais óxidos ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2$) presentes na escória de alto forno não atinge o valor mínimo de 66,5%, que é uma das exigências da norma europeia EN 15743/2010, sendo a soma apenas de 65,49%. Essa exigência também não é atendida com a escória BOF, sendo a soma apenas de 58,74%. No entanto, a segunda exigência dessa norma foi atendida, que é a relação de $(\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2$

maior que um (foi obtido o valor de 1,21). No caso da escória BOF, também apenas a segunda exigência foi atendida (foi obtido o valor de 9,41).

O resultado encontrado já foi diferente no trabalho de Trentin et. al (2019), no qual os autores caracterizaram uma escória de alto forno que atendeu as exigência da EM 15743/2010, atingindo 78,9% para a soma dos principais óxidos, e a relação da segunda exigência foi maior que 1, sendo 1,52. As resistências do CSS encontradas no trabalho supracitado, já foram encontradas com valores entre 25 e 35 MPa, demonstrando a importância de atender também as exigências da norma européia.

Também vale ressaltar que as composições variam em diversos países. Os principais óxidos presentes nas escórias de alto forno podem variar até na faixa de 20% a depender da localidade de produção. Esse aspecto pode ser considerado um dos entraves na disseminação do uso do cimento (GRUSKOVNJAK *et al.*, 2008).

Além da composição química, também se pode supor que a finura das partículas das escórias também tenha interferido, visto que o processamento das mesmas utilizou uma peneira de 150 µm para separação das partículas. Isso resultou em teores em torno de 50% da massa retida na peneira de malha 45 µm (Tabela 2). Contudo, em materiais cimentícios suplementares recomenda-se que esse índice seja inferior a 20% (ABNT NBR 12653:2014). Isso reforça que quanto maior a finura da escória, mais rapidamente pode ocorrer às reações químicas que promovem o ganho de resistência, devido à maior superfície de contato (HOOTON, 2000).

Quanto à diminuição da resistência nos traços T1 e T4 se deve, possivelmente, à instabilidade da etringita formada ao longo do processo de hidratação do cimento supersulfatado (PALOU *et al.*, 2005; MUN *et al.*, 2007)

Por fim, foi realizada uma análise estatística com os dados de resistência à compressão dos cimentos supersulfatados confeccionados. Utilizando todos os resultados de resistência dos corpos de prova rompidos, e com o uso do *software Statistica* versão 7.0, foi possível executar a Análise de Variância (ANOVA), aos 7 dias e aos 28 dias, para verificar se existe uma diferença significativa (DS) ou se não tem diferença significativa (NDS) entre as pastas, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – ANOVA das variáveis analisadas para as pastas de CSS em cada período

Variável	GDL	MQ	F (calculado)	F (tabelado)	Significância da Variável
Pastas CSS - 7 dias	5	1,66626	59,333	6,608	DS (F _{calc} >F _{tab})
Pastas CSS - 28 dias	5	3,0733	20,6025	6,608	DS (F _{calc} >F _{tab})

Fonte: Autor (2023).

Na Tabela 5, percebe-se que as pastas nos dois períodos obtiveram uma variação significativa entre os traços. Contudo, não é possível identificar se há traços homogêneos (sem diferenças significativas) ou não. Para isso, foi realizado o teste de Tukey, no mesmo software mencionado, que analisa precisamente qual pasta obteve uma maior ou menor diferença com relação às outras. O resultado do teste de Tukey está demonstrado na Tabela 6 para os 7 primeiros dias e ao final dos 28 dias. O software ainda destaca a numeração na cor vermelha para as pastas que variaram significativamente.

Tabela 6 – Teste de Tukey das variáveis analisadas para as pastas de CSS

Teste de Tukey das pastas de CSS aos 7 dias						
Pasta	1	2	3	4	5	6
T1		0,623006	0,000165	0,000314	0,433603	0,004751
T2	0,623006		0,000245	0,00017	0,038997	0,066193
T3	0,000165	0,000245		0,000159	0,000159	0,066193
T4	0,000314	0,000170	0,000159		0,003489	0,014578
T5	0,433603	0,038997	0,000159	0,003489		0,000159
T6	0,004751	0,066193	0,014578	0,000159	0,000374	
Teste de Tukey das pastas de CSS aos 28 dias						
Pasta	1	2	3	4	5	6
T1		0,735139	0,022003	0,401894	0,039611	0,000162
T2	0,735139		0,209838	0,988857	0,341999	0,000199
T3	0,022003	0,209838		0,467489	0,99916	0,001934
T4	0,401894	0,988857	0,467489		0,664249	0,000254
T5	0,039611	0,341999	0,99916	0,664249		0,001176
T6	0,000162	0,000199	0,001934	0,000254	0,001176	

Fonte: Autor (2023).

Por meio da Tabela 6, nota-se que nos primeiros 7 dias, os traços T3 e T4 apresentaram diferenças significativas em relação às demais pastas. Enquanto, aos 28 dias, esses traços, apresentaram resultados relativamente iguais entre a maioria dos traços. Por outro lado, a pasta T6 mostra-se significativamente diferente aos 28 dias de todos os outros traços, o que é justificado pelo maior valor de resistência à compressão (4,44 MPa) dentre as pastas analisadas.

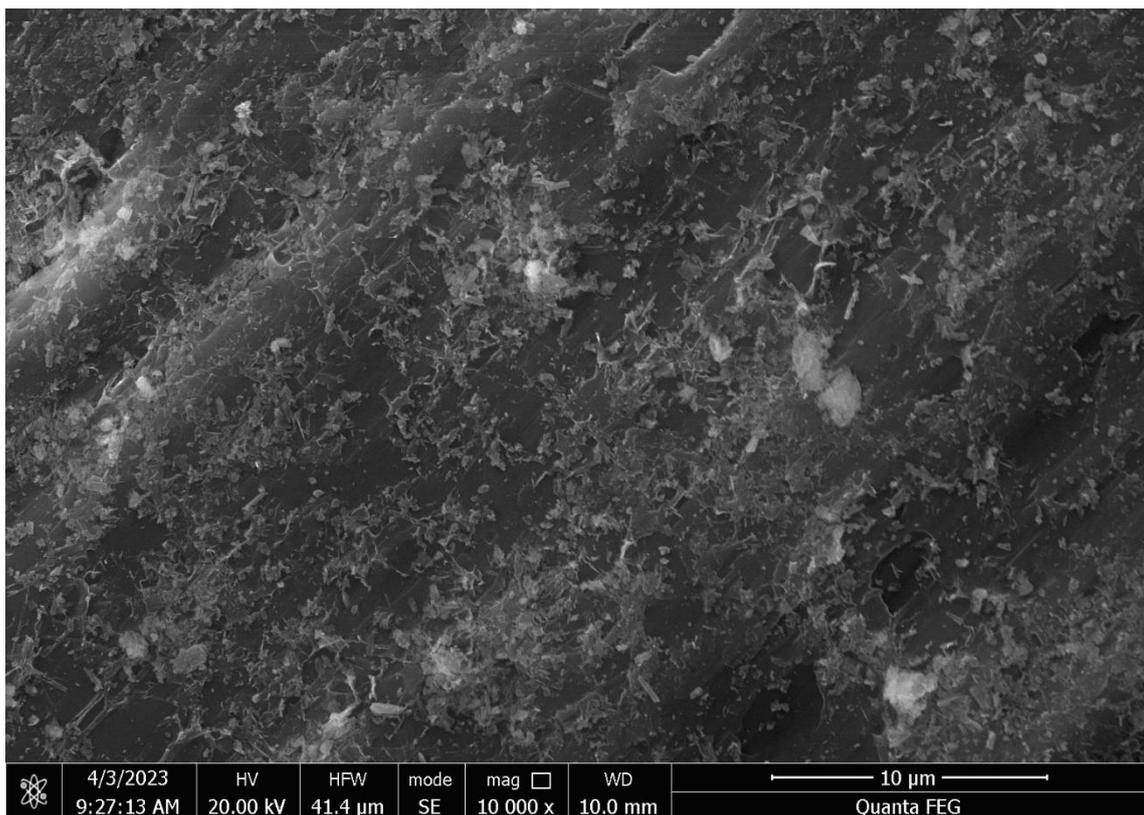
Com base na análise estatística pode-se inferir que o ativador alcalino teve efeito significativo na pasta composta por escória de alto forno, escória BOF e hidróxido de sódio, que é a pasta T6. Mesmo assim, a pasta T1 ainda apresentou uma relativa diferença, sendo ela composta por apenas escória de alto forno e o ativador alcalino foi o cimento Portland. Enquanto isso, T2 e T4 foram às pastas que menos apresentaram variações aos 28 dias.

No caso do presente trabalho, houve limitações que influenciaram nos resultados, como é o caso de não poder observar se a escória apresentava material vítreo, uma vez que alguns ensaios não tiveram tempo de serem realizados, ou ainda quanto ao misturador utilizado que foi de baixa velocidade. O principal fator foi a moagem insuficiente, que não permitiu obter a alta finura das partículas. Além disso, teve a impossibilidade de variar os teores de sulfato de cálcio e os ativadores alcalinos, visto que demandava um tempo maior de execução, e esse tipo de cimento é sensível a pequenas variações em sua composição.

4.2 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

A partir do MEV, foi feita uma análise de cada pasta de CSS.

Figura 7 – Microscopia eletrônica de varredura da amostra T1 (GGBS + Sulfato de Cálcio + Cimento Portland)



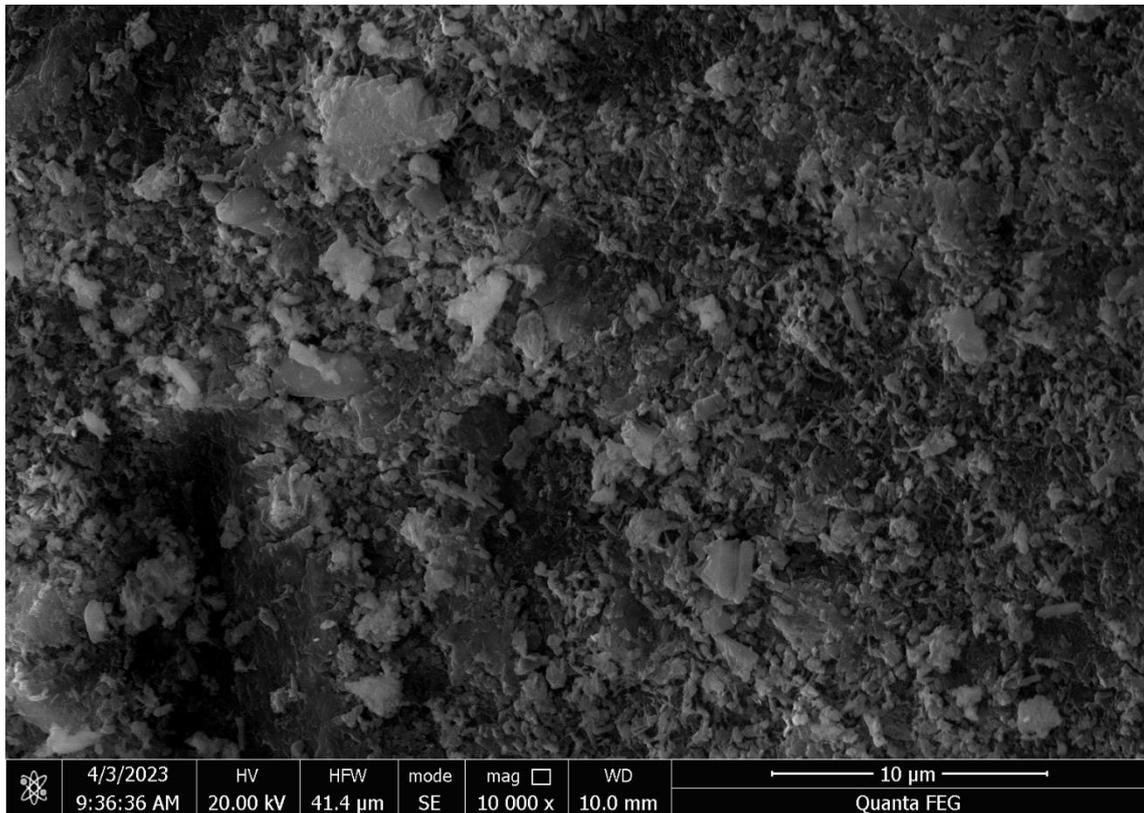
Fonte: Autor (2023).

A Figura 7 é da amostra T1, ativada com cimento Portland, e pode-se verificar uma superfície com pequenas alterações superficiais, indicando baixa formação de produtos de reação, não sendo possível identificar compostos formados. Isso pode justificar a baixa resistência obtida nessa amostra.

O mecanismo de hidratação do CSS é diferente do cimento Portland comum. A hidratação do cimento Portland comum é baseada principalmente em álcalis ativados e os principais produtos de hidratação são o hidróxido de cálcio (CH) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Mas quanto ao CSS, que leva sulfato de cálcio como ativador de sulfato e clínquer como ativador alcalino, a hidratação da escória é ativada pela excitação dessas duas substâncias, e os produtos de hidratação do CSS incluem gel de C S H, etringita e uma pequena quantidade de gesso. Mesmo assim, o principal produto de hidratação do CSS é o gel C-S-H (LIU; WANG; YU, 2019).

No entanto, isso não é verificado na microestrutura, o que pode estar relacionado à finura das partículas e a composição química da escória, como já comentado anteriormente.

Figura 8 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra T2 (GGBS + Sulfato de Cálcio + CaOH)

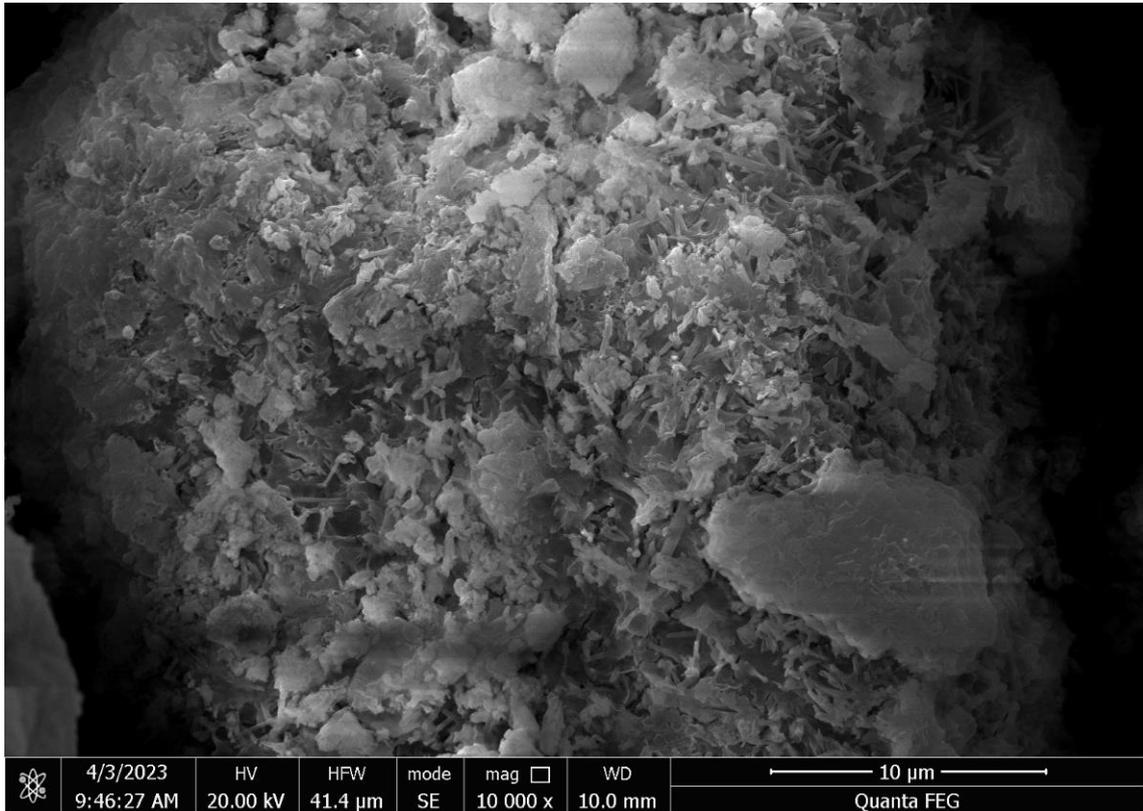


Fonte: Autor (2023).

A Figura 8 é referente à amostra T2, ativada com CaOH, e nota-se a presença de cristais de etringita no formato de agulha entre grãos de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). A etringita em forma de agulha e colunar, geralmente no CSS, cresce e preenche os poros da pasta nas primeiras idades. Enquanto, o C-S-H leva mais tempo para se formar, ao longo do tempo, a etringita em forma de agulha tende a ficar envolta por C-S-H, formando uma

estrutura relativamente densa. A estrutura mais densa da etringita em forma de agulha pode ser potencializado com o aumento do teor de cal na pasta sugerindo que mais etringita pode ser formada em SSC ativada com CaOH (LIU *et al.*, 2020).

Figura 9 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra T3 (GGBS + Sulfato de Cálcio + NaOH)

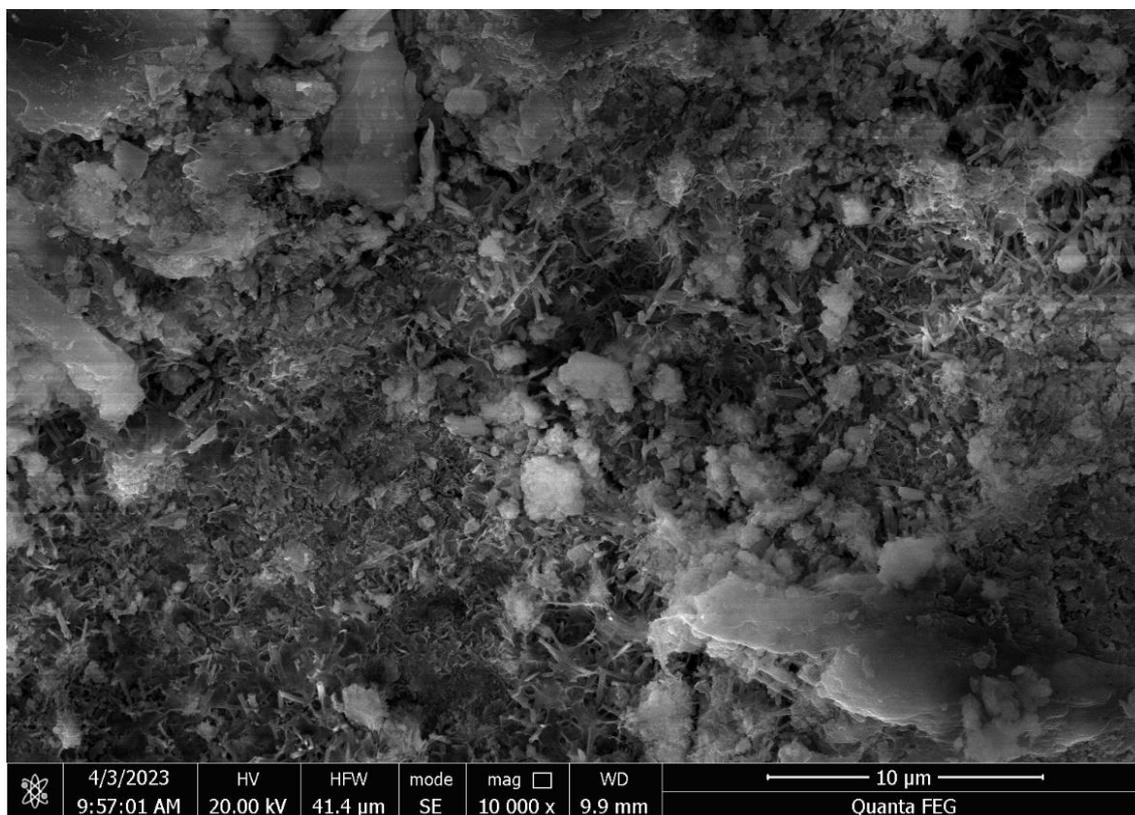


Fonte: Autor (2023).

A partir da Figura 9, referente à amostra T3 ativada com NaOH, é possível perceber que também estão presentes cristais no formato de agulha de etringita e uma maior quantidade de silicato de cálcio formado, envolvendo os cristais de etringita.

A menor quantidade de etringita e maior formação de C-S-H pode ser justificada pelo ativador alcalino NaOH, por proporcionar maior teor de álcalis no sistema. Conforme a literatura, a maior alcalinidade proporciona maior dissolução da escória e conseqüentemente maiores taxas de formação de produtos de reação (PENG *et al.*, 2022).

Figura 10 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra T4(GGBS + BOF + Sulfato de Cálcio + Cimento Portland)

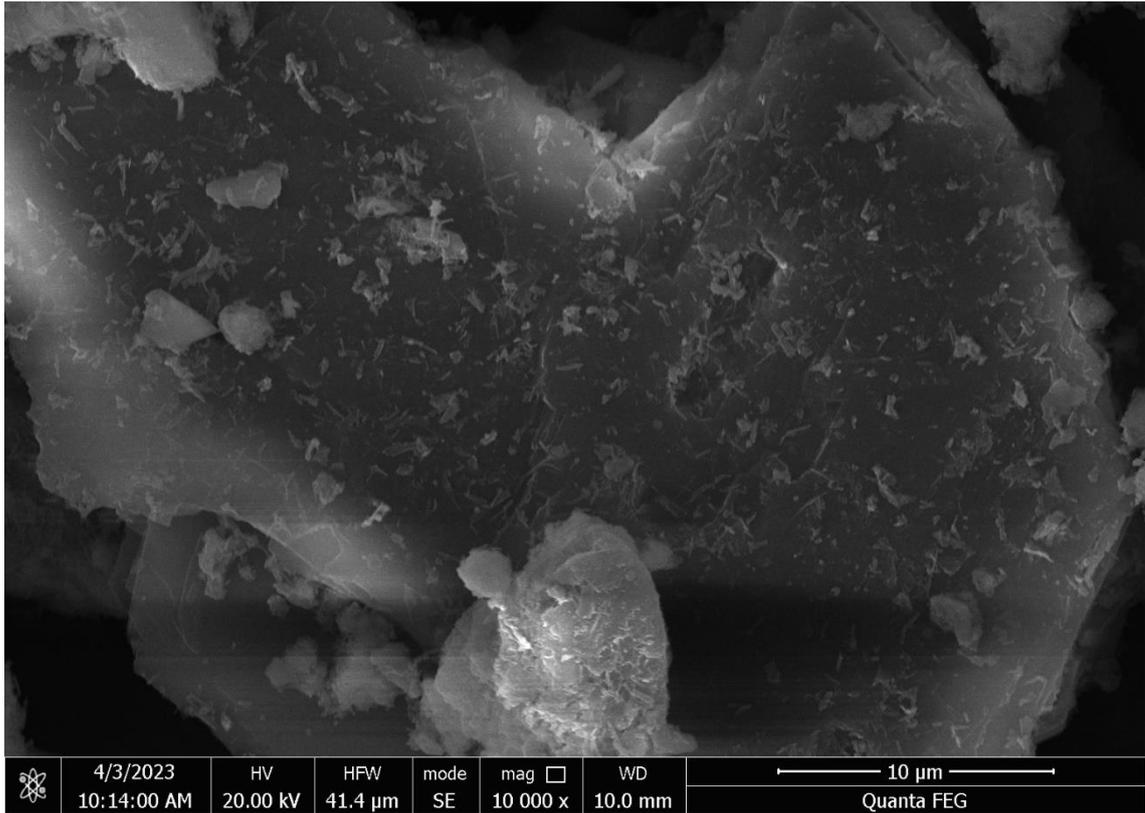


Fonte: Autor (2023).

Percebe-se na Figura 10, que a amostra T4, com adição de escória BOF e cimento Portland, apresenta maior presença de produtos de reação, comparada a T1. Nota-se a presença de etringita e C-S-H, isso implica que a escória BOF alterou a cinética de reação do sistema.

Segundo Hooton (2000), quanto maior a finura da escória, melhor será a reação química, uma vez que a superfície de contato do material é maior. E conforme a Tabela 2 é possível identificar uma menor porcentagem de material retido na peneira 45 por parte da escória BOF. A maior finura da escória BOF, em relação a escória de alto forno, justifica a presença de etringita na pasta T4, apresentando mais compostos formados.

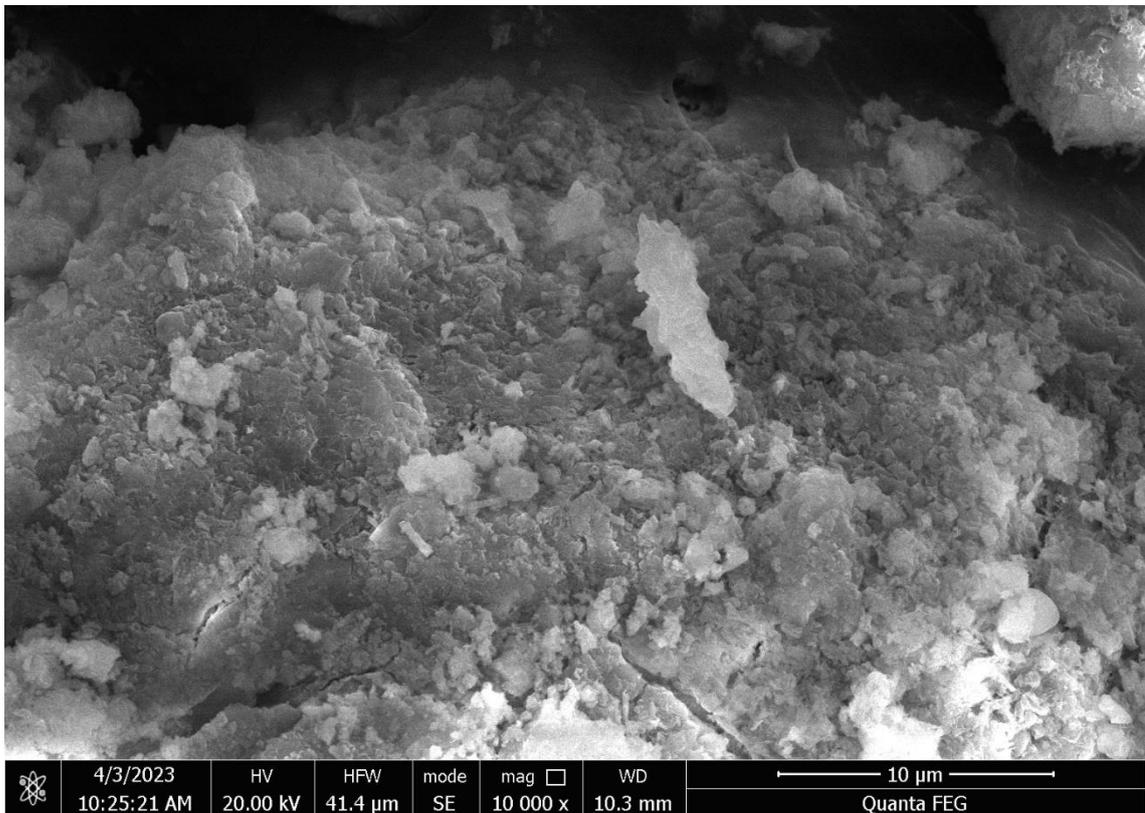
Figura 11 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra T5 (GGBS + BOF + Sulfato de Cálcio + CaOH)



Fonte: Autor (2023).

Na amostra T5 com adição de escória BOF e NaOH não se percebe a presença de etringita, no entanto, pode-se ver alguns cristais de C-S-H crescendo sobre a superfície da partícula.

Figura 12 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra T6 (GGBS +BOF + Sulfato de Cálcio + NaOH)



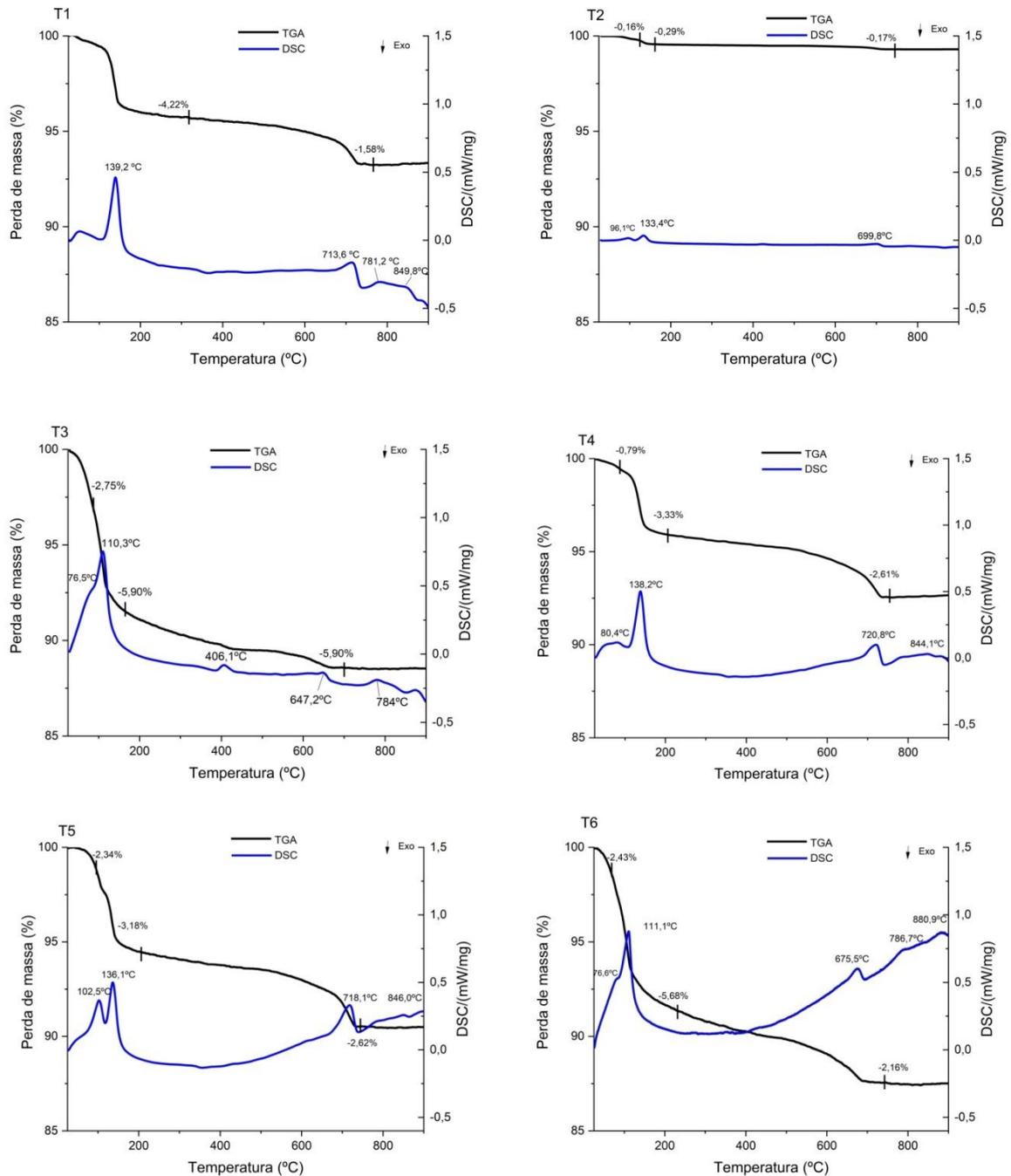
Fonte: Autor (2023).

Na amostra T6 com adição de escória BOF e NaOH não é verificada a presença de etringita, no entanto, nota-se uma matriz mais densa com a presença de C-S-H. Assim como na pasta T4, a presença de escória BOF também interferiu na formação dos produtos de reação. Isso também é justificado pela maior finura da escória BOF, em relação a GGBS.

4.3 Termogravimetria (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A partir do ensaio TGA, os resultados foram expressos em gráficos para uma melhor análise de cada pasta de CSS. Em todos os gráficos, até os 100 °C, a perda é com relação à evaporação da água. Segundo Sun *et al.* (2022), a perda de água da etringita e do C-S-H ocorre a aproximadamente 90°C–130°C. Sendo o principal pico do gel C-S-H a aproximadamente 120 °C. Ainda segundo os autores supracitados, uma faixa para a perda de água do gesso seria em torno de 100 °C–160 °C.

Figura 13 –Termogravimetria e Calorimetria Exploratória Diferencial de cada traço de CSS



Fonte: Autor (2023).

A partir dos gráficos de TGA e DSC, na Figura 13, percebe-se que o pico em todas as amostras foi endotérmico. Isso indica que está ocorrendo à decomposição de algum composto químico, acarretando em perda de massa da amostra (vaporização de água, aditivos ou produtos voláteis de reação ou de decomposição).

A partir do Gráfico da Figura 13, é possível perceber que, possivelmente, os picos endotérmicos entre 133,4°C e 139,2°C de T1, T2, T4 e T5 e T4 foram causados pela decomposição do gesso. Enquanto, as amostras T3 e T6 apresentaram picos aproximados de 110°C, configurando a decomposição da etringita de forma prevalente. Por fim, os picos e a perda de massa acima na faixa de 700°C e 900°C estar relacionada à decomposição do carbonato de cálcio ou carbonato de sódio (SUN *et al*, 2022).

Vale salientar que a região em que os picos ocorrem na análise DSC pode provocar a superposição dos eventos térmicos, evidenciando o evento ocorrido nos compostos com maior quantidade presente.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho investigou a viabilidade de produzir cimento supersulfatado com a incorporação de escória basic oxygen furnace (BOF), para isso foram confeccionadas pastas de CSS com três diferentes ativadores alcalinos e realizadas as seguintes verificações: resistência à compressão, análise térmica e análise da microestrutura. As principais conclusões obtidas com o estudo são:

- Com relação à análise mecânica, foram encontrados baixos índices de resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias, possivelmente relacionada à baixa finura das partículas e composição química dos componentes do CSS e, principalmente, da escória de alto forno. Também deve-se considerar que a baixa resistência possa estar relacionada ao período de cura, visto que o desenvolvimento da resistência nos cimentos CSS exige maior tempo, comparado ao cimento Portland;
- Foi possível identificar na microscopia eletrônica de varredura que ocorreram reações químicas, principalmente nas pastas que utilizaram hidróxido de cálcio como ativador alcalino, que por sua vez apresenta uma boa solubilidade em água e assim ajudando no processo de hidratação do CSS. Já utilizando o hidróxido de sódio e o cimento Portland, as imagens mostraram que não ocorreram reações expressivas de hidratação.
- Pela análise térmica, com os ensaios de TGA e DSC, foi identificar a decomposição de gesso como fase não reagida e etringita como produto de reação nas pastas.
- De modo geral, percebe-se que a escória BOF interferiu no processo de hidratação do cimento supersulfatado promovendo a formação de C-S-H. Entretanto, não se observou um ganho de resistência à compressão.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

As conclusões do presente trabalho estão restritas ao ensaio e às análises realizadas, por conta do tempo e da disponibilidade de cada equipamento. Portanto, para que se obtivessem resultados mais aprofundados acerca desse tema, recomendam-se trabalhos que tratem:

- Da análise mecânica de pastas de CSS utilizando escórias que satisfaçam as condições exigidas pela norma europeia;
- Da criação de novos traços de CSS, com a escória BOF em sua composição, variando os teores de ativadores alcalinos e também do sulfato de cálcio;
- Do estudo das condições de cura do CSS com a incorporação da escória BOF.

REFERÊNCIAS

G. ADEGOLOYE, A.L. BEAUCOUR, S. ORTOLA, A. NOUMOWÉ. **Concretes made of EAF slag and AOD slag aggregates from stainless steel process: mechanical properties and durability.** *Constr. Build. Mater.*, 76 (76) (2015), pp. 313-321.

Angulski Da Luz, C.; Hooton, R. D. (2015) **Influence of curing temperature on the process of hydration of supersulfated cements at early age.** *Cement and Concrete Research*, 77: 69-75.

Angulski Da Luz, C., Hooton, R. D. (2019) **“Influence of supersulfated cement composition on hydration process.”***J. Mater. Civ. Eng.*31 (6):04019090.

ARAUJO, Lucas Benício Rodrigues. **Caracterização de misturas álcali-ativadas à base de cinza volante e escória de aciaria.** Dissertação em desenvolvimento (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-3: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 3 : Determinação da finura por meio da peneira 45 µm.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605 : Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

E. BELHADJ, C. DILIBERTO, A. LECOMTE. **Characterization and activation of basic oxygen furnace slag.** *Cem. Concr. Compos.*, 34 (1) (2012), pp. 34-40.

C.S. Beutler, C. Angulski da Luz, J.S. Bonini. **Behavior of supersulfated cement (SSC) obtained from blast furnace slag generated by charcoal and coke and submitted to thermal curing.** *Mater.*, 25 (2020), Article e12572.

COSTA, H. N. da. **Cimento álcali ativado à base de cinzas do carvão mineral e escória de aciaria. 2020.** (Tese em publicação). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais. Universidade Federal do Ceará, 2022.

DING, S. et al. **Properties of Supersulphated Phosphogypsum-slag Cement (SSC) Concrete.** *Journal of Wuhan University of Technology – Mater.* 109-113. 2014.

EN 15743 (2010) **Supersulfated Cement—Composition, Specification and Conformity Criteria**, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

J. GEISELER. **Use of steelworks slag in Europe.** *Waste Manage.*, 16 (1–3) (1996), pp. 59-63

GEYER, T. R., DAL MOLIN, D., VILELA, A. C. F. **Possibilidades e fatores limitantes da reutilização de escórias de aciaria na construção civil.** In: CONGRESSO ANUAL DA ABM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 51. Anais... Porto Alegre: 1996, v. 4, p. 305-314

GRACIOLI, B., C. A. DA LUZ, CS BEUTLER, J. I. PEREIRA FILHO, A. FRARE, J. C. ROCHA, M. CHERIAF e R. D. HOOTON. 2020. **“Influence of the calcination temperature of phosphogypsum on the performance of supersulfated cements.”** Constr. Build. Mater. 262 (Nov): 119961.

GRACIOLI, B., VARELA, M.V.F., ANGULSKI DA LUZ, C. **“Utilização de fosfogesso em matrizes de cimentos supersulfatados: um subproduto da indústria de fertilizantes”**, In: III Congresso de Ciência e Tecnologia da UTFPR - DV, pp. 529–31, Dois Vizinhos, Out, 2015.

GRACIOLI, B., VARELA, M. V. F., RUBERT, S., et al., **“Valorization of phosphogypsum in Supersulfated Cement (SSC): a contribution for binders free of CO2 emissions”**, In: 16th NOCMAT 2015, Winnipeg, 2015.

GROUNDS, Z.; NOWELL, D. V.; WILBURN, F. W. **The influence of temperature and different storage conditions on the stability of supersulphated cement.** Journal of Thermal Analysis. 687-699. 1994.

GRUSKOVNJAK, A.; LOTHENBACH, B.; WINNEFELD, F.; FIGI, R.; KO, S. C.; ADLER, M.; MÄDER, U. **Hydration mechanisms of super sulphated slag cement.** Cement and Concrete Research, v. 38, p. 983-992, 2008.

GUMIERI, A. G. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo ld como adição em cimentos.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pós Graduação em Engenharia Civil, 2002. 226 p. (Tese de Doutorado em Engenharia).

F. HAN, Z. ZHANG, D. WANG, P. YAN. **Hydration heat evolution and kinetics of blended cement containing steel slag at different temperatures.** Thermochim. Acta, 605 (2015), pp. 43-51.

Hegazy, A.A., Khalil, A.A., El-Alfi, E.A., El-Shahat, M.F., 2019. **Durability of supersulphated cement pastes activated with Portland cement in magnesium chloride solution.** Egypt. J. Chem. 62, 1545–1555.

HOOTON, R. D. **Canadian use of ground granulated blast-furnace slag as a supplementary cementing material for enhanced performance of concrete.** Canadian Journal of Civil Engineering, v. 27, p. 754-760, 2000.

INSTITUTO AÇO BRASIL IABr. **Relatório de Sustentabilidade 2016 - Dados 2014/2015.**

IS 6909 (1990) **Specification for super sulphated cement.** Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.

I.Z. YILDIRIM, M. PREZZI. **Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag**. *Adv. Civil Eng.*, 2011 (2011), pp. 1-13.

JUENGER, M. C. G.; WINNEFELD, F.; PROVIS, J. L.; IDEKER, J. H. **Advances in alternative cementitious binders**. *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 1232- 1243, 2011.

Y. Li. **Study on Composition, Structure and Properties of Cement and Concrete With Steel**. Making Slag Powder Mineral Additive (Doctoral Dissertation). China Building Material Academy (in Chinese) (2003).

LIU, S. et al. **Application of lime neutralised phosphogypsum in supersulfated cement**. *Journal of Cleaner Production*, v. 272, p. 122660, 2020.

LIU, S.; OUYANG, J.; REN, J. **Mechanism of calcination modification of phosphogypsum and its effect on the hydration properties of phosphogypsum-based supersulfated cement**. *Construction and Building Materials*, v. 243, p 1-12, 2020.

LIU, S.; WANG, L.; YU, B. **Effect of modified phosphogypsum on the hydration properties of the phosphogypsum-based supersulfated cement**. *Construction and Building Materials*, v. 214, p. 9–16, 2019.

LIU, S.; WANG, L.; GAO, Y.; YU, B.; TANG, W. **Influence of fineness on hydration kinetics of supersulfated cement**. *Thermochimica Acta*, v. 605, p. 37-42, 2015.

MASOUDI, R. **Examining compositions, hydration mechanisms and properties of supersulfated cement for use in concrete**. 2018. 304 f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade de Toronto, Toronto, 2018.

MATSCHEI, T.; BELLMANN, F.; STARK, J. **Hydration behaviour of sulphateactivated slag cements**. *Advances in Cement Research*, v. 17, n. 4, p. 167–178, 2005a.

MUN, K. J.; HYOUNG, W. K.; LEE, C. W.; SO, S. Y.; SOH, Y. S. **Basic properties of nonsintering cement using phosphogypsum and waste lime as activator**. *Construction and Building Materials*, v. 21, p. 1342-1350, 2007.

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

Noor-ul-Amin (2014), "An overview on comparative study of alternatives for Ordinary Portland cement", *J. Basic. Appl. Chem*, 4(6), pp. 15–22.

Novak, R.; Schneider, W.; & Lang, E. (2005). **New knowledge regarding the supersulphated cement Slagstar**. *Zement-Kalk-Gips (ZKG INTERNATIONAL)*, 58(12), 70-78.

Özbay, E. , Erdemir, M. , Durmuş, HI. **Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties - A review**. *Construction and Building Materials*, 105, pp. 423-434, 2016.

B. PANG, Z. ZHOU, H. XU. **Utilization of carbonated and granulated steel slag aggregate in concrete.** Constr. Build. Mater., 84 (2015), pp. 454-467.

PALOU, M.; MAJLING, J.; DOVAL, M.; KOZANCOVÁ, J.; MUJUMDAR, S.C. **Formation and stability of crystallohydrates in the non-equilibrium system during hydration of SAB cements.** Ceramics-Silikaty, V. 49, P. 230-326, 2005.

PENA, D.C., **Avaliação da Expansibilidade da Escória de Aciaria LD curada a vapor para Utilização em peças de Concreto para Pavimentação,** Dissertação de M.Sc., PPGEC/UFES, Vitória, ES, Brasil, 2004.

PENG, Z. et al. **The impediment and promotion effects and mechanisms of lactates on the hydration of supersulfated cements - Aiming at a performance enhancement.** Journal of Cleaner Production, v. 341, n. December 2021, p. 130751, 2022.

Pinto, Sabrina Requião; Medeiros-Junior, Ronaldo A.; Angulski da Luz, Caroline. **Durabilidade de concretos com cimento supersulfatado: uma revisão da literatura.** ISSN 2526-7248 artigo n. 3SPPC1014, pp. 156-165, 2018.

Ronaldo Pilar; Rudiele Aparecida Schankoski; Agostinho João Dal Moro; Wellington Longuini Repette. **Avaliação de pastas de cimento Portland contendo cinza pesada moída.** ISSN 1517-7076 artigo 11683, pp.92-104, 2016.

RUBERT, S., **Contribuição ao estudo de cimentos supersulfatados: formulação e mecanismos de hidratação,** Dissertação de M.Sc., PPGTP/UTFPR, Pato Branco, PR, Brasil, 2015.

H. QASRAWI. **The use of steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggregate concrete and retain the environment.** Constr. Build. Mater., 54 (54) (2014), pp. 298-304.

A.S. Taha, H. El-Didamony, S.A. Abo-El-Enein, H.A. Amer. **Physico-chemical properties of supersulphated cement pastes.** Zem. Kalk Gips, 34 (6) (1981), pp. 315-317.

TARGINO, L. D.; ARAUJO, L.B.; PAIVA, A.; COSTA, H.N.; BABADOPULOS, L.; CABRAL, A.E.B. **Concretos sustentáveis com aglomerantes geopoliméricos e agregados de escória de aciaria BSSF: caracterização mecânica e análise de impacto ambiental.** Trabalho em desenvolvimento (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

Trentin, Priscila Ongaratto; Magro, Isabel Cristina; Souza, Laura Rorato Moraes Neubern; Homrich, Jefferson Teixeira Olea; Angulski da Luz, Caroline; Bonini, Janaína Sartori. **Comparativo entre cimento Portland e cimento supersulfatado submetidos ao ataque por sulfato de sódio: resistência mecânica e variação dimensional.** ISSN 2526-7248 artigo n. 4SPPC130, pp. 282-290, 2019.

Q. WANG, F. CAO, C. YU, W. WANG. **Influence of steel slag aggregate on the properties of concrete.** Bull. Chin. Ceram. Soc., 34 (04) (2015), pp. 1004-1010.

Q. WANG, P. YAN, J. YANG, B. ZHANG. **Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete.** *Constr. Build. Mater.*, 47 (2013), pp. 1414-1420.

SCHAEFER, O. C., **Valorização de Fonte alternativa de Sulfato de Cálcio para a produção de argamassas autonivelantes,** Tese de D.Sc., PPGEC/UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2013.

S.C Pal, A. Mukherjee, S.R. Pathak, **Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete,** *Cem. Concr. Res.* 33 (9) (2003) 1481-1486.

H. Sun, J. Qian, S. Peng, M. Xiong, C. Fan, Y. Fan, **Utilization of circulating fluidized bed combustion ash to prepare supersulfated cement,** *Constr Build Mater.* 318 (2022) 125861.

Wang, S. et al. (2016) **The Use of Supersulfated Cement (SSC) in Mass Concrete.** In: *MATEC Web of Conferences.* EDP Sciences, p. 07033.

WIMMER G, Wulfert H, Fleischanderl A, et al (2014) **BOF converter slag valorization. In: AISTech iron steel technology conference exhibit,** pp 297–303.

WOLTRON, G. **The utilisation of GGBFS for advanced supersulfated cements.** *World Cement*, 2009.

Xie, J., Wu, S., Zhang, L., Xiao, Y., Liu, Q., Yang, C. and Nie, S., **Material characterization and performance evaluation of asphalt mixture Incorporating basic oxygen furnace slag (BFO) sludge.** *Construction and Building Materials* . 147, pp. 362-370, 2017.

ZEPPER, J.C.O.; van der Laan, S.R.; Schollbach, K.; Brouwers, H.J.H. **Reactivity of BOF slag under autoclaving conditions.** *Construction and Building Materials* 364 (2023) 129957.

ZHANG, Z.; QIAN, J. **EFFECT OF PROTOGENETIC ANHYDRITE ON THE HYDRATION OF CEMENT UNDER DIFFERENT CURING TEMPERATURE.** *Construction and Building Materials*, v. 142, p. 417–422, 2017.