

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Camile de Vargas

**CIMENTOS ESPECIAIS À BASE DE ESCÓRIA GRANULADA DE
ALTO FORNO ATIVADA POR CO₂**

Santa Maria, RS
2019

Camile de Vargas

**CIMENTOS ESPECIAIS À BASE DE ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO
ATIVADA POR CO₂**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Silva de Vargas

Santa Maria, RS
2019

Camile de Vargas

**CIMENTOS ESPECIAIS À BASE DE ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO
ATIVADA POR CO₂**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira Civil**.

Aprovado em 18 de dezembro de 2019:

Alexandre Silva de Vargas, Dr.(UFSM)
(Presidente/Orientador)

André Lübeck, Dr.(UFSM)

Daniel Bertuol, Dr.(UFSM)

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família: meus pais, Sérgio Luiz Soares de Vargas e Rosane dos Santos de Vargas e, minha irmã, Luiza de Vargas.

Minha base e força para continuar desenhando minha trajetória em busca dos meus sonhos, estando aqui um dos primeiros passos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, companheiro de todos os momentos.

Aos meus pais, Rosane e Sérgio, por todo incentivo, suporte e exemplo, sempre acreditando em mim e mostrando, em suas palavras e atos, que eu era livre para construir a minha história, independente do que a realidade dizia em cada momento, pois eles estavam ali para lutar contra tudo que pudesse me impedir de perseguir meus sonhos.

À minha irmã, Luiza, por olhar para mim com a admiração que me incentiva a continuar buscando meus sonhos para que ela também acredite que é livre para construir a sua história.

À minha grande amiga Letícia Félix, essa mato-grossense que dividiu comigo, durante toda a graduação, os cafés, as dificuldades, as alegrias e acima de tudo, os sonhos – afinal, o sonho se controla um pouquinho a cada dia, basta ter ao lado alguém que acredita junto.

Ao meu orientador, Alexandre de Vargas, por ter confiado em mim desde o primeiro encontro e possibilitado que construíssemos juntos esta pesquisa em uma área que sempre me fascinou, reacendendo meu desejo pela carreira acadêmica.

À minha professora, Larissa Kirchhof, por toda amizade, apoio e ensinamentos, ao longo do período da graduação e por ter compreendido meus anseios em relação ao meu tema de pesquisa e oportunizado o encontro entre mim e o Prof. Alexandre.

Ao professor André Lübeck que juntamente com o Prof. Alexandre, trouxe muito entusiasmo a essa pesquisa e se empenhou em nos auxiliar na idealização e construção dos equipamentos necessários.

Ao professor Daniel Bertuol que, com o Prof. Alexandre, nos possibilitou criar uma ponte entre as duas áreas presentes neste trabalho: a engenharia química e a engenharia civil, não medindo esforços para nos auxiliar na realização dos ensaios e construção da pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSM, em especial ao seu Vilson, seu João, ao Zé, ao William e ao Eduardo que prontamente sempre nos auxiliaram nos desafios encontrados durante a confecção dos equipamentos e realização dos ensaios permitindo que nossa pesquisa se concretizasse.

Aos meus amigos, Ricardo, Marcos, Sidney e Fábio, que junto com a Letícia foram responsáveis pelos convites certos nos momentos mais necessários, me ensinando o valor de uma amizade. Sempre souberam quando eu precisava fugir um pouquinho para depois voltar e ser capaz de seguir com mais força.

À Engenheira Sirlei Bevilaqua, que alguns diriam, ao saber como a conheci, ter sido um acaso, mas, para mim, foi, simplesmente, um presente. De minha supervisora de estágio, rapidamente se tornou minha amiga, um exemplo de profissional e o motivo do meu ânimo e anseio em logo poder ser chamada de engenheira para que com orgulho eu possa dizer que agora, além de tudo, também somos colegas de profissão.

Ao Anderson Wyse, meu parceiro de concursos, hoje meu colega de prefeitura, que esteve ao meu lado nesses cinco anos, desbravando cidades em busca de nossos sonhos, ansiando juntos por novos concursos e aguardando o resultado de outros.

Ao meu chefe Denoide, que em pouco tempo conquistei o privilégio de chamar de amigo, por ter me compreendido, apoiado e possibilitado o término da minha graduação.

Aos meus colegas de trabalho, que souberam compreender os dias difíceis de uma acadêmica na tentativa de conciliar estudos e vida profissional. Todos

sempre serão lembrados por mim com o mesmo carinho com que me receberam e apoiaram.

À minha parceira de estudos, nos últimos 8 anos, que dividiu o espaço ao meu lado com folhas, cadernos, rascunhos e mesmo assim sempre encontrava um cantinho para ficar por perto, a Negrita.

Julgue seu sucesso pelas coisas que você teve que
renunciar para conseguir.

(Dalai Lama)

RESUMO

CIMENTOS ESPECIAIS À BASE DE ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO ATIVADA POR CO₂

AUTORA: Camile de Vargas
ORIENTADOR: Alexandre Silva de Vargas

A fabricação do cimento Portland exige uma temperatura de aproximadamente 1450°C, com consumo elevado de calcário e argila, somado ao agravante de ser responsável por aproximadamente 15% das emissões indiretas de CO₂. Nesse sentido, o desenvolvimento de materiais cimentícios, de menor impacto ambiental, torna-se necessário. Portanto, este trabalho teve como objetivo produzir cimentos especiais (CE) à base de escórias granuladas de alto forno (EGAF) ativadas por carbonatação acelerada. Para isso, foi desenvolvido um protótipo de câmara de carbonatação para a realização do processo de carbonatação acelerada da EGAF. Foram preparados corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm, submetidos a um ambiente com 100% de CO₂, tendo como variáveis controladas a temperatura e o tempo de ativação por CO₂. Ensaios de resistência à compressão foram realizados nos CPs após a carbonatação. Como resultados esperados, busca-se a determinação das condições otimizadas de temperatura, relação água/escória e tempo de ativação acelerada por CO₂ da EGAF que proporcionem melhor desempenho da resistência à compressão dos CE.

Palavras-chave: Escória. Carbonatação Acelerada. Cimentos Especiais.

ABSTRACT

SPECIAL CEMENT TO GRANULATED SLAG ACTIVATED FOR CO₂

AUTHOR: Camile de Vargas
ADVISOR: Alexandre Silva de Vargas

The manufacture of Portland cement requires a temperature of approximately 1450°C, with high consumption of limestone and clay, added to the aggravation of being responsible for approximately 15% of indirect CO₂ emissions. In this sense, the development of cementitious materials with a lower environmental impact becomes necessary. Therefore, this work aimed to produce special cement (EC) based on accelerated carbonation activated blast furnace slag (BFS). For this, an carbonation chamber prototype was developed to perform the BFS accelerated carbonation process. Cylindrical specimens, with a diameter of 5 cm and a height of 10 cm, were prepared and subjected to a 100% CO₂ environment. The controlled variables were temperature and activation time by CO₂. Compressive strength tests were performed on after the carbonation. As expected results, we seek to determine the optimal temperature, water/slag ratio and accelerated activation time conditions of the BFS that provide the best performance of the compressive strength of the EC.

Keywords: Slag. Accelerated Carbonation. Special Cements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Clínquer	21
Figura 2 - Dique seco na cidade de Rio Grande – RS em que foi utilizado a sílica ativa no concreto	23
Figura 3 - Escória de Alto-Forno: (a) EGAF granulada; (b) EGAF após processo de moagem.	25
Figura 4 -Emissão de CO ₂ por tonelada de cimento produzido	26
Figura 5 - Esquema de Funcionamento do Alto-Forno.....	29
Figura 6 - Fatores intervenientes na carbonatação do concreto	37
Figura 7 - Configuração de carbonatação para materiais ativados com CO ₂	43
Figura 8 - Resistência à compressão axial de pastas contendo 100% de EGAF e pastas contendo 80% de EGAF e 20% de cimento Portland submetidas à cura úmida e à cura por carbonatação.....	45
Figura 9 - Resistência à Compressão para as diferentes composições	47
Figura 10 - Resistência à compressão com diferentes cenários de cura	49
Figura 11 - Resistências à compressão das pastas de escória de magnésio antes e após a cura por CO ₂	52
Figura 12 - Esquema do Protótipo de câmara confeccionada para os ensaios de carbonatação acelerada.....	58
Figura 13 – Comparação visual (a) cimento Portland CP-IV 32 e (b) EGAF moída	59
Figura 14 - EGAF dentro da cuba da argamassadeira para o preparo da pasta de EGAF.....	60
Figura 15 - Misturador de eixo vertical com capacidade de 5 litros e com movimento planetário utilizado para o preparo da pasta à base de EGAF.....	60
Figura 16 – Cilindro tripartido de dimensões 5 cm de diâmetro e 20 cm de altura utilizado para moldagem dos CPs, apresentando uma parte que pode ser desacoplada de forma que o corpo de prova final tenha dimensões de 5x10 cm.	61
Figura 17 - Soquete utilizado para compactação da pasta à base de EGAF para o preparo dos CPs 5X10 cm	62
Figura 18 - Corpos de Prova à base de pasta de EGAF após moldagem e compactação	62
Figura 19 - Estufa utilizada para secagem das amostras de cimento à base de escória ativada por CO ₂ localizada no laboratório de materiais de construção civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)	63
Figura 20 - Pesagem dos CPs antes da secagem em estufa.....	64
Figura 21 - CPs à base de pasta de EGAF colocados na estufa para reduzir o teor de umidade.....	64
Figura 22 - Câmara em funcionamento durante o processo de carbonatação dos CPs de Escória.....	65

Figura 23 – Corpo de prova à base de pasta de escória granulada de alto forno (EGAF) ativada por CO ₂ sendo submetido ao ensaio de resistência à compressão	67
Figura 24 - CP de Escória durante ensaio de resistência à compressão	67
Figura 25 - Influência da Compactação na Resistência à Compressão dos Corpos de Prova (CPs) à base de EGAF	72
Figura 26 - Influência do tempo de carbonatação na Resistência à Compressão dos Corpos de Prova (CPs) à base de EGAF	72
Figura 27 - Corpos de Prova de Cimento à base de escória moldados com relação a/E de 0,17 e 0,20, antes do processo de carbonatação	73
Figura 28 - Corpos de Prova de Cimento à base de escória moldados com relação a/EGAF de 0,17 e 0,20, após o processo de carbonatação	74
Figura 30 - Maiores Resistências à Compressão atingida em 2h de ativação por CO ₂ para as relações a/EGAF de 13%, 17%, 20% e 25%, respectivamente	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química característica das matérias-primas para a moagem da farinha crua em %.	20
Tabela 2 - Composição química de diferentes Escórias de Alto-Forno.....	41
Tabela 3 - misturas foram obtidas para o ensaio	46
Tabela 4 - Valores de resistência à compressão e suas respectivas classes de resistência do concreto correspondentes	48
Tabela 5 - Composição Química da Escória de Magnésio utilizada por Mo <i>et al.</i> (2015) (% em massa)	51
Tabela 6 - Composição Química da EGAF determinada por fluorescência de Raio X, na forma elementar, utilizada para a realização dos ensaios (% em massa) ...	59
Tabela 7 - Resistência à compressão das amostras de corpos de prova (CPs) com 13% de umidade, 10 golpes de compactação e 2h de carbonatação	68
Tabela 8 - Resistência à compressão das amostras de corpos de prova (CPs) com 12% de umidade (após secagem em estufa), 10 golpes de compactação e 5h de carbonatação.....	69
Tabela 9 - Resistência à compressão das amostras de corpos de prova (CPs) com 13% de umidade, 10 golpes de compactação e 48h de carbonatação	69
Tabela 10 - Resistência à compressão das amostras de corpos de prova (CPs) com 13% de umidade, 3 golpes de compactação e 2h e 30min de carbonatação à 40°C	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	CIMENTO	19
2.1.1	Cimento Portland	19
2.1.2	Adições minerais ao Cimento Portland	22
2.2	EGAF: FORMAÇÃO E PROPRIEDADES INTERESSANTES PARA A INDÚSTRIA CIMENTEIRA	24
2.2.1	Processo de Produção da Escória de Alto-Forno	27
2.2.2	Utilização de Escória na Produção de Cimento Portland	30
2.2.3	Composição Química da Escória	32
2.3	CARBONATAÇÃO	34
2.3.1	Fatores que influenciam a carbonatação	36
2.3.2	Comportamento da escória à carbonatação	38
2.3.3	Carbonatação acelerada dos corpos de prova	40
2.3.4	Aplicação de EGAF: desenvolvimento de cimentos a partir da ativação por CO₂	43
3	PARÂMETROS BASEADOS NA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	54
3.1	TEMPERATURA	54
3.2	RELAÇÃO ÁGUA/ESCÓRIA	54
3.3	TEMPO	55
3.4	PRESSÃO	55
3.5	CONCENTRAÇÃO	56
4	MATERIAIS E MÉTODOS	57
4.1	MATERIAIS	57
4.1.1	Escória	57
4.1.2	Água	57
4.1.3	CO₂	57
4.2	PROTÓTIPO DE CÂMARA DE CARBONATAÇÃO	57
4.3	ENSAIOS	58
4.3.1	Preparação da pasta de EGAF ativada por CO₂	59
4.3.2	Moldagem e compactação dos corpos de prova	61
4.3.3	Secagem em estufa	63
4.3.4	Carbonatação dos CPs à base de escória	65
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	67
5.1	RESULTADO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS AMOSTRAS À BASE DE ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO ATIVADA POR CO ₂	67
6	CONCLUSÕES	78
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de adaptação do setor da construção civil à exigência de técnicas que contemplem a redução tanto de resíduos como da emissão de poluentes, denotando uma maior preocupação ambiental, propiciou a retomada do estudo de alternativas em substituição à produção do cimento Portland.

O cimento Portland fabricado hoje é constituído de clínquer, um material sinterizado e peletizado, resultante da calcinação, a uma temperatura aproximada de 1450°C, de uma mistura de calcário, argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera, empregados para garantir que a mistura esteja entre limites específicos (KIHARA e CENTURIONE, 2005)¹. Além do alto consumo energético, o processo gera em média 700 Kg de CO₂ por tonelada de cimento produzido que é lançado direto para o meio ambiente (Anuário Estatístico do Setor de Transformação Não Metálicos, 2017)². Destaca-se que a indústria de cimento Portland é responsável pela emissão de 15% das emissões indiretas de CO₂ de uso não energético, além disso, seu processo de produção consome uma enorme quantidade de energia (HUANG *et al.*, 2018)³, contribuindo, consideravelmente, para o aquecimento global.

Soma-se à contribuição no percentual de emissão de CO₂, a produção anual de resíduos da produção de aço que, segundo Van Zomeren *et al.* (2011)⁴, em todo o mundo chega a 130 milhões de toneladas. Conforme dados da

¹ KIHARA, Y; CENTURIONE, S. L. **O Cimento Portland**. In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. cap. 10, p. 295-322.

² Anuário Estatístico do Setor de Transformação Não Metálicos – Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. – 2017 – Brasília. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 04 nov. 2019.

³ HUANG, L., KRIGSVOLL, G., JOHANSEN, F., LIU, Y., ZHANG, X. Carbon emission of global construction sector. **Rene. Sustain. Energy** Rev. 81, 1906-1916. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.001>>. Acesso em: 04 nov. 2019.

⁴ VAN ZOMEREN, A., VAN DER LAAN, S.R., KOBESSEN, H.B.A., HUIJGEN, W.J.J., COMANS, R.N.J., 2011. Changes in mineralogical and leaching properties of converter steel slag resulting from accelerated carbonation at low CO₂ pressure. **Waste Manag.** n. 31, 2236-2244. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.05.022>>. Acesso em: 11 jul. 2019.

Confederação Nacional da Indústria Brasileira (2017)⁵, os principais coprodutos e resíduos gerados são escória de alto-forno e aciaria, pós e lamas oriundos de sistemas de controle atmosférico.

Esses materiais que seriam descartados em aterros, podem se tornar matéria-prima para pavimentação de estradas, corretivo de solo, fabricação de materiais cerâmicos e cimento.

Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018)⁶, a escória granulada de alto-forno (EGAF) pode ser utilizada entre teores de 6 e 34% no Cimento Portland composto com EGAF (CP II-E) e entre 35 e 75% no cimento Portland de Alto Forno (CP III). Apesar de a NBR 16697 (ABNT, 2018) permitir o uso de até 75% de EGAF no CP III, Humbert e Castro-Gomes (2019)⁷ mostram que é possível a obtenção de cimentos especiais, isentos de clínquer, a partir da ativação da EGAF por CO₂. Ghouleh *et al.* (2015)⁸ apresentaram que resistências à compressão da ordem de 109 MPa foram atingidas por cimentos à base de EGAF ativadas por CO₂.

Isso demonstra que cimentos à base de EGAF curados via carbonatação podem ser um material alternativo na construção civil, pois além de proporcionarem propriedades mecânicas semelhantes – ou até superiores – às dos cimentos Portland, poderão contribuir para minimizar os índices de emissões de CO₂, pois como não necessita do uso de clínquer, principal matéria-prima do Portland, isso diminui a geração de CO₂, que, conforme descrito anteriormente, para cada tonelada de clínquer produzidos, são geradas aproximadamente 700 kg de CO₂; sequestro de CO₂ durante seu próprio processo de ativação, por meio da carbonatação acelerada. Pesquisadores relataram que a carbonatação de 1 kg de

⁵ CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. A indústria do aço no Brasil / Confederação Nacional da Indústria. **Instituto Aço Brasil. – Brasília: CNI**, 2017. 64 p. 1. Sustentabilidade 2. Indústria do Aço I. Título. Disponível em: <https://bucket-gw-cni-static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/filer_public/04/a2/04a2a7ac-4a9f-4505-84a5-f4c54242ead7/aco_brasil.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2019.

⁶ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**. Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, julho de 2018, 12 p.

⁷ HUMBERT, P. S.; CASTRO-GOMES, J. CO₂ activated steel slag-based materials: A review. **Journal of Cleaner Production**. n. 208, p. 448-457, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.058>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

⁸ GHOULEH, Zaid; GUTHRIE, R. I.L.; SHAO, Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. **Construction and Building Materials**. 99, 175-183. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

escória de aço em pó, via processo hidrotérmico, pode sequestrar até 0,25 kg de CO₂.⁹

Neste sentido, com base nos benefícios dos cimentos à base de EGAF ativadas por processo acelerado de carbonatação, este trabalho investigou o processo para sua fabricação e as características destes cimentos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Produzir cimentos especiais (CE) a partir do processo de ativação acelerada por CO₂ de escória granulada de alto forno (EGAF).

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) desenvolver um equipamento que permita a ativação da EGAF por CO₂;
- b) avaliar a influência da temperatura e do tempo de ativação por CO₂ na resistência à compressão;
- c) determinar as condições ideais de temperatura e tempo de ativação acelerada por CO₂ da EGAF que proporcionem melhor desempenho da resistência à compressão dos CE;

1.2 JUSTIFICATIVA

O cimento Portland, produzido e patenteado por Joseph Aspdin em 1824, é amplamente utilizado na construção civil mundial, havendo a necessidade de materiais alternativos que possam substituí-lo, pois, conforme apresentado anteriormente, é um material que consome grandes quantidades de matérias-primas (calcário e argila) e energia (1450°C para produção do clínquer), além de gerar poluição ambiental através da emissão de CO₂.

⁹ HUIJGEN, W.J.J., WITKAMP, G.-J., COMANS, R.N.J., 2005. Mineral CO₂ sequestration by steel slag carbonation. **Environ. Sci. Technol.** 39, 9676-9682. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/es050795f>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

O uso de materiais reciclados na construção é uma questão de grande importância neste século. [...] A redução do cimento Portland na produção irá reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂), reduzir o consumo de energia e reduzir a taxa de aquecimento global. Utilização de cinzas volantes e escórias granuladas de alto-forno geralmente proporciona economia de custos, bem como propriedades aprimoradas de concreto. (SILVA e BENTO, 2018)¹⁰

Materiais de menor impacto ambiental que levem em conta o reaproveitamento de resíduos, a diminuição da emissão e o sequestro de CO₂ surgem como potenciais substitutos ao uso do cimento Portland. Dentre as possibilidades, destaca-se o emprego da EGAF para produção de cimentos especiais, isentos de clínquer, ativados por carbonatação, potencial que merece ser investigado e aprofundado visando sua aplicação no desenvolvimento de materiais alternativos, ambientalmente favoráveis, a serem utilizados na construção civil.

1.3 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente monografia encontra-se organizada em seis capítulos:

- a) **Capítulo 1:** apresentada a contextualização da necessidade e importância do estudo de tecnologias limpas em substituição à produção do cimento Portland, inserindo a realidade da produção e destinação de escória. Apresenta-se, também, os objetivos do trabalho, a justificativa e os tópicos a serem apresentados ao longo da monografia;
- b) **Capítulo 2:** revisão bibliográfica do presente trabalho;
- c) **Capítulo 3:** apresentada a metodologia experimental e os parâmetros utilizados;
- d) **Capítulo 4:** mostrados os resultados dos testes e das análises realizadas, assim como são discutidos os valores obtidos analisando o

¹⁰ SILVA, Eliaquim Imbiriba da; BENTO, Fabíola Tavares. **Os principais avanços e barreiras de novas tecnologias de concreto.** 2018. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_eliaquim_imiriba_da_silva_1.pdf>. Acesso em: 20 set. 2019.

comportamento dos corpos de prova moldados compostos de cimentos especiais à base de escória granulada de alto-forno ativada por CO₂;

- e) **Capítulo 5:** conclusões;
- f) **Capítulo 6:** apresentadas sugestões de novas linhas de pesquisa tendo como referência este trabalho de conclusão de curso.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CIMENTO

Cimento, em uma definição ampla, pode ser descrito como um material com propriedades coesivas e adesivas que o fazem capaz de unir fragmentos minerais na forma de uma unidade compacta. Essa definição abrange uma grande variedade de materiais cimentícios (NEVILLE, 2016)¹¹.

Na área da construção, o significado do termo “cimento” é restrito a materiais aglomerantes utilizados com pedras, areia, tijolos, blocos para alvenaria, etc. (NEVILLE, 2016)¹².

2.1.1 Cimento Portland

O nome “cimento Portland” foi atribuído originalmente devido à semelhança em cor e qualidade do cimento endurecido com a pedra de Portland.

A composição do Portland é principalmente de material calcário, como a rocha calcária ou o giz, e de alumina e sílica encontrada em argilas. Quimicamente, portanto, os constituintes fundamentais do cimento Portland são os óxidos principais do clínquer: a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃) (ISAIA, 2011)¹³. Os componentes básicos para a produção do cimento Portland são encontrados em praticamente todos os países, e existem fábricas em todo o mundo (NEVILLE, 2016)¹⁴.

A fabricação do cimento consiste essencialmente no processo de moagem da matéria-prima, na sua mistura intrínseca em quantidades fixadas e na queima (a temperaturas de até 1.450°C) em grandes fornos rotativos, onde o material é

¹¹ NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016, 888 p.

¹² Ibid.

¹³ ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v.

¹⁴ NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016, 888 p.

sinterizado e parcialmente fundido, tomando a forma de esferas conhecidas como clínquer.

Para produzir 1 tonelada de clínquer, são necessárias de 1,5 a 1,8 toneladas de farinha, denominação dada ao pó resultante da homogeneização das matérias-primas: calcário, argila, areia e minério de ferro que apresentam a composição química característica demonstrada na Tabela 1 (AMBROZEWICZ, 2012)¹⁵.

Tabela 1 - Composição química característica das matérias-primas da farinha crua em %.

	Calcário	Argila	Areia	Minério de Ferro
Al₂O₃	1,50	15,75	5,02	0,40
SiO₂	4,16	64,40	88,23	7,56
Fe₂O₃	0,90	8,92	1,30	83,13
CaO	54,29	0,70	0,63	2,09
MgO	0,36	0,80	0,11	0,13
K₂O	---	2,79	2,66	0,08
Na₂O	---	0,06	0,37	0,06
Perda ao Fogo	41,00	6,14	1,00	4,92

Fonte: Adaptado de Ambrozewicz (2012)¹⁶.

Após um complexo e contínuo processo de queima, o clínquer é resfriado rapidamente com o objetivo de impedir que as reações de transformações mineralógicas obtidas no interior do forno sejam revertidas durante o resfriamento (ISAIA, 2011)¹⁷. O clínquer (Figura 1), após a calcinação, recebe a adição de uma certa proporção de magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de sulfato de cálcio (CaSO₃) para retardar o tempo de pega do produto (PERUZZI, 2002)¹⁸.

¹⁵ AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de construção**. São Paulo: Pini, 2012.

¹⁶ Ibid.

¹⁷ ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v.

¹⁸ PERUZZI, A. de P. **Comportamento das Fibras de Vidro Convencionais em Matriz de Cimento Portland Modificada com Látex e Adição de Sílica Ativa**. Dissertação (Mestrado). São Carlos, 2002. USP, Escola de Engenharia de São Carlos. Disponível em:

Figura 1 - Clínquer



Fonte: (Blog Cimento Mauá, 2019)¹⁹

A partir da moagem do clínquer, cujo aspecto pode ser observado na Figura 1, obtém-se o Cimento Portland também chamado de cimento hidráulico, pois sua dureza se desenvolve por reações químicas com a água (CALLISTER *et al.*, 2016)²⁰.

Pode-se observar que o processo de fabricação do cimento Portland denominado de clinquerização ou calcinação é responsável por um substancial consumo energético e de matérias-primas não renováveis, além de emitir elevadas quantidade de CO₂.

Portanto, apesar de mundialmente empregado, dentro do conceito de desenvolvimento sustentável o cimento Portland está distante de ser a melhor alternativa. Nesse sentido, tem-se desenvolvido uma utilização cada vez maior de adições minerais em substituição ao cimento ou ao clínquer (ISAIA, 2011)²¹.

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18131/tde-13112002-180613/pt-br.php>>. Acesso em: 14 set. 2019.

¹⁹ BLOG CIMENTO MAUÁ. **Como é feito o cimento, sua composição e nomenclatura no mercado**. Disponível em: <https://cimentomaua.com.br/blog/cimento-como-feito-composicao-e-nomenclatura/>. Acesso em: 03 dez. 2019.

²⁰ CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G; tradução de Sergio Murilo Stamile Soares. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

²¹ ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v.

Somado à preservação ambiental, o uso de adições minerais permite obter diversas vantagens técnicas nos concretos produzidos, conforme será apresentado no próximo item.

2.1.2 Adições minerais ao Cimento Portland

As adições mais utilizadas no cimento são a escória de alto-forno, cinzas volantes e cinzas de casca de arroz (OLIVEIRA, 2015)²².

Segundo Isaia (2011)²³, as adições minerais, de acordo com sua ação físico-química, podem ser classificadas em três grandes grupos:

- material pozolânico;
- fíler;
- material cimentante;

Os materiais pozolânicos, também chamados de silicosos ou sílico-aluminosos, são rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas encontradas na natureza, além de algumas argilas queimadas em temperaturas elevadas (500 a 900°C) e derivados da queima de carvão mineral (AMBROZEWICZ, 2012)²⁴. As reações de endurecimento apenas ocorrem, além da água, na presença do clínquer, quando a pozolana combina-se com hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento. Forma-se, então, um material com maior impermeabilidade e mais resistentes às águas agressivas.

São exemplos de material pozolânico: a cinza volante de baixo teor de cálcio, a pozolana natural, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim.

²² OLIVEIRA, Vanessa Carina Heinrichs Chirico. **Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos estruturais.** Tese. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde25072016144256/publico/VanessaCarinaHeinrichsChiricoOliveira2015.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2019.

²³ ISAIA, G. C., op. cit.

²⁴ AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de construção.** São Paulo: Pini, 2012.

Na Figura 2, visualiza-se o dique seco de Rio grande (RS), um exemplo de obra em que se utilizou a sílica ativa na sua execução.

Figura 2 - Dique seco na cidade de Rio Grande – RS em que foi utilizado a sílica ativa no concreto



Fonte: (WTorre, 2006)²⁵

A utilização da sílica na obra acima (Figura 2), na cidade de Rio Grande (RS), teve como objetivo aumentar a durabilidade e alcançar resistências mais altas, propriedades muito importantes na manutenção da estrutura da laje de fundo do dique seco que está inserida em um ambiente marinho (MAGALHÃES e REAL, 2010)²⁶.

Em relação ao fíler, ele é considerado um material carbonático, proveniente de rochas moídas, que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição, tais como o próprio calcário. Tal adição exerce um efeito benéfico sobre algumas propriedades do concreto, como trabalhabilidade, massa específica,

²⁵ WTorre. **Portfólio: Estaleiro Rio Grande (ERG)**. Disponível em: <http://www.rpeotta.com.br/portifolio/case.php?cliente=WTorre>. Acesso em: 03 dez. 2019.

²⁶ MAGALHÃES, Fábio Costa; REAL, Mauro de V. **Análise comparativa entre estimadores normatizados de resistência à compressão do concreto aplicada ao concreto utilizado na laje de fundo do dique seco do polo naval do Rio Grande na cidade de Rio Grande-RS**. Rio Grande: FURG, 2010, 13 p. Disponível em: <<http://repositorio.furg.br/handle/1/5022>>. Acesso em: 01 set. 2019.

permeabilidade, capilaridade, exsudação e tendência à fissuração (NEVILLE, 2016)²⁷.

Sobre o material cimentante, sua característica principal é não necessitar de cálcio presente no cimento Portland para a formação de produtos cimentantes como o C-S-H (silicatos de cálcio hidratados). Porém, sua auto hidratação é lenta, o que é contornado quando usado como adição ou substituição ao Portland em que a presença de hidróxido de cálcio e gipsita acelera sua hidratação (ISAIA, 2011)²⁸. A principal representante desse grupo é a escória granulada de alto-forno, cujas propriedades interessantes à indústria cimenteira serão analisadas mais detalhadamente nos próximos itens.

2.2 EGAF: FORMAÇÃO E PROPRIEDADES INTERESSANTES PARA A INDÚSTRIA CIMENTEIRA

O processo de implantação de uma indústria desenvolve-se acompanhado da conseqüente produção de resíduos e do desafio de conciliar a preocupação ambiental com o investimento econômico. Tal cenário pode ser verificado na indústria siderúrgica que tem a escória de aço como seu principal subproduto, o qual é produzido em larga escala, sendo a maior parte desta produção descartada em aterros (HUMBERT e CASTRO-GOMES, 2019)²⁹.

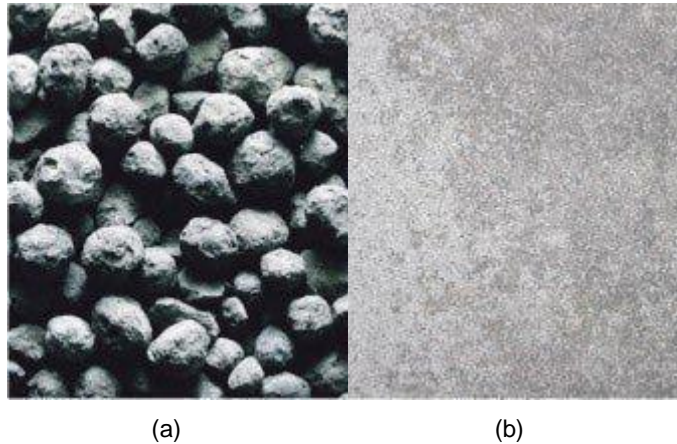
Na Figura 3, são apresentadas imagens da EGAF, sendo que na Figura 3a encontra-se na forma granular semelhante ao clínquer, enquanto na Figura 3b, pode-se visualizar a escória após o processo de moagem, caracterizada por ser um pó fino de cor mais clara que o cimento Portland.

²⁷ NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016, 888 p.

²⁸ ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v.

²⁹ HUMBERT, P. S.; CASTRO-GOMES, J. **CO₂ activated steel slag-based materials: A review**. **Journal of Cleaner Production**. n. 208, p. 448-457, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.058>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

Figura 3 - Escória de Alto-Forno: (a) EGAF granulada; (b) EGAF após processo de moagem.



Fonte: (PINTEREST, 2019)³⁰

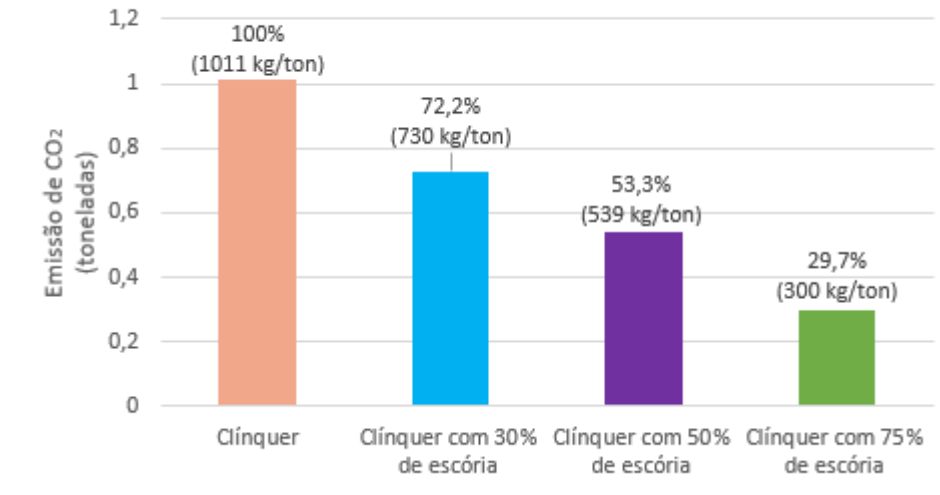
A reciclagem de escória de alto-forno no Brasil está praticamente limitada a sua aplicação na indústria de cimento Portland (JOHN e AGOPYAN, 2000)³¹. Segundo o Relatório de Sustentabilidade 2018 do Instituto Aço Brasil³², em 2016 e 2017 os agregados siderúrgicos de alto-forno (escórias) em sua quase totalidade foram vendidos nos dois anos (96% em 2016 e 92% em 2017), especialmente para a produção de cimento (99%). Dentre os benefícios de seu emprego na produção do Portland, pode-se citar a redução da emissão de CO₂ como pode ser observado no **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

³⁰ PINTEREST. Escória de Alto Forno. Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/263812490652020421/>. Acesso em: 03 dez. 2019.

³¹ AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Reciclagem de Escória de Alto Forno no Brasil. **Anais..** São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2000. Disponível em: <<https://bdpi.usp.br/item/001175589>>. Acesso em: 10 jul. 2019

³² INSTITUTO DE AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade de 2018. 2018. Disponível em: http://www.acobrasil.org.br/site2015/downloads/relatorio_sustentabilidade_2012.pdf. Acesso em: 16 ago. 2019.

Figura 4 -Emissão de CO₂ por tonelada de cimento produzido



Fonte: Adaptado de Ehrenberg e Gesler (2000) apud Reschke (2003)³³

Na Figura 4, pode-se observar que enquanto um cimento composto 100% de clínquer emite 1011 kg/tonelada de CO₂, com a adição de 75% de escória, pode-se alcançar o valor de 300 kg/tonelada, significando uma redução de aproximadamente 70% na emissão de dióxido de carbono.

Apesar da maior parte da produção da escória destinar-se à fabricação do cimento Portland, outras aplicações podem ser dadas a esse material como utilização em pavimentação e lastros de vias férreas. Além dos empregos citados, sabe-se que seu potencial cimentante e contribuição na redução de CO₂ pode ser melhor explorado a partir da ativação por carbonatação.

A escória de aço utilizada como alternativa à matéria-prima reciclada ativada por CO₂ está sendo estudada recentemente e considerada uma solução para armazenar CO₂, reduzir as emissões de GEE (Gases do

³³ RESCHKE, Juliana Soares. **Escória granulada de fundição utilizada como substituição ao cimento em concretos: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade**. Dissertação: UFRGS. Porto Alegre, 2003. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4481/000457136.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 01 set. 2019.

Efeito Estufa), bem como reciclar e valorizar os resíduos da indústria siderúrgica. (HUMBERT e CASTRO-GOMES, 2019, tradução nossa)³⁴.

Portanto, estudos sobre as propriedades e comportamento da EGAF à ativação por CO₂, que serão apresentados ao longo do trabalho, têm considerado o desenvolvimento de cimentos especiais ativados por carbonatação no quais a escória é a base da composição como alternativa em substituição ao descarte em aterros ou mesmo como possibilidade de maior aproveitamento do potencial desse subproduto da indústria siderúrgica quando comparado com sua reciclagem na indústria do cimento Portland.

2.2.1 Processo de Produção da Escória de Alto-Forno

As escórias se formam pela fusão das impurezas do minério de ferro, juntamente com a adição de fundentes apropriados e cinzas do carvão utilizado.

A escória de alto-forno é um material oriundo sobretudo do processo de produção do ferro gusa, contendo principalmente silicatos e sílico-aluminatos de cálcio amorfos (ALMEIDA, 2009)³⁵.

Como a escória é produzida juntamente com o ferro-gusa, o controle da produção garante a sua baixa variabilidade. A escória é posteriormente granulada ou peletizada – o termo granulada é geralmente mais utilizado. A escória granulada pode ser moída até a finura desejada, mas, em geral, é maior do que 350 m²/kg, ou seja, é mais fina do que o cimento Portland (NEVILLE, 2016, p. 691)³⁶

A produção de ferro gusa é realizada, geralmente, em altos fornos capazes de alcançar a temperatura de até 1500 °C, neles são introduzidos o minério de

³⁴ HUMBERT, P. S.; CASTRO-GOMES, J. CO₂ activated steel slag-based materials: A review. **Journal of Cleaner Production**. n. 208, p. 448-457, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.058>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

³⁵ ALMEIDA, A.J. **Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto**. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009, 74 p. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ISMS-8BVPZX/disserta_o_janaina.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10 ago. 2019.

³⁶ NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016, 888 p.

ferro, o combustível (carvão mineral ou vegetal) e os fundentes (SANTOS, 2013)³⁷. À medida que as reações se processam, esses materiais vão descendo até atingir a parte inferior do forno, chegando sob forma de gusa e escória líquidos, a separação dos dois materiais se dá pela diferença de suas densidades (ALMEIDA, 2009)³⁸.

No processo de granulação da escória de alto-forno, a escória, ainda no estado líquido, em queda livre, é interceptada por um jato de água fria com pressão de 0,6 MPa, na quantidade de 3 toneladas de água por tonelada de escória, sendo depositada em um tanque com água. O choque dos dois materiais provoca o resfriamento brusco da escória e sua redução a um material granular, de distribuição granulométrica similar à da areia de quartzo natural, porém de forma mais angular (JOHN & AGOPYAN, 2000)³⁹.

Além disso, a escória fundida ao sair do alto-forno pode ser submetida a diferentes processos de resfriamento que conferem ao material características particulares (ALMEIDA, 2009)⁴⁰.

Na Figura 5, apresenta-se o esquema de funcionamento do Alto-Forno que recebe, inicialmente, a carga metálica, os fundentes e o coque (carvão) e como resultado das reações obtêm-se o gusa (matéria-prima para a obtenção do aço) e a escória.

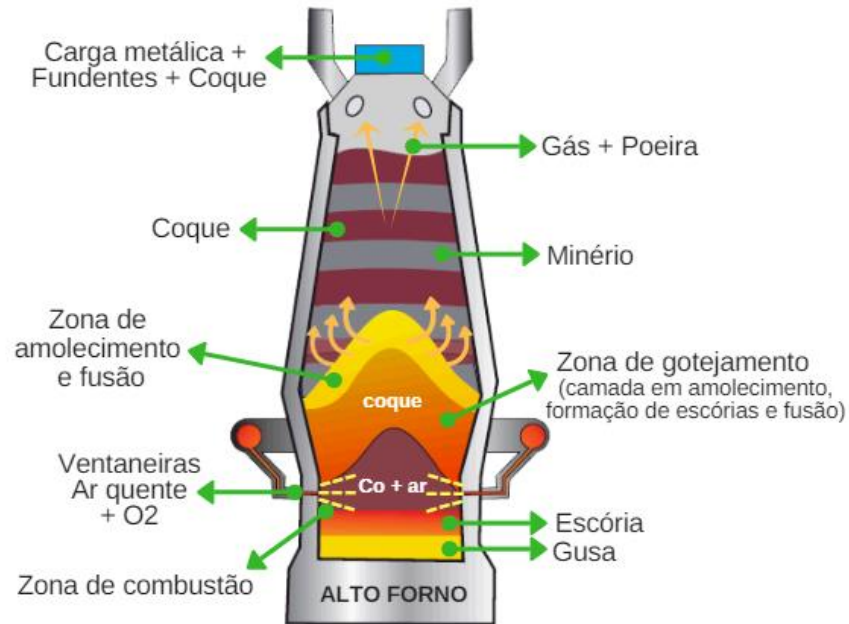
³⁷ SANTOS, P. B dos. Estudo da utilização da escória de alto forno como agregado graúdo em concretos fabricados em Marabá. Universidade Federal do Pará. Marabá, 2013, 59 p. Disponível em: <<https://femat.unifesspa.edu.br/images/TCCs/2013/TCC-PAMELLA-BARROS-DOS-SANTOS-2013.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

³⁸ ALMEIDA, A.J. **Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto**. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009, 74 p. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ISMS8BVPZX/disserta_o_jana_ina.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10 ago. 2019.

³⁹ AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Reciclagem de Escória de Alto Forno no Brasil. **Anais..** São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2000. Disponível em: <<https://bdpi.usp.br/item/001175589>>. Acesso em: 10 jul. 2019

⁴⁰ ALMEIDA, A.J., *op. cit.*

Figura 5 - Esquema de Funcionamento do Alto-Forno



Fonte: (USIMINAS, 2019)⁴¹

Segundo Neville (2016)⁴², são produzidos cerca de 300 kg de escória por tonelada de ferro gusa, um número expressivo quando analisados os dados da produção de aço. Em 2016, por exemplo, a produção de aço bruto no Brasil totalizou 31,3 milhões de toneladas (INSTITUTO DO AÇO BRASIL, 2018)⁴³. Portanto, pode-se observar que a quantidade de resíduo disponível é suficientemente grande para justificar o desenvolvimento de estudos sobre a aplicação da escória na produção de cimentos isentos de clínquer ativado por carbonatação.

⁴¹ USIMINAS. **Usiminas retoma produção do Alto-Forno**. Disponível em: <https://www.usiminas.com/blog/usiminas-retoma-producao-do-alto-forno-1-em-ipatinga/>. Acesso em: 03 dez. 2019.

⁴² NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016, 888 p.

⁴³ INSTITUTO DE AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade de 2018. 2018. Disponível em: http://www.acobrasil.org.br/site2015/downloads/relatorio_sustentabilidade_2012.pdf. Acesso em: 16 ago. 2019.

2.2.2 Utilização de Escória na Produção de Cimento Portland

A mistura da escória granulada com o clínquer Portland é uma das formas mais antigas de reciclagem da escória (JOHN e AGOPYAN, 2000)⁴⁴. Vicat foi o primeiro pesquisador que previu a possibilidade do emprego da escória na indústria do cimento, notando as semelhanças das composições químicas do cimento e da escória (SILVA, 1991)⁴⁵.

Apesar de a EGAF (escória granulada de alto-forno) ser capaz de reagir em presença de água, desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante à do clínquer, as reações de hidratação da escória são muito lentas e, para que seu emprego seja possível, são necessários ativadores químicos e físicos (AMBROZEWICZ, 2012)⁴⁶. O hidróxido de cálcio liberado durante a ativação do clínquer é o principal ativador químico da escória quando esta é adicionada ao cimento, enquanto que a ativação física se obtém com a finura decorrente da moagem da escória separada ou conjuntamente com o clínquer (ISAIA, 2011)⁴⁷.

No Brasil, a adição de EGAF ao cimento Portland de alto-forno é normatizada pela NBR 16697 (ABNT, 2018)⁴⁸ que estabelece que o teor de escória deve estar entre 35% e 70% no cimento Portland de alto forno (CP III) e entre 6 e 34% no Cimento Portland composto com EGAF (CP II-E). Logo, com tais limites de teor no emprego desse resíduo, apesar de boa parte das escórias geradas no Brasil serem destinadas à reciclagem na produção de cimento como mostram os dados do Relatório de Sustentabilidade 2018 do Instituto Aço Brasil,

⁴⁴ AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Reciclagem de Escória de Alto Forno no Brasil. **Anais..** São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2000. Disponível em: <<https://bdpi.usp.br/item/001175589>>. Acesso em: 10 jul. 2019

⁴⁵ SILVA, Moema Ribas. **Materiais de Construção**. 2. ed. rev. São Paulo: Pini, 1991.

⁴⁶ AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de construção**. São Paulo: Pini, 2012.

⁴⁷ ISAIA, G. C. Concreto: **Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v.

⁴⁸ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**. Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, julho de 2018, 12 p.

ainda existem sobras significativas e enormes pilhas de estoque (JOHN e AGOPYAN, 2000)⁴⁹.

A adição de EGAF ao cimento Portland, além de reduzir a quantidade de CO₂ pela descarbonatação, diminui, também, a quantidade de combustível, uma vez que a EGAF não precisa ser calcinada como ocorre na produção do clínquer (JOHN e AGOPYAN, 2000)⁵⁰. Segundo Yamamoto *et al.* (1997)⁵¹, nas condições da indústria de cimento brasileira, a substituição de 60% do clínquer por EGAF permite uma redução de CO₂ na proporção de 494 Kg por tonelada de cimento.

Além das inúmeras vantagens do ponto de vista ambiental, a produção do cimento Portland com adição de escória apresenta também representativos benefícios de engenharia como a redução da permeabilidade, resultado da densificação da microestrutura da pasta de cimento hidratada, como maior quantidade de poros preenchidos com C-S-H do que em pasta constituída somente de cimento Portland (NEVILLE, 2016)⁵². A penetrabilidade baixa aumenta a resistência a sulfatos e é eficaz no controle da reação álcali-sílica.

Segundo Peruzzi (2002)⁵³, a adição de EGAF ao cimento Portland ainda confere propriedades como controle da velocidade e menor liberação de calor na hidratação, características interessantes para obras de concreto e argamassa em ambientes marinhos e concretagem de grandes volumes.

Dados os benefícios apresentados pela simples adição da EGAF a concretos ou como substituição parcial ao clínquer, percebe-se a potencialidade

⁴⁹ AGOPYAN, V.; JOHN, V. M., op. cit.

⁵⁰ AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Reciclagem de Escória de Alto Forno no Brasil. **Anais..** São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2000. Disponível em: <<https://bdpi.usp.br/item/001175589>>. Acesso em: 10 jul. 2019

⁵¹ YAMAMOTO, J. K.; KIHARA, Y.; COIMBRA, A. M.; MONTANHEIRO, T. J. (1997). Environmental Impact Reduction on the Production of Blended Portland Cement in Brazil. *Environmental Geosciences*, v. 4, n. 4, p. 192-206, dez. 1997. Disponível em: <http://archives.datapages.com/data/deg/1997/004004/192_deg040192.htm>. Acesso em: 30 ago. 2019.

⁵² NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016, 888 p.

⁵³ PERUZZI, A. de P. **Comportamento das Fibras de Vidro Convencionais em Matriz de Cimento Portland Modificada com Látex e Adição de Sílica Ativa**. Dissertação (Mestrado). São Carlos, 2002. USP, Escola de Engenharia de São Carlos. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18131/tde-13112002-180613/pt-br.php>>. Acesso em: 14 set. 2019.

da EGAF como material cimentício. Além disso, suas propriedades químicas e comportamento à carbonatação, demonstram que quando ativada por CO₂ pode ser utilizada até mesmo no desenvolvimento de cimentos isentos de clínquer, como será apresentado nos próximos itens.

2.2.3 Composição Química da Escória

A composição química das escórias pode variar segundo a matéria-prima utilizada, processo de produção, revestimento do convertedor, tipo de aço produzido, forma de resfriamento da escória e sua armazenagem (RODRIGUES, 2007)⁵⁴, sendo também um fator importante para sua reatividade ao CO₂ (HUMBERT e CASTRO-GOMES, 2019)⁵⁵.

Silva (2006)⁵⁶ define como os principais constituintes da escória os seguintes: óxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), estes representam 95% da composição desse material; os óxidos de manganês e ferro também fazem parte da composição, sendo elementos secundários. Quimicamente, portanto, a escória é uma mistura de óxido de cálcio, sílica e alumina, os mesmos óxidos que compõem o cimento Portland, mas não nas mesmas proporções (NEVILLE, 2016)⁵⁷. Sabe-se, também, que a massa específica da escória de alto-forno é cerca de 2,90 g/cm³, um pouco menor que a do cimento Portland (cerca de 3,15 g/cm³) (NEVILLE, 2016)⁵⁸.

⁵⁴ RODRIGUES, G. L. C. **Caracterização e Avaliação da Expansibilidade de Escórias de Aciaria LD não Tratadas e Tratadas**. 2007. 171 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

⁵⁵ HUMBERT, P. S.; CASTRO-GOMES, J. CO₂ activated steel slag-based materials: A review. **Journal of Cleaner Production**. n. 208, p. 448-457, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.058>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

⁵⁶ SILVA, A. L. **Reciclagem de Escória Cristalizada para a Produção de Argamassas**. 2006. 81 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2006. Disponível em: <<https://saturno.unifei.edu.br/bim/0030717.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2019.

⁵⁷ NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016, 888 p.

⁵⁸ NEVILLE, A. M., op. cit.

Apesar da escória ter uma composição análoga à do clínquer (razão pela qual é considerada um material cimentante), ela possui propriedades hidráulicas latentes (GHOULEH *et al.*, 2015)⁵⁹, diferente do clínquer cujas características hidráulicas são acentuadas. Isso se deve ao fato do teor de SiO₂ na escória ser amorfo e à pequena quantidade de silicatos tricálcicos apresentada em suas fases mineralógicas (ROSLAN *et al.*, 2016).⁶⁰

[...] o potencial de ligação e a contribuição da escória de aço na resistência à compressão em sistemas de cimento Portland não são significativos para métodos convencionais de hidratação/umidade. (HUMBERT e CASTRO-GOMES, 2019, tradução nossa)⁶¹.

Outra característica de algumas escórias, como a escória de aciaria elétrica é sua expansão desordenada e instabilidade de volume ao longo do tempo causada pelo alto teor de CaO/MgO livres sendo uma desvantagem à sua substituição e uso no cimento tradicional (ABU-EISHAH *et al.*, 2012)⁶². Tal expansão pode ser evitada ou reduzida pela carbonatação da escória de aço devido ao consumo de calcário livre, a principal fase expansível (HUIJGEN *et al.*, 2005)⁶³.

Nesse sentido, observa-se que apesar de sua contribuição na resistência pelos métodos tradicionais de hidratação não ser significativa, a escória apresenta

⁵⁹ GHOULEH, Zaid; GUTHRIE, R. I.L.; SHAO, Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. **Construction and Building Materials**. 99, 175-183. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

⁶⁰ ROSLAN, N.H., ISMAIL, M., ABDUL-MAJID, Z., GHOREISHIAMIRI, S., MUHAMMAD, B., 2016. Performance of steel slag and steel sludge in concrete. **Construction and Building Materials**. 104, 16-24. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.008>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

⁶¹ HUMBERT, P. S.; CASTRO-GOMES, J. CO₂ activated steel slag-based materials: A review. **Journal of Cleaner Production**. n. 208, p. 448-457, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.058>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

⁶² ABU-EISHAH, S.I., EL-DIEB, A.S., BEDIR, M.S., 2012. Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. **Construction and Building Materials**. 34, 249-256. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.012>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

⁶³ HUIJGEN, W.J.J., WITKAMP, G.-J., COMANS, R.N.J., 2005. Mineral CO₂ sequestration by steel slag carbonation. **Environ. Sci. Technol.** 39, 9676-9682. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/es050795f>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

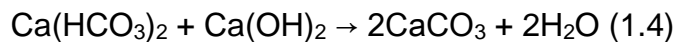
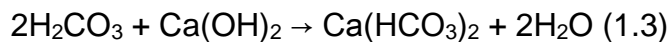
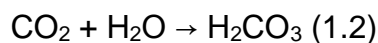
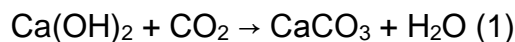
propriedades químicas as quais possibilitam que o potencial aglutinante da escória de aço possa ser alcançado através da carbonatação.

2.3 CARBONATAÇÃO

Resumidamente, a carbonatação consiste em transformar íons alcalinos como os cátions de sódio, potássio e, sobretudo, de cálcio em sais de carbonatos desses elementos, pela ação ácida do dióxido de carbono (ISAIA, 2011)⁶⁴.

Nos materiais tradicionais de construção, como a cal hidratada, muito utilizada na produção de argamassas, o processo de carbonatação tem como objetivo a reação de endurecimento (CALLISTER e RETHWISCH, 2016)⁶⁵. Já no concreto armado, o processo de carbonatação não é interessante, pois carbonata a Portlandita (Ca(OH)_2), baixando o pH, podendo conduzir à despassivação do aço e início do processo de corrosão.

Siqueira *et al.* (2017)⁶⁶ apresentam as reações químicas que ocorrem no processo de carbonatação. A Equação 1 representa a equação geral da carbonatação e pode ser descrita por três etapas.



Na primeira etapa do processo de carbonatação (Equação 1.2), o gás carbônico atmosférico é dissolvido na água intersticial do concreto formando o

⁶⁴ ISAIA, G. C. Concreto: **Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v.

⁶⁵ CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução: Sergio Murilo Stamile Soares. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

⁶⁶ SIQUEIRA, M.V.; SANTOS, A.M; AQUINO, J.T; MOTA, J.M.F. Análise de carbonatação e corrosão por íons cloreto em uma passarela da zona Oeste do Recife. **Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estrutura, 2017**.

ácido carbônico (H_2CO_3). Na segunda etapa (Equação 1.2), o ácido carbônico reage com o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ originando bicarbonato de cálcio $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ e água. Na Equação 2.3, a terceira da carbonatação, o bicarbonato de cálcio e o hidróxido de cálcio dão origem, em uma reação de dupla troca, ao carbonato de cálcio e água.

A carbonatação natural de materiais à base de cimento foi normalmente considerada como processo cujos resultados resumiam-se a efeitos prejudiciais sobre a durabilidade dos materiais (MO *et al.*, 2019)⁶⁷. No entanto, alguns pesquisadores como Šavijaa *et al.* (2016)⁶⁸, Rostami *et al.* (2012)⁶⁹ e Zhang *et al.* (2017) demonstraram benefícios da carbonatação controlada nos materiais à base de cimento. Sabe-se, hoje, que a carbonatação contribui para melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade dos materiais enquanto armazena e usa CO_2 como fonte para a reação (JANG *et al.*, 2016)⁷⁰.

A cura com CO_2 dos produtos de cimento Portland ou agregados reciclados passou a ser utilizada para melhorar o desempenho em busca de benefícios como diminuição da adsorção de água, melhor resistência ao congelamento e descongelamento, além de maior resistência à penetração de cloretos no concreto que foram obtidos após o tratamento de carbonatação (PAN *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2016).⁷¹

⁶⁷ MO, L.; HAO, Y.; LIU, Y.; WANG, F.; DENG, M. Preparation of calcium carbonate binders via CO_2 activation of magnesium slag. *Cement and Concret Research*. 121 (2019) 81-90. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.005>. Acesso em: 15 ago. 2019.

⁶⁸ ŠAVIJA, B.; LUKOVIC, M. Carbonation of cement paste: understanding, challenges, and opportunities, *Constr. Build. Mater.* 117 (2016) 285–301. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.138>. Acesso em: 15 ago. 2019.

⁶⁹ ROSTAMI, V.; SHAO, Y.; BOYD, A. J.; HE, Z. Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing, *Cem. Concr. Res.* 42 (2012) 186–193. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.010>. Acesso em: 15 ago. 2019.

⁷⁰ JANG, J.G., KIM, G.M., KIM, H.J., LEE, H.K., 2016. Review on recent advances in CO_2 utilization and sequestration technologies in cement-based materials. **Construction and Building Materials**. 127, 762-773. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.017>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

⁷¹ PAN, X.; SHI, C.; HU, X.; OU, Z. Effects of CO_2 surface treatment on strength and permeability of one-day-aged cement mortar, *Constr. Build. Mater.* 154 (2017) 1087–1095. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.216>. Acesso em: 15 ago. 2019.

Mo⁷² e Panesar⁷³ *et al.* utilizaram a carbonatação para curar as misturas de cimento que consistiam em magnésia reativa, escória de alto-forno granular moída e cimento Portland para obter ligantes à base de carbonatos de Ca/Mg. Sugere-se que, na presença de Mg, a incorporação desse elemento químico em carbonato de cálcio promove a conectividade e aglomeração do carbonato de cálcio, produzindo uma substância mais forte e, conseqüentemente, obtendo maior resistência mecânica (Mo *et al.*, 2012⁷⁴; Panesar *et al.*, 2013⁷⁵). A melhoria do desempenho mecânico da escória carbonatada é principalmente atribuída às estruturas de rede densas e interligadas dos produtos de carbonato (MO *et al.* 2019)⁷⁶.

Pode-se observar que a carbonatação, antes resumida como um processo prejudicial à durabilidade dos materiais, pode significar benefícios quando controlada. No item a seguir serão abordados os fatores que irão influenciar esse processo de carbonatação.

2.3.1 Fatores que influenciam a carbonatação

A carbonatação, enquanto processo químico, não ocorre sem que sofra influência de características químicas e físicas do ambiente e do corpo de prova

⁷² PANESAR, D.K.; MO, L. Accelerated carbonation – a potential approach to sequester CO₂ in cement paste containing slag and reactive MgO, **Cem. Concr. Compos.** 43 (2013) 69–77. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.07.001>. Acesso em: 15 ago. 2019.

⁷³ PANESAR, D.K.; MO, L., *op. cit.*

⁷⁴ PANESAR, D.K.; MO, L. Effects of accelerated carbonation on the microstructure of Portland cement pastes containing reactive MgO, **Cem. Concr. Res.** 42 (2012) 769–777. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.02.017>. Acesso em: 15 ago. 2019.

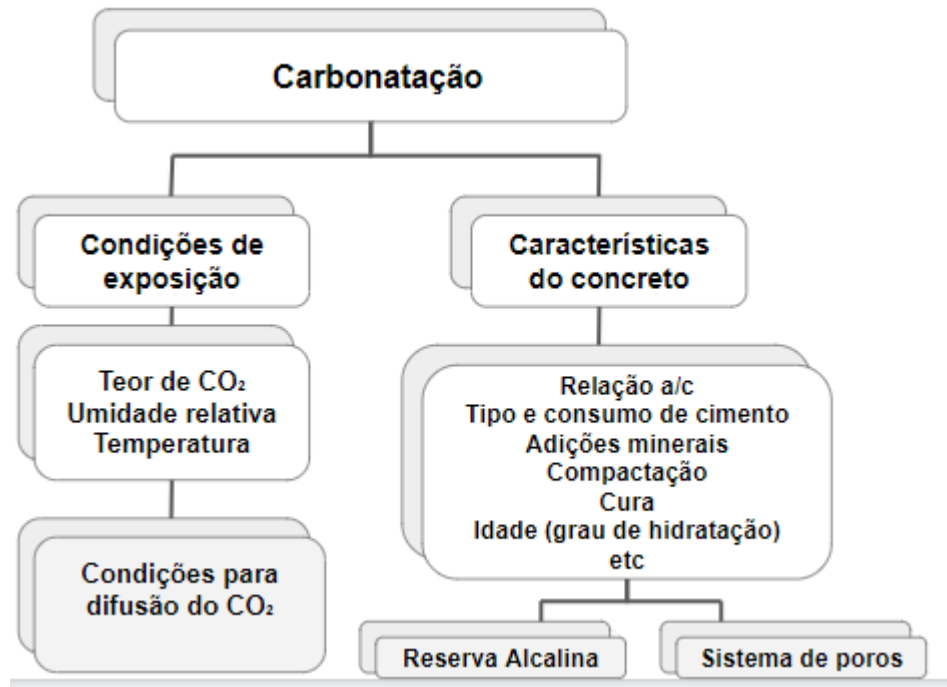
⁷⁵ PANESAR, D.K.; MO, L. Properties of binary and ternary reactive MgO mortar blends subjected to CO₂ curing, **Cem. Concr. Compos.** 38 (2013) 40–49. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.009>. Acesso em: 15 ago. 2019.

⁷⁶ MO, L.; HAO, Y.; LIU, Y.; WANG, F; DENG, M. Preparation of calcium carbonate binders via CO₂ activation of magnesium slag. **Cement and Concret Research.** 121 (2019) 81-90. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.005>. Acesso em: 15 ago. 2019.

(CP) em análise: o tipo de cimento, a relação água/cimento (a/c) e o grau de hidratação são relevantes (NEVILLE, 2016, p. 521)⁷⁷.

Isaia (2011)⁷⁸ apresentou na sistematização abaixo o que considera ser os principais fatores intervenientes na carbonatação:

Figura 6 - Fatores intervenientes na carbonatação do concreto



*a/c: relação água/cimento

Fonte: (ISAIA, 2011)⁷⁹.

Em conjunto, todos os fatores interferem no processo de carbonatação, no entanto, considera-se como fator de controle da carbonatação de maior influência a difusividade da pasta de cimento endurecida (NEVILLE, 2016)⁸⁰ que é uma função do sistema de poros da pasta enquanto ocorre a difusão de CO₂.

⁷⁷ NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016, 888 p.

⁷⁸ ISAIA, G. C. Concreto: **Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v.

⁷⁹ ISAIA, G. C. Concreto: **Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v.

⁸⁰ NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016, 888 p.

À medida que a concentração de CO₂ no ar é mais elevada, o fenômeno da carbonatação é mais rápida e intensa devido às maiores taxas de difusão do CO₂ (ISAIA, 2011)⁸¹. A taxa com que o concreto sofre a carbonatação também é determinada pela sua permeabilidade, pelo grau de saturação com água e pela massa de hidróxido de cálcio disponível (FONSECA, 2010)⁸².

Portanto, o processo de carbonatação não ocorre isoladamente, diversos são os fatores que influenciam o mecanismo dessa reação, interferindo nos resultados desse fenômeno fisicamente ou quimicamente.

2.3.2 Comportamento da escória à carbonatação

A escória de aço, um subproduto industrial típico produzido durante o processo de fabricação de aço, geralmente contém CaO abundante e exibe alta reatividade à carbonatação e, portanto, grande capacidade de adsorção de CO₂ (MO *et al.*, 2017)⁸³. Mo *et al.* analisou nesse estudo a escória produzida em fornos de oxigênio (BOF).

Segundo Boone *et al.* (2014)⁸⁴, que realizou estudos com escórias de aço inoxidáveis, a escória tem alta reatividade de carbonatação devido ao seu teor de CaO/MgO livres, tornando-a, portanto, uma boa matéria-prima para materiais de construção ativados por carbonatação.

O princípio básico por trás do sequestro de CO₂ mineral é imitar os processos naturais de intemperismo nos quais os minerais contendo cálcio ou

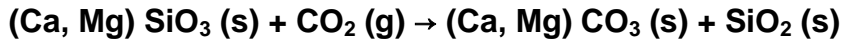
⁸¹ ISAIA, G. C., op. cit.

⁸² FONSECA, Gustavo Celso. Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica. Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ISMS8ALHAQ/disserta_o_mestrado_gustavo.pdf?sequence=1>. Acesso em: 31 ago. 2019.

⁸³ Mo, L.; Zhang, F.; Deng, M.; Jin, F.; Al-Tabbaa, A.; Wang, A., 2017. Accelerated carbonation and performance of concrete made with steel slag as binding materials and aggregates. **Cemen. Concr. Compos.** 83, 138-145. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.018>>. Acesso em: 21 set. 2019.

⁸⁴ BOONE, M.A., NIELSEN, P., DE KOCK, T., BOONE, M.N., QUAGHEBEUR, M., CNUUDE, V., 2014. Monitoring of stainless-steel slag carbonation using X-ray computed microtomography. **Environ. Sci. Technol.** 48, 674 e 680. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/es402767q>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

magnésio são convertidos em carbonatos de cálcio ou magnésio (HUIJGEN *et al.*, 2005)⁸⁵.



Fonte: (UKWATTAGE *et al.*, 2017)⁸⁶

Além do CaO/MgO livres, há ainda a contribuição do silicato de cálcio hidráulico (Ca₃SiO₅ (C₃S), b-Ca₂SiO₄ (C₂S)), silicato de cálcio não hidráulico (g-C₂S, CaSiO₃ (CS)) e Portlandita (produtos de hidratação de CaO livre ou silicato de cálcio) que também são componentes reativos à carbonatação, presentes na escória (GHOULEH *et al.*, 2015)⁸⁷. Esses componentes reativos proporcionam a formação de carbonatos de cálcio/magnésio e hidratos de silicato de cálcio, principais fases responsáveis pela capacidade de ligação e desenvolvimento da resistência à compressão (HÖLLEN *et al.*, 2018)⁸⁸.

Mo *et al.* (2017)⁸⁹ estudaram a carbonatação ativada por CO₂ em um concreto que tinha como materiais aglutinantes: 60% de escória produzida em fornos de oxigênio (BOF) em pó, 20% de cimento Portland, 20% de magnésia reativa e cal, não isento, portanto de cimento nem totalmente à base de escória,

⁸⁵ HUIJGEN, W.J.J., WITKAMP, G.-J., COMANS, R.N.J., 2005. Mineral CO₂ sequestration by steel slag carbonation. *Environ. Sci. Technol.* 39, 9676-9682. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/es050795f>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

⁸⁶ UKWATTAGE, N.L.; RANJITH, P.G.; LI, X. Steel-making slag for mineral sequestration of carbon dioxide by accelerated carbonation. **Measurement**. 97, 15-22. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.10.057>>. Acesso em: 03 set. 2019.

⁸⁷ GHOULEH, Zaid; GUTHRIE, R. I.L.; SHAO, Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. **Construction and Building Materials**. 99, 175-183. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

⁸⁸ HÖLLEN, D.;BERNEDER, I.; CAPO TOUS, F.; STÖLLNER, M.; PHILIPP SEDLAZECK, K.; SCHWARZ, T., ALDRIAN, A; LEHNER, M., 2018. Stepwise treatment of ashes and slags by dissolution, precipitation of iron phases and carbonate precipitation for production of raw materials for industrial applications. **Waste Manag.** 78, 750-762. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.048>. Acesso em: 19 nov. 2019.

⁸⁹ MO, L.; ZHANG, F.; DENG, M.; JIN, F.; AL-TABBAA, A.; WANG, A., 2017. Accelerated carbonation and performance of concrete made with steel slag as binding materials and aggregates. **Cemen. Concr. Compos.** 83, 138-145. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.018>>. Acesso em: 21 set. 2019.

porém já mostrou o potencial aglutinante da escória de aço através de sua ativação por CO₂.

Mo *et al.* (2016)⁹⁰ demonstraram que, durante o processo de carbonatação da pasta de escória, o Cálcio (Ca) lixiviava o silicato de cálcio (Ca₂SiO₄) e formava carbonato de cálcio (CaCO₃) ao redor, e então gradualmente densificava a microestrutura, contribuindo para um crescimento notório da resistência mecânica.

Deve-se notar que as características granulométricas das partículas, composição e teor vítreo são os principais fatores determinantes da reatividade de escórias (MEHTA e MONTEIRO, 1994)⁹¹.

A escória, portanto, apresenta uma composição química e reatividade ao CO₂ as quais possibilitam que suas propriedades cimentantes sejam exploradas através da carbonatação acelerada.

2.3.3 Carbonatação acelerada dos corpos de prova

A EGAF é uma rica fonte de óxidos como o CaO e o MgO, como pode ser observado na Tabela 2 que apresenta a composição química de diferentes Escórias de Alto-Forno, analisando a estrutura comumente encontrada em cada um dos países exemplificados.

⁹⁰ MO, L.; ZHANG, F.; DENG, M., Mechanical performance and microstructure of the calcium carbonate binders produced by carbonating steel slag paste under CO₂ curing, **Cem. Concr. Res.** 88 (2016) 217–226. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.013>. Acesso em: 15 ago. 2019.

⁹¹ MEHTA, Povindar Kumar e MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

Tabela 2 - Composição química de diferentes Escórias de Alto-Forno

	ArcelorMittal Tubarão ⁹² (Brasil)	Nippon Slag Association ⁹³ (Japão)	National Slag Association ⁹⁴ (EUA)	
			Mínimo	Máximo
FeO (%)	0,45	-	-	-
SiO ₂ (%)	33,65	33,80	32,00	42,00
Al ₂ O ₃ (%)	12,42	13,40	7,00	16,00
CaO (%)	41,60	41,70	32,00	45,00
MgO (%)	7,95	7,40	5,00	15,00
TiO (%)	0,73	-	-	

Pode-se verificar que apesar de variarem em relação à distribuição percentual de cada componente químico, as composições possuem em comum o alto teor dos óxidos CaO e MgO, os quais podem ser convertidos em carbonatos estáveis na presença do CO₂ através da reação de carbonatação mineral. No entanto, a carbonatação mineral não figura como um processo ideal devido à sua cinética lenta e alto custo. O objetivo da carbonatação acelerada é justamente superar a cinética da reação lenta para alcançar um sequestro de CO₂ econômico que possa ser aplicado em nível industrial (UKWATTAGE *et al.*, 2017)⁹⁵.

A cura acelerada através da carbonatação é uma técnica empregada para a cura do cimento à base de EGAF. O procedimento consiste em colocar os corpos de prova à base de EGAF em uma câmara ou autoclave na qual, primeiramente, é provocado o vácuo para que seja removido o ar presente e depois injeta-se uma

⁹² ARCELORMITTAL. **Escória de Alto-Forno**. Produtos e Soluções. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/coprodutos/escoria-alto-forno>>. Acesso em: 20 set. 2019.

⁹³ NIPPON SLAG ASSOCIATION. **Chemical composition of iron and steel slag**. About Iron and Steel Slag. Disponível em: <<http://www.slg.jp/e/slag/character.html>>. Acesso em: 20 set. 2019.

⁹⁴ NATIONAL SLAG ASSOCIATION. **Steel Furnace Slag**. Products. Steel Slag. Disponível em: <<http://www.nationalslag.org/steel-furnace-slag>>. Acesso em: 20 set. 2019.

⁹⁵ UKWATTAGE, N.L.; RANJITH, P.G.; LI, X. Steel-making slag for mineral sequestration of carbon dioxide by accelerated carbonation. **Measurement**. 97. 15-22. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.10.057>>. Acesso em: 03 set. 2019.

determinada concentração de CO₂ para atingir uma pressão constante pré-estabelecida concomitantemente ao processo de aquecimento do gás. A duração do processo de carbonatação pode ser variada visando analisar o comportamento de acordo com o tempo de ativação do material (Mo *et al.*, 2016⁹⁶; Ghouleh *et al.*, 2015⁹⁷).

Diferentes cenários para o processo de carbonatação acelerada empregando a câmara foram investigados por pesquisadores. Mo *et al.* (2016)⁹⁸, por exemplo, descreveu que em um de seus ensaios,

[...] os corpos de prova foram colocados em uma câmara de carbonatação para a cura por CO₂. A câmara de carbonatação foi primeiramente aspirada e depois CO₂ com uma concentração de 99,9% foi injetado na câmara para atingir uma pressão constante de 1 bar.

Enquanto Ghouleh *et al.* (2015)⁹⁹ usou uma concentração de 99,95% de CO₂ a uma pressão de 1,5 bar. No entanto, ambos utilizaram a mesma configuração (Figura 7).

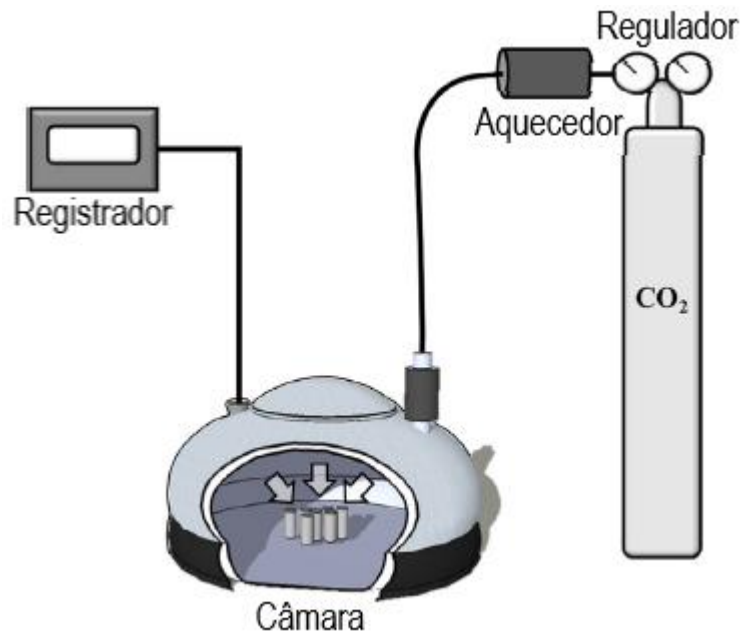
⁹⁶ MO, L.; ZHANG, F.; DENG, M. Mechanical performance and microstructure of the calcium carbonate binders produced by carbonating steel slag paste under CO₂ curing, **Cem. Concr. Res.** 88 (2016) 217–226. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.013>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

⁹⁷ GHOULEH, Zaid; GUTHRIE, R. I.L.; SHAO, Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. **Construction and Building Materials.** 99, 175-183. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

⁹⁸ MO, L.; ZHANG, F.; DENG, M., op. cit.

⁹⁹ GHOULEH, Zaid; GUTHRIE, R. I.L.; SHAO, Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. **Construction and Building Materials.** 99, 175-183. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

Figura 7 - Configuração de carbonatação para materiais ativados com CO₂



Fonte: Adaptado de Ghouleh *et al.* (2015)¹⁰⁰.

Conforme Figura 7, o processo de carbonatação acelerada consiste em uma câmara conectada a um cilindro de CO₂, um aquecedor que permite a variação e controle da temperatura e o registrador ou manômetro que fornece os dados de pressão no interior da câmara.

2.3.4 Aplicação de EGAF: desenvolvimento de cimentos a partir da ativação por CO₂

O uso de EGAF ativada por carbonatação para o desenvolvimento de cimentos especiais, de menor impacto ambiental, tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores. No entanto, a porcentagem do emprego desse material e as misturas realizadas apresentam uma variabilidade no meio científico e, conseqüentemente, nos resultados obtidos.

¹⁰⁰ GHOLEH, Zaid; GUTHRIE, R. I.L.; SHAO, Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. **Construction and Building Materials**. 99, 175-183. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

Mo *et al.* (2016)¹⁰¹ estudaram o processo de carbonatação acelerada com duas composições distintas: pasta composta com 100% de EGAF e pasta composta com 80% de EGAF e 20% de cimento Portland (CP). A relação água/sólido foi de 0,40. As misturas frescas foram moldadas em moldes cúbicos com tamanho de 20 × 20 × 20 mm e depois curadas na sala de cura úmida padrão com uma umidade relativa de 98% e uma temperatura de 23 ± 2 °C por 48 ± 2 h.

Para fins de comparação, um grupo de corpos de prova foi curado por meio de cura úmida por 3 e 28 dias, respectivamente, enquanto outro grupo foi exposto à cura sob condições de carbonatação por 1, 3 e 14 dias.

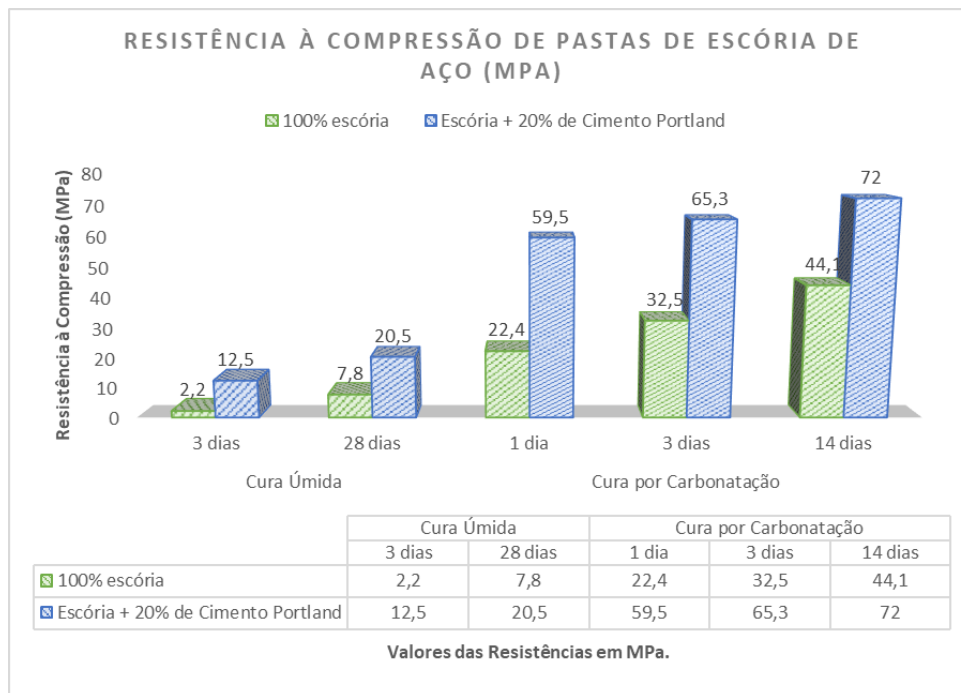
Os CPs curados por exposição ao CO₂ foram colocados em uma câmara de carbonatação, a qual foi primeiramente aspirada e, em seguida, o CO₂ com uma concentração de 99,9% foi injetado para atingir uma pressão constante de 0,1 MPa (1 bar).

Os corpos de prova foram então submetidos a ensaios para investigar a resistência à compressão, os produtos carbonatados e as microestruturas.

Como pode ser observado no **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, em comparação com a pasta 100% de escória, a pasta de escória com teor de 20% de Cimento Portland como substituto da escória de aço exibiu maiores forças compressivas. Isso pode ser atribuído à hidratação ou carbonatação do Portland.

¹⁰¹ MO, L.; ZHANG, F.; DENG, M. Mechanical performance and microstructure of the calcium carbonate binders produced by carbonating steel slag paste under CO₂ curing, **Cem. Concr. Res.** 88 (2016) 217–226. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.013>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

Figura 8 - Resistência à compressão axial de pastas contendo 100% de EGAF e pastas contendo 80% de EGAF e 20% de cimento Portland submetidas à cura úmida e à cura por carbonatação.



Fonte: Adaptado de Mo et al. (2016)¹⁰²

Observa-se na Figura 8 que o processo de carbonatação acelerada proporcionou maiores resistências à compressão quando comparada às resistências atingidas pelas amostras que foram expostas a umidade controlada.

Mo *et al.* (2017)¹⁰³ avaliaram o processo de carbonatação acelerada em um concreto composto de: 60% de Escória de Forno de Oxigênio Básico (BOF), 20% de cimento Portland, 20% de magnésia reativa e cal. Neste mesmo estudo, os autores substituíram os agregados naturais (calcário e areias dos rios) por agregados de escória de aço. Os corpos de prova de concreto foram submetidos

¹⁰² MO, L.; ZHANG, F.; DENG, M., Mechanical performance and microstructure of the calcium carbonate binders produced by carbonating steel slag paste under CO₂ curing, **Cem. Concr. Res.** 88 (2016) 217–226. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.013>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

¹⁰³ MO, L.; ZHANG, F.; DENG, M.; JIN, F.; AL-TABBAA, A.; WANG, A., 2017. Accelerated carbonation and performance of concrete made with steel slag as binding materials and aggregates. **Cemen. Concr. Compos.** 83, 138-145. Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.018>>. Acesso em: 21 set. 2019.

ao processo acelerado de carbonatação, em um ambiente com 99,9% de CO₂ e pressão de 1 MPa (1 bar) em períodos de 1 dia, 3 dias e 14 dias.

Alterando-se a proporção de cada componente, diferentes misturas foram obtidas para o ensaio. Os concretos resultantes e sua respectiva composição são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 3 - misturas foram obtidas para o ensaio

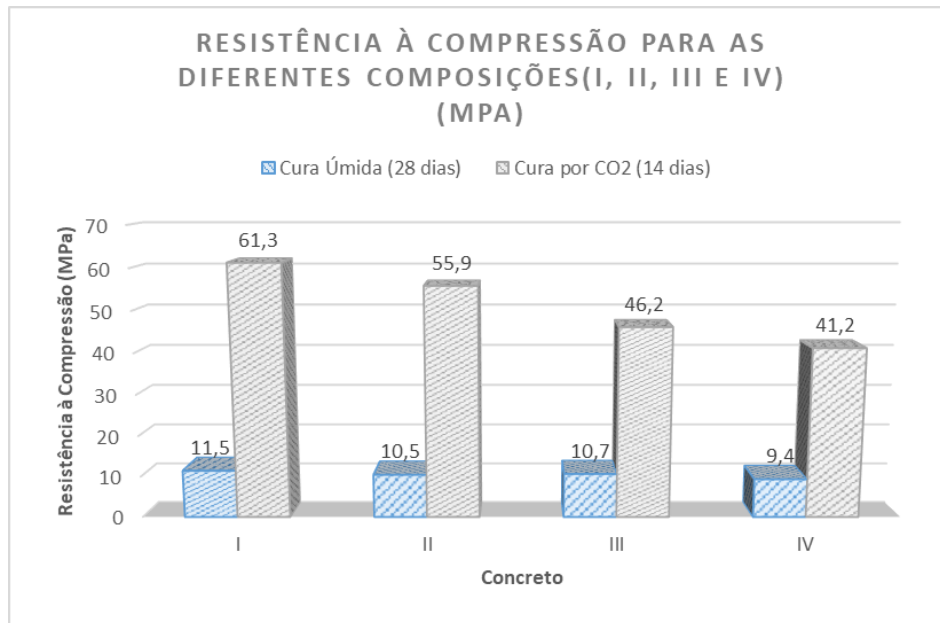
Concreto	Escória (BOF) (%)	Cimento Portland (%)	Magnésia Reativa (%)	Cal (%)	Agregado Fino	Agregado Graúdo
I	60	20	20	0	Escória (BOF)	Escória
II	60	20	10	10	Escória	Escória
III	60	20	20	0	Areia	Calcário
IV	60	20	10	10	Areia	Calcário

Fonte: Adaptado de Mo *et al.* (2017)¹⁰⁴.

Com o processo de carbonatação ocorreu a formação de carbonatos de cálcio que levou a uma densificação microestrutural do concreto e as suas resistências à compressão após submetido à cura através do CO₂ por 14 dias foram até cinco vezes maiores do que as do concreto correspondente sob cura úmida convencional para 28 dias como pode ser observado na Figura 9.

¹⁰⁴ MO, L.; ZHANG, F.; DENG, M.; JIN, F.; AL-TABBAA, A.; WANG, A., 2017. Accelerated carbonation and performance of concrete made with steel slag as binding materials and aggregates. **Cemen. Concr. Compos.** 83, 138-145. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.018>>. Acesso em: 21 set. 2019.

Figura 9 - Resistência à Compressão para as diferentes composições



Fonte: Adaptado de Mo *et al.* (2017)¹⁰⁵

Os resultados foram positivos e mostraram que a resistência à compressão do concreto de escória de aço após a cura por CO₂ aumentou significativamente. A mistura não era 100% isenta de clínquer, porém também confirmou o potencial aglutinante da escória de aço através de sua ativação por CO₂.

Librandia *et al.* (2019)¹⁰⁶ estudaram o processo de carbonatação acelerada em duas escórias distintas: de forno de oxigênio básico (BOF) e de forno elétrico (EAF). Antes do processo de carbonatação, as escórias foram secas a 105°C por 24 h. Após, foram preparadas pastas contendo 10% de água em relação à massa da escória. As pastas foram lançadas em moldes e foi realizada compactação de 15 MPa para o preparo dos CPs. OS CPs foram submetidos ao processo de

¹⁰⁵ MO, L.; ZHANG, F.; DENG, M.; JIN, F.; AL-TABBAA, A.; Wang, A., 2017. Accelerated carbonation and performance of concrete made with steel slag as binding materials and aggregates. **Cemen. Concr. Compos.** 83, 138-145. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.018>>. Acesso em: 21 set. 2019.

¹⁰⁶ LIBRANDIA, P., NIELSEN, P., COSTA, G.; SNELLINGS, R.; QUAGHEBEUR, M.; BACIOCCHIA, R. Mechanical and environmental properties of carbonated steel slag compacts as a function of mineralogy and CO₂ uptake. **Journal of CO₂ Utilization.** 33. 201-214. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.05.028>>. Acesso em: 05 set. 2019.

carbonatação acelerada em períodos entre 15 minutos e 4 h, variando-se também a pressão (1,3 bar e 10 bar), com o objetivo de avaliar a evolução da reação de carbonatação com o tempo e pressões distintas.

Verificou-se que os valores de resistência à compressão obtidos para escória de aço carbonatado dos CPs mostraram estar em conformidade com os requisitos típicos para aplicações de engenharia civil para classes de resistência do concreto. Como pode ser observado na tabela, os monólitos BOF carbonatados atenderiam a C25/C30 para 1,3 bar ou C30/C37 para 10 bar de pressão de CO₂, enquanto monólitos carbonatados de EAF cumpririam a resistência para as classes C35/C45 ou C45/C55 para pressão de CO₂ de 1,3 e 10 bar, respectivamente, conforme pode ser visualizado na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de resistência à compressão e suas respectivas classes de resistência do concreto correspondentes

Escória de Forno de Oxigênio Básico (BOF)		Escória de Forno Elétrico (EAF)	
Classe de Resistência atendida (MPa)	Pressão de CO₂ aplicada (bar)	Classe de Resistência atendida (MPa)	Pressão de CO₂ aplicada (bar)
C25/30	1,3	C35/45	1,3
C30/37	10	C45/55	10

*C: Classe de Resistência em MPa; C25/30: entre as classes de 25 e 30 MPa.

Fonte: Adaptado de Librandia *et al.* (2019)¹⁰⁷

Ghouleh *et al.*(2015)¹⁰⁸ utilizaram o processo de carbonatação acelerada em Escórias de Forno de Oxigênio Básico (BOF). Resistências à compressão da

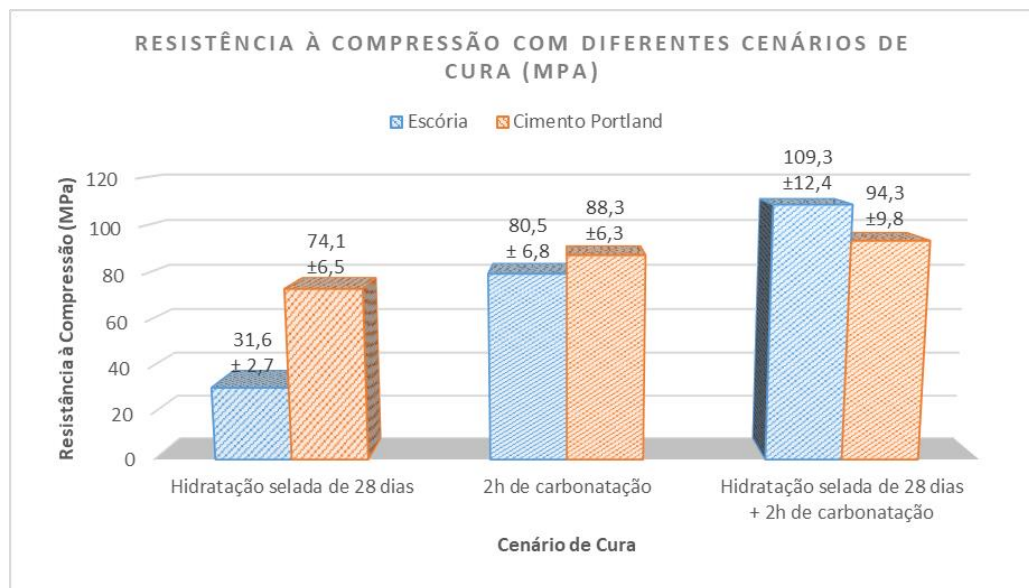
¹⁰⁷ LIBRANDIA, P., NIELSEN, P., COSTA, G.; SNELLINGS, R.; QUAGHEBEUR, M.; BACIOCCHIA, R. Mechanical and environmental properties of carbonated steel slag compacts as a function of mineralogy and CO₂ uptake. **Journal of CO₂ Utilization**. 33. 201-214. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.05.028>>. Acesso em: 05 set. 2019.

¹⁰⁸ GHOULEH, Zaid; GUTHRIE, R. I.L.; SHAO, Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. **Construction and Building Materials**. 99, 175-183. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

ordem de 109 MPa foram atingidas. Para isso, a BOF foi misturada previamente à água (relação água/escória de 0,15) e depois compactada pela aplicação de uma pressão de compactação de 16 MPa.

A carbonatação foi realizada imediatamente após a desmoldagem dos corpos de prova para avaliar sua contribuição inicial na resistência. Os parâmetros utilizados na câmara de carbonatação foram: pressão fixada de 1,5 bar utilizando gás CO₂ de alta pureza (99,5%). A carbonatação foi realizada para as durações de 2h, 4h, 12h e 24h. Utilizaram-se corpos de prova de cimento Portland de uso geral submetidos aos mesmos ensaios para fins comparativos. Alguns resultados podem ser visualizados na Figura 10.

Figura 10 - Resistência à compressão com diferentes cenários de cura



Fonte: Adaptado de Ghouleh *et al.*(2015)¹⁰⁹

¹⁰⁹ GHOULEH, Zaid; GUTHRIE, R. I.L.; SHAO, Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. **Construction and Building Materials**. 99, 175-183. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

Com base na Figura 10, observa-se que a resistência à compressão dos CPs de escória submetidos à cura por carbonatação (80,5 MPa) excedeu a resistência dos CPs de Portland (31,6 MPa) submetidos à cura hermética por 28 dias e aproximou-se dos valores dos CPs de Portland curados através de 2h de carbonatação (88,3 MPa).

Os CPs 100% à base de escória apresentaram um aumento representativo da resistência à compressão quando foram submetidos ao processo de carbonatação acelerada por CO₂. Duas horas de carbonatação geraram uma força de 80 MPa na escória, que era 250% da força alcançada após 28 dias de hidratação (31,6 MPa).

Entretanto, quando foram realizados o processo de cura em ambiente hermeticamente fechado após submetidos à carbonatação acelerada por 2h, a resistência média dos CPs foi de 109 MPa, maior que a resistência de 80,5 MPa dos CPs de escória submetidos apenas à carbonatação acelerada. Isto mostra que há aumento importante da resistência de CPs à base de EGAF quando os CPs são primeiramente curados em ambiente hermeticamente fechado com posterior processo de carbonatação acelerada.

Ghouleh *et al.* (2015)¹¹⁰ concluíram que a melhor combinação de cura foi uma carbonatação de 2 h seguida de hidratação selada subsequente. A resistência final da pasta pode atingir 109 MPa. O autor mostra que quanto ao pH, a carbonatação reduziu significativamente seu valor no ligante de escória. Embora tenha sido observado um ganho considerável da resistência à compressão após a hidratação subsequente de 28 dias, o pH permaneceu inalterado. A escória, portanto, parece ser adequada como ligante para produtos pré-moldados sem reforço de aço, a fim de evitar a corrosão por carbonatação.

Ainda segundo Ghouleh *et al.* (2015)¹¹¹, em relação à absorção de CO₂, os ensaios registraram uma captação de 13,2% de dióxido de carbono para a pasta de escória após uma carbonatação de 2 h, enquanto o cimento Portland atingiu

¹¹⁰ GHOULEH, Zaid; GUTHRIE, R. I.L.; SHAO, Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. **Construction and Building Materials**. 99, 175-183. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

¹¹¹ Ibid.

apenas 9,3%. Isso mostra que as amostras à base de EGAF apresentam maior desempenho quanto à captação de CO₂.

A influência da relação água/sólido no desempenho das pastas de escória também já foi tema de estudo de Mo *et al.* (2019)¹¹². Nos ensaios foi utilizada escória de magnésio, cuja composição química pode ser visualizada na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição Química da Escória de Magnésio utilizada por Mo *et al.* (2015)¹¹³ (% em massa)

MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
7,24	53,86	28,87	8,17	0,84	0,03	0,07	0,05

Fonte: Adaptado de Mo *et al.* (2019)¹¹⁴.

A composição química da escória de magnésio mostra que ela compartilha com a EGAF a característica de possuir alto teor dos óxidos CaO (53,86%) e MgO (7,24%), valores próximos ao comumente encontrados na EGAF como apresentado em itens anteriores.

Para investigar a influência da relação água/escória no desempenho de pastas foram utilizadas três proporções: 0,25, 0,30 e 0,40, respectivamente, para preparar CPs à base de pasta de Escória de magnésio.

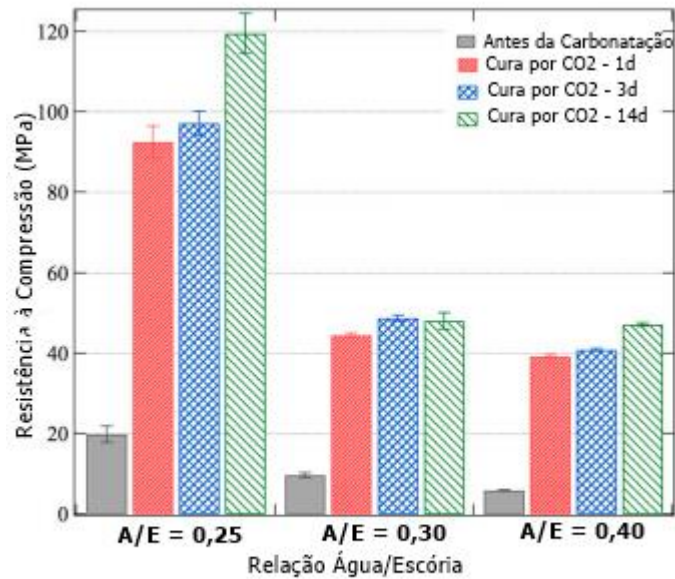
A Figura 11 apresenta os resultados de resistência à compressão para as diferentes relações água/escória antes da carbonatação e com cura por carbonatação por 1 dia, 3 dias e 14 dias.

¹¹² MO, L.; HAO, Y.; LIU, Y.; WANG, F; DENG, M. Preparation of calcium carbonate binders via CO₂ activation of magnesium slag. **Cement and Concret Research**. 121 (2019) 81-90. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.005>. Acesso em: 15 ago. 2019.

¹¹³ Ibid.

¹¹⁴ Ibid.

Figura 11 - Resistências à compressão das pastas de escória de magnésio antes e após a cura por CO₂



Fonte: Mo *et al.* (2019)¹¹⁵

Os resultados mostram que quanto maior a relação a/EGAF, menores foram as resistências à compressão da pasta de escória de magnésio hidratada. Da mesma forma que as pastas de escória de magnésio antes da cura por CO₂, as resistências à compressão das pastas de escória de magnésio após a carbonatação diminuíram com o aumento da relação água/escória. Além disso, após ser submetido à cura por CO₂, as forças de compressão das pastas de escória de magnésio aumentam significativamente.

Recentemente, Humbert *et. al* (2019)¹¹⁶ produziram um ligante de escória, totalmente isento de clínquer, que atingiu resistências à compressão de mais de 150 MPa. Realizando uma comparação com o cimento Portland curado com dióxido de carbono, os supracitados pesquisadores concluíram que o ligante à

¹¹⁵ MO, L.; HAO, Y.; LIU, Y.; WANG, F; DENG, M. Preparation of calcium carbonate binders via CO₂ activation of magnesium slag. **Cement and Concret Research**. 121 (2019) 81-90. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.005>. Acesso em: 15 ago. 2019.

¹¹⁶ HUMBERT, P.S., CASTRO-GOMES, J.P.; SAVASTANO JR., H. Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications. **Construction and Building Materials**. Vol. 210 (2019) p. 413-421. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169>. Acesso em: 14 set. 2019.

base de escória de aço alcança uma resistência à compressão 76% maior nas mesmas condições.

Os resultados de Humbert *et. al* (2019)¹¹⁷ mostraram que a finura da escória é extremamente relevante no desenvolvimento da força à compressão, já que a área da superfície está relacionada à reatividade do pó. O pó mais fino atingiu uma resistência 2,5 vezes superior nas mesmas condições de carbonatação.

Em relação ao teor de água, o valor considerado ideal foi de 10% combinado com uma pressão de compactação acima de 20 MPa. Esses parâmetros forneceram uma resistência à compressão já superior a 70 MPa.

A temperatura e a pressão parcial de dióxido de carbono na câmara de carbonatação também mostraram forte influência na reação, pois uma temperatura inferior a 60°C não ativará bem a escória de aço e acima de 70°C reduz a reatividade à medida que a água evapora mais rapidamente.

A pressão parcial de CO₂ corrobora com a penetração de gás atingindo duas vezes mais resistência à compressão quando aplicada uma pressão de 2,5 bar em comparação com uma de 0,5 bar.

O ligante de escória de aço de Humbert *et al.* (2019) atingiu resistência à compressão de 151,5 MPa em apenas 24h de carbonatação, confirmando o potencial desse material para a substituição do cimento Portland conforme já indicavam as pesquisas anteriores.

Portanto, todas as pesquisas mencionadas, mesmo apresentando diferenças em relação aos parâmetros e métodos empregados nos ensaios, mostraram que a escória curada sob condição de carbonatação é uma potencial substituta ao cimento Portland para aplicação em materiais de construção.

¹¹⁷ HUMBERT, P.S., CASTRO-GOMES, J.P.; SAVASTANO JR., H. Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications. **Construction and Building Materials**. Vol. 210 (2019) p. 413-421. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169>>. Acesso em: 14 set. 2019.

3 PARÂMETROS BASEADOS NA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

3.1 TEMPERATURA

Para a ativação acelerada por CO₂, três temperaturas de cura/ativação foram estudadas: 20°C, 40°C e 60°C. Jang *et al.* (2016)¹¹⁸ constataram que o sequestro de CO₂ à pressão atmosférica é melhorado até a temperatura de cura/ativação de 60°C. Segundo os autores, acima dessa temperatura, a reação de CO₂ diminui. Mo *et al.* (2019)¹¹⁹ também concluiu em seus ensaios que a pasta de escória de magnésio ativada por CO₂ mostra um volume estável sem causar expansão excessiva quando curada banho maria a 60 °C. Além disso, Humbert *et al.* (2019)¹²⁰ mostraram que acima de 70°C a reatividade reduz à medida que a água evapora mais rapidamente.

3.2 RELAÇÃO ÁGUA/ESCÓRIA

O teor de água da mistura é um parâmetro crítico porque influencia a reatividade (HUMBERT e CASTRO-GOMES)¹²¹. Baseando-se nos estudos realizados por Ghouleh *et al.* (2015)¹²² que atingiram altas resistências à compressão, de aproximadamente 100 MPa, com uma relação água/escória de

¹¹⁸ JANG, J.G., KIM, G.M., KIM, H.J., LEE, H.K., 2016. Review on recent advances in CO₂ utilization and sequestration technologies in cement-based materials. **Construction and Building Materials**. 127, 762-773. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.017>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

¹¹⁹ MO, L.; HAO, Y.; LIU, Y.; WANG, F; DENG, M. Preparation of calcium carbonate binders via CO₂ activation of magnesium slag. **Cement and Concrete Research**. 121 (2019) 81-90. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.005>. Acesso em: 15 ago. 2019.

¹²⁰ HUMBERT, P.S., CASTRO-GOMES, J.P.; SAVASTANO JR., H. Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications. **Construction and Building Materials**. Vol. 210 (2019) p. 413-421. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169>>. Acesso em: 14 set. 2019.

¹²¹ HUMBERT, P. S.; CASTRO-GOMES, J. CO₂ activated steel slag-based materials: A review. **Journal of Cleaner Production**. n. 208, p. 448-457, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.058>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

¹²² GHOULEH, Zaid; GUTHRIE, R. I.L.; SHAO, Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. **Construction and Building Materials**. 99, 175-183. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

0,15, assim como nas pesquisas de Mo *et al.* (2019)¹²³ que confirmou ser maior a resistência à compressão quanto menor for a relação a/EGAF, o que foi confirmado pelas pesquisas recentes de Humbert *et al.* (2019)¹²⁴ os quais utilizando como parâmetros relações A/EGAF de 0,1; 0,124 e 0,15 atingiram resistências de até 150 MPa, adotou-se, então, nesta pesquisa, por questões de trabalhabilidade, inicialmente, a proporção a/EGAF de 0,13.

3.3 TEMPO

Uma vez que o desenvolvimento da resistência acontece de uma forma não linear em relação ao tempo de ativação, dependendo das propriedades do material e das condições de carbonatação (HUMBERT e CASTRO-GOMES, 2019), o efeito e variações devido ao tempo de exposição também será avaliado, variando o tempo de ativação por CO₂ da EGAF e verificadas a resistência à compressão e as características microestruturais dos cimentos especiais (CE).

3.4 PRESSÃO

De acordo com Silva *et al.* (2006)¹²⁵, a resistência à compressão aumenta com maior pressão parcial de CO₂. Mo *et al.* (2016)¹²⁶ aplicaram uma pressão de 1 bar em seus ensaios. Enquanto isso, Ghouleh *et al.* (2015)¹²⁷ fixaram sua

¹²³ MO, L.; HAO, Y.; LIU, Y.; WANG, F; DENG, M. Preparation of calcium carbonate binders via CO₂ activation of magnesium slag. **Cement and Concret Research**. 121 (2019) 81-90. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.005>. Acesso em: 15 ago. 2019.

¹²⁴ HUMBERT, P.S., CASTRO-GOMES, J.P.; SAVASTANO JR., H. Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications. **Construction and Building Materials**. Vol. 210 (2019) p. 413-421. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169>. Acesso em: 14 set. 2019.

¹²⁵ DE SILVA, P., BUCEA, L., MOOREHEAD, D.R., SIRIVIVATNANON, V., 2006. Carbonate binders: reaction kinetics, strength and microstructure. **Cemen. Concr. Compos**. 28, 613e620. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.03.004>. Acesso em: 19 ago. 2019.

¹²⁶ MO, L.; ZHANG, F.; DENG, M., Mechanical performance and microstructure of the calcium carbonate binders produced by carbonating steel slag paste under CO₂ curing, **Cem. Concr. Res**. 88 (2016) 217–226. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.013>. Acesso em: 15 ago. 2019.

¹²⁷ GHOULEH, Zaid; GUTHRIE, R. I.L.; SHAO, Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. **Construction and Building Materials**. 99, 175-183. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>. Acesso em: 18 ago. 2019.

pressão de carbonatação em 1,5 bar. Mais tarde, Humbert *et al.* (2019)¹²⁸ produziram ensaios com pressões de 0,5 e 2,5 bares. Estabelecendo tais valores como parâmetros, para fins de verificação do comportamento da amostra, respeitadas as limitações da câmara utilizada nesta pesquisa, quanto aos níveis de pressão, adotou-se, então, o valor de pressão de 1 bar. Sugere-se que em trabalhos futuros sejam adotadas as pressões utilizadas pelos outros autores, a fim de verificar a condição ideal e a influência desse parâmetro no processo de carbonatação da EGAF.

3.5 CONCENTRAÇÃO

A eficiência de ativação do dióxido de carbono tem alta dependência da concentração de CO₂, que pode ser confirmada pelo desenvolvimento de resistência à compressão para diferentes concentrações (HUMBERT e CASTRO-GOMES, 2019).

Assim como Mo *et al.* (2016)¹²⁹, Ghouleh *et al.* (2015)¹³⁰ atingiu valores significativos de resistência à compressão em pastas de escória como mostrado nos itens anteriores e, ambos utilizaram concentrações de CO₂ de 99,99% e 99,95%, respectivamente.

Sabe-se ainda que, segundo Ashraf (2016)¹³¹, as taxas de carbonatação mais altas são obtidas usando-se maior concentração de CO₂ e ambiente controlado (isto é, temperatura, umidade relativa). Assim, adotou-se para o ensaio a concentração de 100% de CO₂.

¹²⁸ HUMBERT, P.S., CASTRO-GOMES, J.P.; SAVASTANO JR., H. Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications. **Construction and Building Materials**. Vol. 210 (2019) p. 413-421. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169>>. Acesso em: 14 set. 2019.

¹²⁹ MO, L.; ZHANG, F.; DENG, M. Mechanical performance and microstructure of the calcium carbonate binders produced by carbonating steel slag paste under CO₂ curing, **Cem. Concr. Res.** 88 (2016) 217–226. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.013>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

¹³⁰ GHOULEH, Zaid; GUTHRIE, R. I.L.; SHAO, Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. **Construction and Building Materials**. 99, 175-183. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

¹³¹ ASHRAF, W., 2016. Carbonation of cement-based materials: challenges and opportunities. **Construction and Building Materials**. 120, 558e570. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.080>. Acesso em: 06 nov. 2019.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi organizado com o objetivo de serem produzidos cimentos especiais, de baixo impacto ambiental, a partir da ativação acelerada da escória granulada de alto forno (EGAF) por CO_2 . Nos próximos itens serão descritos os materiais utilizados nos ensaios assim como os procedimentos realizados a partir dos parâmetros mencionados no capítulo anterior.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Escória

A EGAF utilizada na pesquisa foi gerada em uma siderúrgica no estado do Espírito Santo (Brasil).

4.1.2 Água

A água utilizada para a produção da argamassa foi proveniente da rede Pública de abastecimento.

4.1.3 CO_2

O CO_2 utilizado foi um gás comercial.

4.2 PROTÓTIPO DE CÂMARA DE CARBONATAÇÃO

A câmara foi projetada de forma que em sua parte inferior, localiza-se uma abertura para a injeção de CO_2 e na parte superior uma saída para que o CO_2 retire o O_2 e permita que o ambiente esteja com 100% de CO_2 . Também foi instalado um manômetro na parte superior do protótipo para controlar a pressão do gás. A Figura 12 apresenta o esquema do protótipo da câmara sob processo de aquecimento em estufa.

Figura 12 - Esquema do Protótipo de câmara confeccionada para os ensaios de carbonatação acelerada



Fonte: Adaptado de Humbert *et al.* (2019)¹³².

Observa-se que, apesar da simplicidade construtiva do protótipo, ele simula adequadamente a configuração de câmara de carbonatação apresentada na Figura 6 (Configuração de carbonatação para materiais ativados com CO₂).

4.3 ENSAIOS

Foram determinadas as resistências à compressão em diferentes idades em corpos de prova cilíndricos (CPs), com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm, conforme NBR 7215 (2019)¹³³. Foram utilizados 3 CPs para cada ensaio de resistência à compressão. Esses ensaios foram realizados no dia posterior ao processo de ativação acelerada por CO₂. Ou seja, entre a retirada dos CPs à base de pasta de EGAF, após o processo de ativação acelerada por CO₂ e o ensaio de

¹³² HUMBERT, P.S., CASTRO-GOMES, J.P.; SAVASTANO JR., H. Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications. **Construction and Building Materials**. Vol. 210 (2019) p. 413-421. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169>>. Acesso em: 14 set. 2019.

¹³³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**. Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, fevereiro de 2019, 12 p.

resistência à compressão, foi esperado um período de 12 h, ficando estes CPs em sala à temperatura de 24°C, sem controle da umidade.

4.3.1 Preparação da pasta de EGAF ativada por CO₂

A EGAF utilizada nos ensaios foi gerada em uma indústria siderúrgica localizada no Estado do Espírito Santo. Esta EGAF foi obtida já na forma cominuída. A composição química da EGAF utilizada desta pesquisa pode ser visualizada na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição Química da EGAF determinada por fluorescência de Raio X, na forma elementar, utilizada para a realização dos ensaios (% em massa)

Ca	Si	Fe	Al	K	S
62,38	24,31	0,84	7,92	0,32	1,9

Observa-se que há um alto teor do elemento Cálcio (Ca), necessário para a eficiência do processo de carbonatação.

Em relação ao aspecto visual, a EGAF utilizada possui uma coloração mais clara quando comparada ao cimento Portland (Figura 13).

Figura 13 – Comparação visual (a) cimento Portland CP-IV 32 e (b) EGAF moída



Fonte: Autor.

As amostras foram preparadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSM. Para preparação da pasta de escória, adicionou-se uma quantidade de escória a um recipiente e foi determinada sua massa em uma balança de precisão.

A partir da massa de EGAF, calculou-se a quantidade de água necessária respeitando-se, inicialmente, a proporção água/escória granulada de alto forno (a/EGAF) de 0,13 de modo a garantir a trabalhabilidade da pasta. Na Figura 14, visualiza-se a escória na cuba da argamassadeira para o preparado da pasta de EGAF.

Figura 14 - EGAF dentro da cuba da argamassadeira para o preparo da pasta de EGAF



Fonte: Autor.

A água foi adicionada à escória com um copo medidor e a mistura homogeneizada com o auxílio de um misturador de eixo vertical (Figura 15).

Figura 15 - Misturador de eixo vertical com capacidade de 5 litros e com movimento planetário utilizado para o preparo da pasta à base de EGAF



Fonte: Autor.

O próximo passo consistiu na moldagem dos corpos de prova (CPs) conforme será apresentado no item abaixo.

4.3.2 Moldagem e compactação dos corpos de prova

Para o ensaio de laboratório foram preparados CPs de diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm à base de pasta de EGAF. O cilindro utilizado para a moldagem dos CPs pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 – Cilindro tripartido de dimensões 5 cm de diâmetro e 20 cm de altura utilizado para moldagem dos CPs, apresentando uma parte que pode ser desacoplada de forma que o corpo de prova final tenha dimensões de 5x10 cm



Fonte: Autor.

A compactação da pasta de EGAF no cilindro foi realizada com um soquete manual utilizado em ensaios de solo. O soquete possuía uma altura de queda de 30,5 cm e peso de 45 Kg. Inicialmente, foram estabelecidos 10 golpes por CP. A Figura 17 apresenta o soquete utilizado.

Figura 17 - Soquete utilizado para compactação da pasta à base de EGAF para o preparo dos CPs 5X10 cm



Fonte: Autor.

Os CPs resultantes após moldagem e compactação, encontram-se na Figura 18.

Figura 18 - Corpos de Prova à base de pasta de EGAF após moldagem e compactação



Fonte: Autor.

Utilizando-se um teor de 13% de água, alcançou-se uma boa trabalhabilidade sendo possível visualizar na Figura 18 que os corpos de prova ficaram com um bom aspecto na sua superfície.

4.3.3 Secagem em estufa

Para fins de moldagem, inicialmente, não se conseguiu estabelecer uma relação $a/EGAF$ menor do que 0,13, pois valores inferiores a esse dificultavam a trabalhabilidade da pasta. No entanto, segundo pesquisas anteriores mencionadas na revisão bibliográfica, a redução do teor de água contribuiria para a efetividade do processo de carbonatação.

A solução encontrada para que se conseguisse teores de água menores foi a secagem em estufa. Alguns CPs à base de pasta de EGAF, após moldados, foram colocados na estufa (Figura 19) durante 1h à 60°C para secagem e consequente redução do teor de umidade, com a finalidade de facilitar o acesso do CO_2 à matriz.

Figura 19 - Estufa utilizada para secagem das amostras de cimento à base de escória ativada por CO_2 localizada no laboratório de materiais de construção civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)



Fonte: Autor.

Antes do processo de secagem, os CPs eram pesados e verificada sua massa para posterior controle da redução do teor de umidade.

Figura 20 - Pesagem dos CPs antes da secagem em estufa



Fonte: Autor.

Na Figura 21, visualizam-se as amostras numeradas e colocadas para secagem, na estufa.

Figura 21 - CPs à base de pasta de EGAF colocados na estufa para reduzir o teor de umidade



Fonte: Autor.

Com a secagem em estufa (1h, 60°C), procurou-se obter para os corpos de prova submetidos a esse processo, um teor de umidade inferior a 13% visando aumentar o potencial de carbonatação da pasta.

4.3.4 Carbonatação dos CPs à base de escória

O procedimento de cura consistiu em colocar os corpos de prova à base de EGAF no protótipo de câmara de carbonatação injetando-se do cilindro uma determinada concentração de CO₂ para atingir uma pressão 1 bar, respeitando as limitações da câmara empregada no ensaio. Variou-se a duração do processo de carbonatação visando analisar o comportamento de acordo com o tempo de ativação do material.

Figura 22 - Câmara em funcionamento durante o processo de carbonatação dos CPs de Escória



Fonte: Adaptado de Humbert *et al.* (2019)¹³⁴.

¹³⁴ HUMBERT, P.S., CASTRO-GOMES, J.P.; SAVASTANO JR., H. Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications. **Construction and Building Materials**. Vol. 210 (2019) p. 413-421. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169>>. Acesso em: 14 set. 2019.

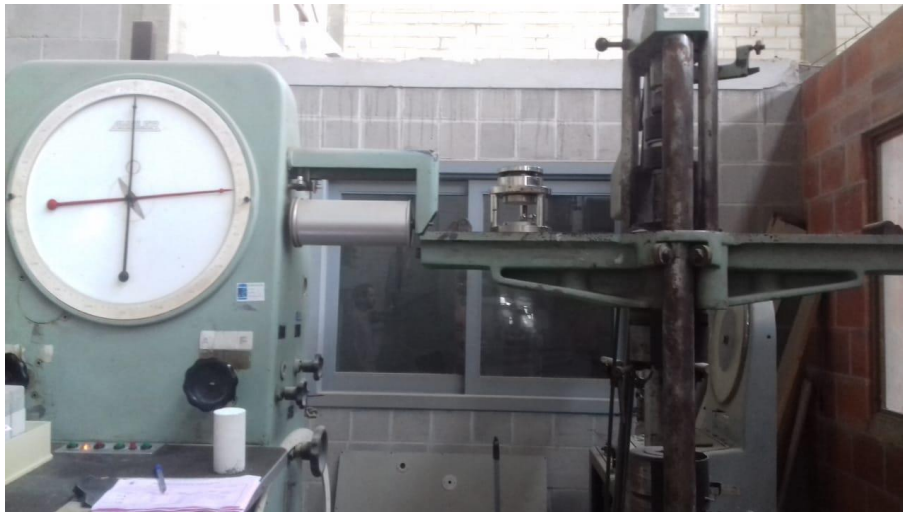
A injeção do CO₂ na câmara dava-se com a abertura da válvula do cilindro e controle da pressão através do manômetro fixado ao protótipo, até que se alcançasse uma pressão estável de 1 bar.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 RESULTADO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS AMOSTRAS À BASE DE ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO ATIVADA POR CO₂

A prensa hidráulica da marca AMSLER utilizado nos ensaios de resistência à compressão possui a configuração apresentada na Figura 23. A capacidade de carga desse equipamento é de 20 toneladas.

Figura 23 – Corpo de prova à base de pasta de escória granulada de alto forno (EGAF) ativada por CO₂ sendo submetido ao ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autor.

Abaixo (Figura 24), apresenta-se um CP de escória durante o ensaio de resistência à compressão.

Figura 24 - CP de Escória durante ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autor.

Na Tabela 7, são apresentados os resultados de resistência à compressão dos CPs à base de pasta de EGAF submetidos ao processo de ativação por carbonatação acelerada por um período de 2h, a pressão de 1 bar e temperatura de 20°C. Os CPs apresentavam umidade de 13%.

Tabela 7 - Resistência à compressão das amostras de corpos de prova (CPs) com 13% de umidade, 10 golpes de compactação e 2h de carbonatação

CP	Teor de Umidade (%) [*]	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Compressão Média (MPa)
1	13	0,86	0,69 ± 0,18
2		0,71	
3		0,51	

* Teor de umidade adotado da mistura adota para o preparo dos corpos de prova

Fonte: Autor.

As amostras seguintes haviam sido submetidas ao processo de secagem em estufa, sendo obtido um teor de umidade de 12%. O tempo do processo de

ativação por carbonatação foi de 5h, a pressão de 1 bar e temperatura de 20°C. Os resultados de resistência à compressão obtidos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resistência à compressão das amostras de corpos de prova (CPs) com 12% de umidade (após secagem em estufa), 10 golpes de compactação e 5h de carbonatação

CP	Teor de Umidade (%)*	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Compressão Média (MPa)
1	12	0,356	0,36 ± 0,04
2		0,407	
3		0,331	

* Teor de umidade adotado da mistura adota para o preparo dos corpos de prova

Fonte: Autor.

Mantendo-se o teor de umidade em 13% e 10 golpes na compactação, alterando-se apenas o tempo de carbonatação para 48h à temperatura de 20°C e 1 bar de pressão, os resultados obtidos são os apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resistência à compressão das amostras de corpos de prova (CPs) com 13% de umidade, 10 golpes de compactação e 48h de carbonatação

CP	Teor de Umidade (%)*	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Compressão Média (MPa)
1	13	0,815	0,85 ± 0,03
2		0,865	
3		0,865	

* Teor de umidade adotado da mistura adota para o preparo dos corpos de prova

Fonte: Autor

Com o objetivo de avaliar a influência de quatro variáveis: compactação, umidade, temperatura, e tempo de ativação por carbonatação, foram realizadas

novas moldagens de corpos de prova. Nesse ensaio, estabeleceu-se uma compactação de 3 golpes de soquete visando aumentar o número de vazios na amostra e capacidade de carbonatação. Além disso, as amostras foram carbonatadas a temperatura de 40°C, 1 bar de pressão, durante 2h e 30min.

Os resultados de resistência à compressão obtidos foram resumidos na tabela abaixo.

Tabela 10 - Resistência à compressão das amostras de corpos de prova (CPs) com 13% de umidade, 3 golpes de compactação e 2h e 30min de carbonatação à 40°C

CP	Teor de Umidade (%) [*]	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Compressão Média (MPa)
1	13	0,611	0,58 ± 0,03
2		0,560	
3		0,560	

* Teor de umidade adotado da mistura adota para o preparo dos corpos de prova

Fonte: Autor

É possível perceber que o desenvolvimento da resistência à compressão foi influenciado pelo ajuste dos parâmetros estudados como indicavam as pesquisas mencionadas neste trabalho. No entanto, os resultados obtidos demonstraram que apesar de ser maior a resistência à compressão quanto menor for a relação a/EGAF segundo Mo *et al.* (2019)¹³⁵, o método de redução do teor de umidade através da secagem em estufa não se mostrou eficiente, pois resultava em um comportamento frágil do corpo de prova, sendo necessário reduzir a relação a/EGAF por outros meios como no próprio processo de moldagem.

Buscou-se, então, reduzir a relação a/EGAF no processo de moldagem e reproduzir um ensaio com as condições consideradas ideais por pesquisadores

¹³⁵ MO, L.; HAO, Y.; LIU, Y.; WANG, F; DENG, M. Preparation of calcium carbonate binders CO₂ activation of magnesium slag. **Cement and Concret Research**. 121 (2019) 81-90. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.005>. Acesso em: 15 ago. 2019.

como Humbert *et al.* (2019)¹³⁶ e Jang *et al.* (2016)¹³⁷. Segundo ambos os autores, a temperatura de ativação ideal seria a de 60°C. Da mesma forma, a partir das pesquisas de Mo *et al.* (2019)¹³⁸, que mostraram ocorrer uma redução das resistências à compressão da pasta de escória quanto maior a relação a/EGAF, procurou-se alcançar uma relação menor dos que as utilizadas nos ensaios anteriores.

O ensaio foi reproduzido com um tempo de ativação por CO₂ de 4h, pressão constante de 1 bar, com base nas pesquisas de Mo *et al.* (2016)¹³⁹ e Ghouléh *et al.* (2015)¹⁴⁰ que atingiram altas resistências com pressões entre 1 e 1,5 bar, relação a/EGAF, para moldagem, de 7% e carbonatação à temperatura de 60°C. Os resultados, no entanto, não demonstraram valores esperados. Os corpos de prova à base de escória apresentaram valores de resistência à compressão até mesmo inferiores aos atingidos para maiores relações a/EGAF, menores temperaturas e maiores tempos de ativação.

Em relação à compactação, a redução do número de golpes não influenciou significativamente os valores de resistência à compressão, no entanto, ao contrário do que se esperava, o aumento da porosidade, com a redução dos golpes de 10 para 3, para o mesmo teor de umidade de 13% diminuiu a

¹³⁶ HUMBERT, P.S., CASTRO-GOMES, J.P.; SAVASTANO JR., H. Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications. **Construction and Building Materials**. Vol. 210 (2019) p. 413-421. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169>>. Acesso em: 14 set. 2019.

¹³⁷ JANG, J.G., KIM, G.M., KIM, H.J., LEE, H.K., 2016. Review on recent advances in CO₂ utilization and sequestration technologies in cement-based materials. **Construction and Building Materials**. 127, 762-773. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.017>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

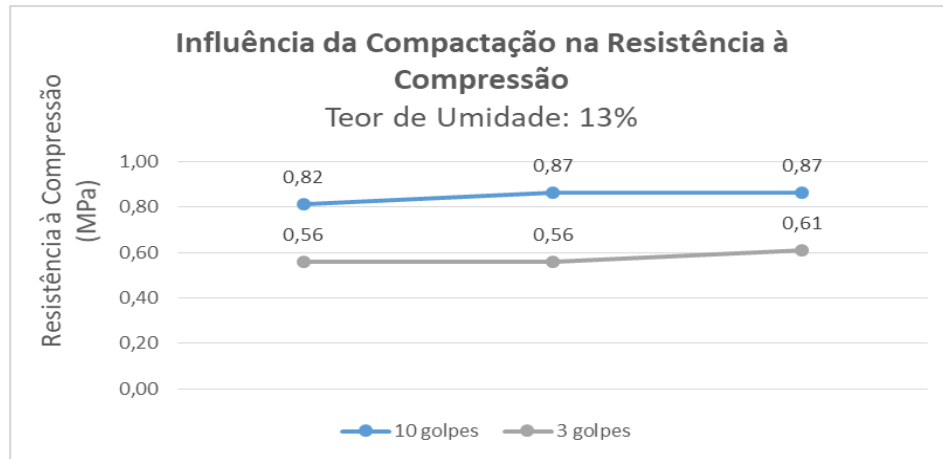
¹³⁸ MO, L.; HAO, Y.; LIU, Y.; WANG, F; DENG, M. Preparation of calcium carbonate binders via CO₂ activation of magnesium slag. **Cement and Concrete Research**. 121 (2019) 81-90. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.005>. Acesso em: 15 ago. 2019.

¹³⁹ MO, L.; ZHANG, F.; DENG, M., Mechanical performance and microstructure of the calcium carbonate binders produced by carbonating steel slag paste under CO₂ curing, **Cem. Concr. Res.** 88 (2016) 217–226. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.013>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

¹⁴⁰ GHOULEH, Zaid; GUTHRIE, R. I.L.; SHAO, Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. **Construction and Building Materials**. 99, 175-183. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

resistência à compressão em até 35% conforme pode ser visualizado no **Erro!**
Fonte de referência não encontrada..

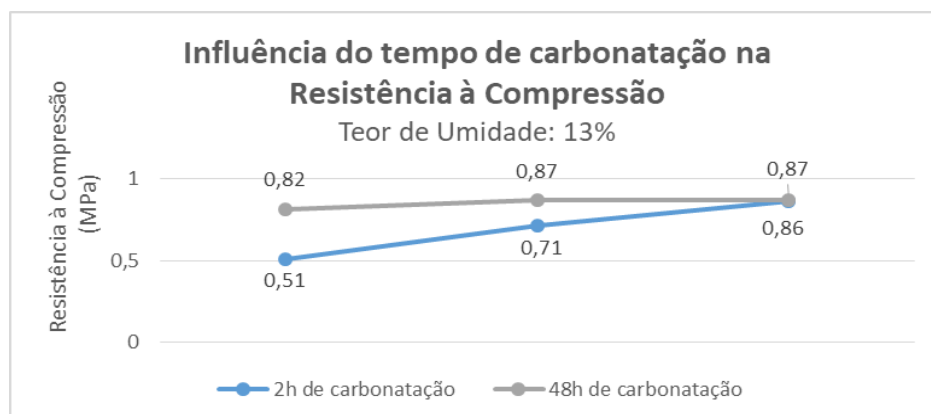
Figura 25 - Influência da Compactação na Resistência à Compressão dos Corpos de Prova (CPs) à base de EGAF



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos com a modificação do tempo de carbonatação mostraram que para 48h de cura via carbonatação os valores de resistência à compressão obtidos apresentaram uma maior linearidade (Figura 25) quando comparado aos resultados para 2h de carbonatação.

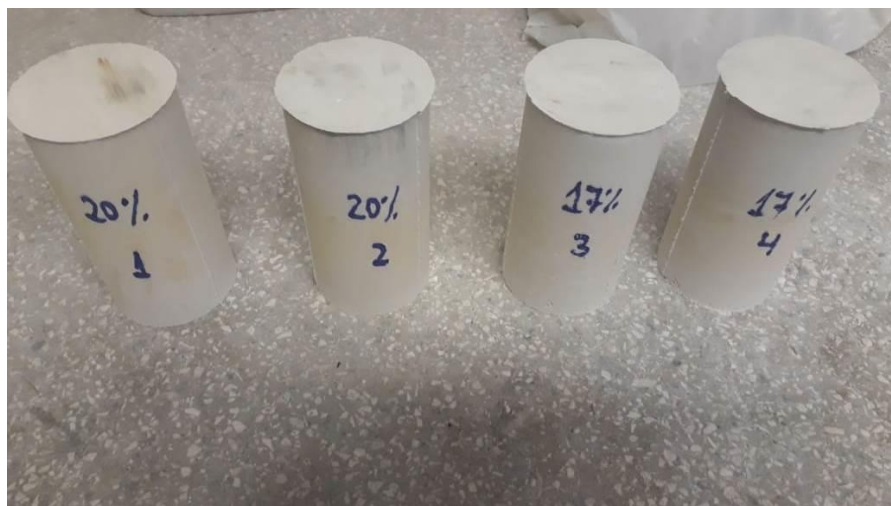
Figura 26 - Influência do tempo de carbonatação na Resistência à Compressão dos Corpos de Prova (CPs) à base de EGAF



Fonte: Autor

Uma vez que os ensaios anteriores demonstraram ser maior a resistência quando se utilizava relações água/escória maiores, apesar de contrariar o resultado de algumas pesquisas anteriores, realizaram-se novos ensaios com relações água/escória de 0,17 e 0,20 (Mo *et al.* (2019)¹⁴¹ utilizaram esta relação em um de seus ensaios, atingindo resistências consideráveis). Os corpos de prova foram moldados com 10 golpes. Na Figura 27, pode-se visualizar os CPs antes do processo de carbonatação.

Figura 27 - Corpos de Prova de Cimento à base de escória moldados com relação a/E de 0,17 e 0,20, antes do processo de carbonatação



Fonte: Autor.

A pressão aplicada permaneceu de 1 bar, a qual não se manteve constante, finalizando em 0,5 bar, concentração de 100% de CO₂, tempo de carbonatação de 2h à temperatura de 60°C.

Diferente dos ensaios anteriores, neste pode-se perceber nitidamente a ocorrência de uma reação exotérmica. Essa reação foi bem acentuada nos primeiros 3 minutos. Apenas com a injeção do CO₂, antes mesmo de sua colocação em estufa, ocorreu um aquecimento da parede externa do protótipo utilizado como câmara de carbonatação que não havia sido verificado nos ensaios

¹⁴¹ MO, L.; HAO, Y.; LIU, Y.; WANG, F; DENG, M. Preparation of calcium carbonate binders via CO₂ activation of magnesium slag. **Cement and Concret Research**. 121 (2019) 81-90. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.005>. Acesso em: 15 ago. 2019.

anteriores (7%, 11%, 12% e 13% de umidade), denotando a importância da umidade para a efetividade desta reação.

Figura 28 - Corpos de Prova de Cimento à base de escória moldados com relação a/EGAF de 0,17 e 0,20, após o processo de carbonatação



Fonte: Autor.

Além da mudança de cor que pode ser observada na Figura 28, após a cura via carbonatação (2h, 60°C), os CPs de 17% e 20% de umidade quando tocados por um objeto, apresentavam um som mais metálico do que os CPs com relação a/e que possuíam um som mais cavo. As resistências à compressão também apresentaram um aumento, como pode ser visualizado na Tabela 11.

Tabela 11 - Resistência à compressão dos CPs à base de escória moldados com relação a/EGAF de 0,17; 0,20 e 0,25 ativados por CO₂ a pressão de 1 bar por duas horas a 60°C

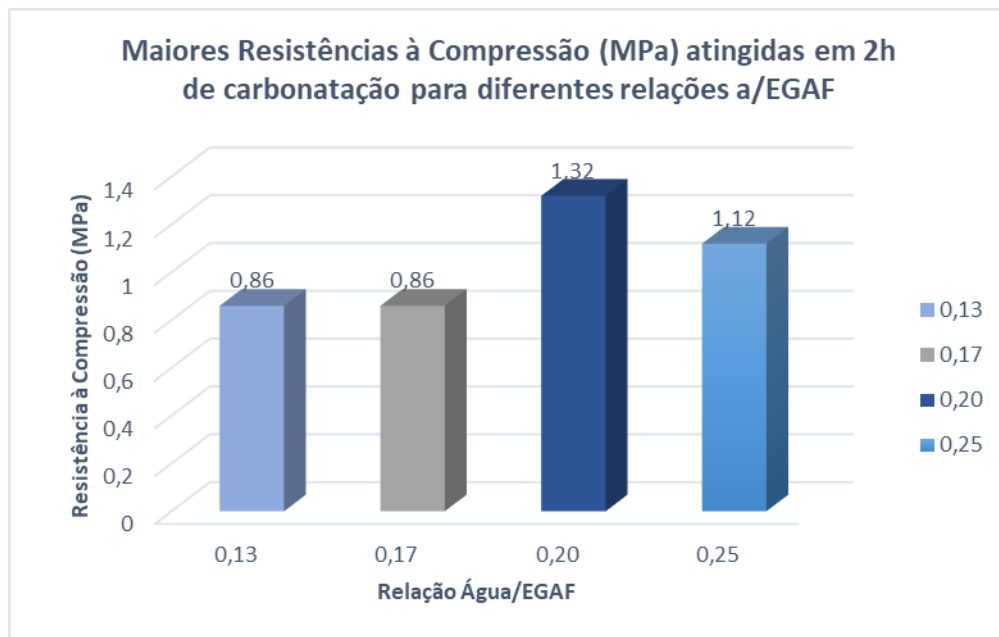
CP	Teor de Umidade (%)[*]	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Compressão Média (MPa)
1	20	1,07	1,19
2		1,32	
3	17	0,86	0,86
4		0,86	
5	25	1,12	1,12

* Teor de umidade adotado da mistura adota para o preparo dos corpos de prova

Fonte: Autor

A Figura 29 apresenta uma comparação entre as maiores resistências à compressão obtidas para as relações a/EGAF de 0,13; 0,17; 0,20 e 0,25, respectivamente. As três amostras foram submetidas, igualmente, a 2h de ativação por CO₂ e moldadas com 10 golpes de compactação. Os resultados demonstram a influência considerável da presença de água no processo de formação da resistência à compressão da pasta de escória quando ativada via carbonatação acelerada, indicando um aumento de resistência para o teor de 20% de água.

Figura 29 - Maiores Resistências à Compressão atingida em 2h de ativação por CO₂ para as relações a/EGAF de 13%, 17%, 20% e 25%, respectivamente



Fonte: Autor.

Observa-se, portanto, que as variáveis investigadas influenciaram nos resultados como esperado de acordo com a revisão bibliográfica confirmando os diversos cenários que podem ser pesquisados e sua interferência no potencial de carbonatação da escória. Os resultados também mostraram a forte influência da presença de água na efetividade da reação de carbonatação, indicando que a umidade é um parâmetro chave para que se atinjam melhores resultados de resistência à compressão uma vez que um baixo teor de de água nos poros leva a uma condição excessivamente seca para a ionização do CO₂ e a dissolução do hidróxido de cálcio, enquanto um alto teor inibe a difusão do CO₂ (Jang *et al.*, 2016)¹⁴².

No entanto, a pesquisa ainda precisa ser consolidada de forma que sejam encontrados os possíveis erros cometidos durante o desenvolvimento do processo

¹⁴² JANG, J.G., KIM, G.M., KIM, H.J., LEE, H.K., 2016. Review on recent advances in CO₂ utilization and sequestration technologies in cement-based materials. **Construction and Building Materials**. 127, 762-773. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.017>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

desde a moldagem, compactação, relação a/EGAF, temperatura entre outros parâmetros visando identificar as condições ideais para a aplicabilidade da EGAF na produção de pastas ativadas por CO₂.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo sobre a produção de cimentos especiais à base de escória granulada de alto forno ativada por CO₂.

Os resultados obtidos foram alcançados modificando-se quatro variáveis: temperatura, relação água/escória, grau de compactação e tempo de carbonatação.

As seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- O protótipo desenvolvido permitiu a ativação da EGAF através do CO₂.
- A pressão de compactação influencia nos resultados de resistência à compressão, sendo maiores para maiores pressões de compactação;
- Maiores resistências à compressão foram obtidas em CPs contendo a relação água/EGAF de 0,2.

Cimentos especiais à base de escória granulada de alto forno possuem, portanto, um potencial de cura via carbonatação a ser explorado, visando uma destinação adequada para os resíduos da produção siderúrgica e além disso a captação de dióxido de carbono. Pesquisas aprofundando o estudo dos parâmetros que influenciam o processo de carbonatação da EGAF podem resultar no entendimento das condições ideais para explorar esse processo e conseqüentemente em resultados mais significativos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns parâmetros que influenciam a carbonatação acelerada foram analisados neste trabalho, no entanto, sugere-se a análise de outras variáveis como a finura da EGAF uma vez que a área da superfície está relacionada com a reatividade do pó e conseqüentemente no desenvolvimento da força de compressão.

O aumento da pressão no processo de carbonatação também pode apresentar variações significativas nos resultados, aumentando os valores de resistência à compressão.

Da mesma forma, uma investigação mais aprofundada sobre a relação água/escória pode representar o domínio do comportamento de um parâmetro de grande importância para o aumento das forças de compressão.

REFERÊNCIAS

ABU-EISHAH, S.I., EL-DIEB, A.S., BEDIR, M.S., 2012. Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. **Construct. Build. Mater.** 34, 249-256. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.012>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Reciclagem de Escória de Alto Forno no Brasil. **Anais.** São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2000. Disponível em: <<https://bdpi.usp.br/item/001175589>>. Acesso em: 10 jul. 2019

ALMEIDA, A.J. **Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto.** Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009, 74 p. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ISMS-8BVPZX/disserta_o_janaina.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10 ago. 2019.

AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de construção.** São Paulo: Pini, 2012.

Anuário Estatístico do Setor de Transformação Não Metálicos – Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. – 2017 – Brasília. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 04 nov. 2019.

ARCELORMITTAL. **Escória de Alto-Forno.** Produtos e Soluções. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/coprodutos/escoria-alto-forno>>. Acesso em: 20 set. 2019.

ASHRAF, W. Carbonation of cement-based materials: challenges and opportunities. **Construct. Build. Mater.** 120, 558-570. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.080>. Acesso em: 06 nov. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697.** Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, julho de 2018, 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215.** Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, fevereiro de 2019, 12 p.

BLOG CIMENTO MAUÁ. **Como é feito o cimento, sua composição e nomenclatura no mercado.** Disponível em: <https://cimentomaua.com.br/blog/cimento-como-feito-composicao-e-nomenclatura/>. Acesso em: 03 dez. 2019.

BOONE, M.A., NIELSEN, P., DE KOCK, T., BOONE, M.N., QUAGHEBEUR, M., CNUUDE, V., 2014. Monitoring of stainless-steel slag carbonation using X-ray

computed microtomography. **Environ. Sci. Technol.** 48, 674 e 680. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/es402767q>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G; tradução de Sergio Murilo Stamile Soares. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. A indústria do aço no Brasil / Confederação Nacional da Indústria. **Instituto Aço Brasil. – Brasília: CNI, 2017.** 64 p. 1. Sustentabilidade 2. Indústria do Aço I. Título. Disponível em: <https://bucket-gw-cni-static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/filer_public/04/a2/04a2a7ac-4a9f-4505-84a5-f4c54242ead7/aco_brasil.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2019.

DE SILVA, P., BUCEA, L., MOOREHEAD, D.R., SIRIVIVATNANON, V., 2006. Carbonate binders: reaction kinetics, strength and microstructure. **Cemen. Concr. Compos.** 28, 613e620. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.03.004>>. Acesso em: 19 ago. 2019.

FONSECA, Gustavo Celso. Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica. Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ISMS-8ALHAQ/disserta_o_mestrado_gustavo.pdf?sequence=1>. Acesso em: 31 ago. 2019.

GHOULEH, Zaid; GUTHRIE, R. I.L.; SHAO, Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. **Construct. Build. Mater.** 99, 175-183. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

HÖLLEN, D.;BERNEDER, I.; CAPO TOUS, F.; STÖLLNER, M.; PHILIPP SEDLAZECK, K.; SCHWARZ, T., ALDRIAN, A; LEHNER, M., 2018. Stepwise treatment of ashes and slags by dissolution, precipitation of iron phases and carbonate precipitation for production of raw materials for industrial applications. **Waste Manag.** 78, 750-762. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.048>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

HUANG, L., KRIGSVOLL, G., JOHANSEN, F., LIU, Y., ZHANG, X. Carbon emission of global construction sector. **Renew. Sustain. Energy Rev.** 81, 1906-1916. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.001>>. Acesso em: 04 nov. 2019.

HUIJGEN, W.J.J., WITKAMP, G.-J., COMANS, R.N.J., 2005. Mineral CO₂ sequestration by steel slag carbonation. **Environ. Sci. Technol.** 39, 9676-9682. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/es050795f>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

HUMBERT, P.S., CASTRO-GOMES, J.P.;SAVASTANO JR., H. Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications.

Construction and Building Materials. Vol. 210 (2019) p. 413-421. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169>>. Acesso em: 14 set. 2019.

HUMBERT, P. S.; CASTRO-GOMES, J. CO₂ activated steel slag-based materials: A review. **Journal of Cleaner Production**. n. 208, p. 448-457, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.058>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

INSTITUTO DE AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade de 2018. 2018. Disponível em: http://www.acobrasil.org.br/site2015/downloads/relatorio_sustentabilidade_2012.pdf. Acesso em: 16 ago. 2019.

ISAIA, G. C. Concreto: **Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v.

JANG, J.G., KIM, G.M., KIM, H.J., LEE, H.K., 2016. Review on recent advances in CO₂ utilization and sequestration technologies in cement-based materials. **Construct. Build. Mater.** 127, 762-773. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.017>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

KIHARA, Y; CENTURIONE, S. L. **O Cimento Portland**. In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. cap. 10, p. 295-322.

LIBRANDIA , P., NIELSEN, P., COSTA, G.; SNELLINGS, R.; QUAGHEBEUR, M.; BACIOCCHIA , R. Mechanical and environmental properties of carbonated steel slag compacts as a function of mineralogy and CO₂ uptake. **Journal of CO₂ Utilization**. 33. 201-214. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.05.028>>. Acesso em: 05 set. 2019.

MAGALHÃES, Fábio Costa; REAL, Mauro de V. **Análise comparativa entre estimadores normatizados de resistência à compressão do concreto aplicada ao concreto utilizado na laje de fundo do dique seco do polo naval do Rio Grande na cidade de Rio Grande-RS**. Rio Grande: FURG, 2010, 13 p. Disponível em: <<http://repositorio.furg.br/handle/1/5022>>. Acesso em: 01 set. 2019.

MEHTA, Povindar Kumar e MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MO, L.; ZHANG, F.; DENG, M.; JIN, F.; AL-TABBAA, A.; WANG, A. Accelerated carbonation and performance of concrete made with steel slag as binding materials and aggregates. **Cemen. Concr. Compos.** 83, 138-145. 2017 Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.018>>. Acesso em: 21 set. 2019.

MO, L.; ZHANG, F.; DENG, M., Mechanical performance and microstructure of the calcium carbonate binders produced by carbonating steel slag paste under CO₂ curing, **Cem. Concr. Res.** 88 (2016) 217–226. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.013>. Acesso em: 15 ago. 2019.

MO, L.; HAO, Y.; LIU, Y.; WANG, F.; DENG, M. Preparation of calcium carbonate binders via CO₂ activation of magnesium slag. **Cement and Concret Research**. 121 (2019) 81-90. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.005>. Acesso em: 15 ago. 2019.

NATIONAL SLAG ASSOCIATION. **Steel Furnace Slag**. Products. Steel Slag. Disponível em: <<http://www.nationalslag.org/steel-furnace-slag>>. Acesso em: 20 set. 2019.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016, 888 p.

NIPPON SLAG ASSOCIATION. **Chemical composition of iron and steel slag**. About Iron and Steel Slag. Disponível em: <<http://www.slg.jp/e/slag/character.html>>. Acesso em: 20 set. 2019.

OLIVEIRA, Vanessa Carina Heinrichs Chirico. **Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos estruturais**. Tese. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde25072016144256/publico/VanessaCarinaHeinrichsChiricoOliveira2015.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2019.

PAN, X.; SHI, C.; HU, X.; OU, Z. Effects of CO₂ surface treatment on strength and permeability of one-day-aged cement mortar, **Constr. Build. Mater.** 154 (2017) 1087–1095. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.216>. Acesso em: 15 ago. 2019.

PANESAR, D.K.; MO, L. Accelerated carbonation – a potential approach to sequester CO₂ in cement paste containing slag and reactive MgO, **Cem. Concr. Compos.** 43 (2013) 69–77. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.07.001>. Acesso em: 15 ago. 2019.

PANESAR, D.K.; MO, L. Properties of binary and ternary reactive MgO mortar blends subjected to CO₂ curing, **Cem. Concr. Compos.** 38 (2013) 40–49. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.009>. Acesso em: 15 ago. 2019.

PERUZZI, A. de P. **Comportamento das Fibras de Vidro Convencionais em Matriz de Cimento Portland Modificada com Látex e Adição de Sílica Ativa**. Dissertação (Mestrado). São Carlos, 2002. USP, Escola de Engenharia de São Carlos. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18131/tde-13112002-180613/pt-br.php>>. Acesso em: 14 set. 2019.

PINTEREST. Escória de Alto Forno. Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/263812490652020421/>. Acesso em: 03 dez. 2019.

RESCHKE, Juliana Soares. **Escória granulada de fundição utilizada como substituição ao cimento em concretos: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade**. Dissertação: UFRGS. Porto Alegre, 2003. Disponível em:

<<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4481/000457136.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 01 set. 2019.

RODRIGUES, G. L. C. **Caracterização e Avaliação da Expansibilidade de Escórias de Aciaria LD não Tratadas e Tratadas**. 2007. 171 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

ROSLAN, N.H., ISMAIL, M., ABDUL-MAJID, Z., GHOREISHIAMIRI, S., MUHAMMAD, B., 2016. Performance of steel slag and steel sludge in concrete. **Construct. Build. Mater.** 104, 16-24. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.008>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

ROSTAMI, V.; SHAO, Y.; BOYD, A. J.; HE, Z. Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing, **Cem. Concr. Res.** 42 (2012) 186–193. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.010>. Acesso em: 15 ago. 2019.

SANTOS, P. B dos. Estudo da utilização da escória de alto forno como agregado graúdo em concretos fabricados em Marabá. Universidade Federal do Pará. Marabá, 2013, 59 p. Disponível em:< <https://femat.unifesspa.edu.br/images/TCCs/2013/TCC-PAMELLA-BARROS-DOS-SANTOS-2013.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

ŠAVIJA, B.; LUKOVIC, M. Carbonation of cement paste: understanding, challenges, and opportunities, **Constr. Build. Mater.** 117 (2016) 285–301. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.138>. Acesso em: 15 ago. 2019.

SILVA, A. L. **Reciclagem de Escória Cristalizada para a Produção de Argamassas**. 2006. 81 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2006. Disponível em:< <https://saturno.unifei.edu.br/bim/0030717.pdf> >. Acesso em: 11 ago. 2019.

SILVA, Eliaquim Imbiriba da; BENTO, Fabíola Tavares. **Os principais avanços e barreiras de novas tecnologias de concreto**. 2018. Disponível em:< https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_eliaquim_imiriba_da_silva_1.pdf>. Acesso em: 20 set. 2019.

SILVA, Moema Ribas. **Materiais de Construção**. 2. ed. rev. São Paulo: Pini, 1991.

SIQUEIRA, M.V.; SANTOS, A.M; AQUINO, J.T; MOTA, J.M.F. Análise de carbonatação e corrosão por íons cloreto em uma passarela da zona Oeste do Recife. **Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estrutura, 2017**.

UKWATTAGE, N.L.; RANJITH, P.G.; LI,, X. Steel-making slag for mineral sequestration of carbon dioxide by accelerated carbonation. **Measurement.** 97. 15-22. Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.10.057>>. Acesso em: 03 set. 2019.

USIMINAS. **Usiminas retoma produção do Alto-Forno.** Disponível em: <https://www.usiminas.com/blog/usiminas-retoma-producao-do-alto-forno-1-em-ipatinga/>. Acesso em: 03 dez. 2019.

VAN ZOMEREN, A., VAN DER LAAN, S.R., KOBESSEN, H.B.A., HUIJGEN, W.J.J., COMANS, R.N.J., 2011. Changes in mineralogical and leaching properties of converter steel slag resulting from accelerated carbonation at low CO₂ pressure. **Waste Manag.** n. 31, 2236-2244. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.05.022>>. Acesso em: 11 jul. 2019.

WTorre. **Portfólio: Estaleiro Rio Grande (ERG).** Disponível em: <http://www.rpeotta.com.br/portifolio/case.php?cliente=WTorre>. Acesso em: 03 dez. 2019.

YAMAMOTO, J. K.; KIHARA, Y.; COIMBRA, A. M.; MONTANHEIRO, T. J. (1997). Environmental Impact Reduction on the Production of Blended Portland Cement in Brazil. *Environmental Geosciences*, v. 4, n. 4, p. 192-206, dez. 1997. Disponível em: <http://archives.datapages.com/data/deg/1997/004004/192_deg040192.htm>. Acesso em: 30 ago. 2019.