



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

---



Humberto Dias Andrade

## **Carbonatação em Concreto de Escória de Aciaria**

Ouro Preto – MG

2018

Humberto Dias Andrade

**Carbonatação em Concreto de Escória de Aciaria**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto, DSc.

Ouro Preto – MG  
2018

A553c

Andrade, Humberto Dias.

Carbonatação em concreto de escória de aciaria [manuscrito] / Humberto Dias Andrade. - 2018.

64f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

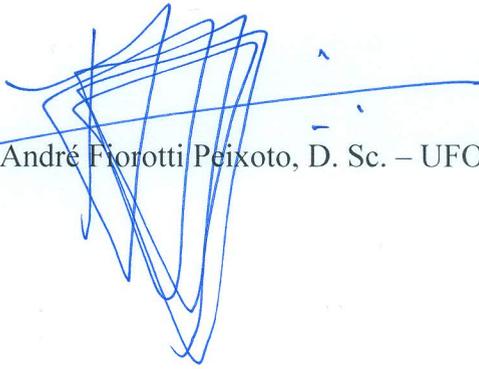
1. Carbonatação . 2. Agregados (Materiais de construção) - Escória . 3. Escória de Aciaria. I. Peixoto, Ricardo André Fiorotti. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624

# CARBONATAÇÃO EM CONCRETO DE ESCÓRIA DE ACIARIA

**AUTOR: HUMBERTO DIAS ANDRADE**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 13 de novembro de 2018, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

  
Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto, D. Sc. – UFOP (Presidente)

  
Prof. Guilherme Jorge Brigolini Silva, D. Sc. – UFOP

  
Prof. Augusto César da Silva Bezerra, D. Sc. – CEFET/MG

## AGRADECIMENTOS

Ao olhar para trás e ver tudo que foi vivido ao longo do meu mestrado, é impossível chegar à fase final sem muitos agradecimentos. A caminhada foi penosa, parecia não ter fim, mas os meus planos são regidos por um ser maior, e as vezes não é tão simples entender suas vontades. A certeza que tenho ao término dessa jornada, é que eu sou mais forte do que eu imaginava, e que nunca estive só.

Agradeço a Deus por ser presença constante em minha vida, por acalantar meu coração em todos os momentos de desespero, e por colocar em meu caminho pessoas maravilhosas, que me ajudaram a percorrer o caminho até aqui.

Ao meu orientador Ricardo Fiorotti, que me recebeu como orientado, mesmo sabendo de todas as minhas limitações dentro do programa de pós-graduação, minha profunda gratidão. Você foi luz quando imaginei estar na escuridão. Obrigado por ter estendido as mãos, por todas as vivências extra universidade, conversas sobre a vida, risos e prosas aleatórias, confraternizações e por me proporcionar o acesso ao grupo de pesquisa Reciclos, ao qual tenho a honra de carregar o nome em meu currículo a partir de agora. Conviver com você não é fácil, mas de coração, obrigado por tudo!

Ao professor Guilherme Brigolini quero agradecer por todas as palavras de incentivo ao longo desses anos, por todas as conversas após aulas de quinta-feira e por me mostrar que por mais difícil que pudesse parecer eu precisava continuar. Gratidão a você, por hoje findar esse ciclo.

Ao término de cada reunião de orientação, o desespero e o medo me consumiam, e claro, ele sempre estava lá para contribuir e me ajudar a resgatar o ânimo. José Maria Carvalho, você foi essencial para minha formação no mestrado, e serei eternamente grato a Deus por ter me presenteado com sua presença nessa fase da minha vida. Obrigado por todos os ensinamentos, risadas, protocolos Z, pelas analogias na hora do almoço e por sempre estar por perto.

Ao corpo docente e demais funcionários do programa de pós-graduação, deixo um abraço de luz e paz. Em especial gostaria de agradecer ao professor Henor Artur, pela presteza que a mim concedeu desde o momento da minha inscrição, ao professor Marcílio agradeço por todos os momentos felizes em sala de aula, sua alegria em estar conosco nos contagiava, e por fim ao professor Alexandre Cury por conseguir plantar conhecimento em terras que não estavam mais férteis. À UFOP, CAPES, FAPEMIG e CNPq, agradeço pelo apoio organizacional e financeiro.

Sozinho eu jamais venceria esse mestrado, e com a ajuda do grupo Reciclos tudo ficou mais leve. Deixo meus agradecimentos a todos que trocaram conhecimento comigo ao longo desses meses. Obrigado por todas as nossas vivências, por todas as risadas, por

todas as lágrimas secadas, obrigado por todo amor recebido de vocês. A palavra “refaça” assusta, e quando ela chegou o desespero veio junto, e com ele pessoas que agora quero agradecer. Fernanda, Lais, Júnio e Paulinha, obrigado por compartilharem comigo o natal no laboratório, eu jamais esquecerei disso, gratidão. Agradeço ao técnico e amigo, Júnio Batista, por todo carinho com que executa nossos ensaios. Toda ajuda foi valiosa, sou grato a todos.

Agradeço à Ouro Preto por me apresentar pessoas tão especiais. Às repúblicas, Artigo de Luxo, Patotinha e Rebenta, minha gratidão por todo carinho recebido de vocês. Aos amigos, Fernanda, Lucas, Ju, Marcela, Lais, Tainá, Ana Carolina, Wender e Paulo, vocês foram essenciais. Me faltam palavras pra agradecer minhas irmãs acadêmicas Ana, Bê e Ju, vocês são luz em minha vida. Às minhas terapeutas, Neucy, Alessandra e Benila, obrigado por mostrarem que eu consigo viver em paz. Benila, obrigado por segurar minha mão e caminhar junto comigo nos momentos difíceis. Agradeço também ao meu amigo Keoma, por todas as conversas, conselhos e incentivo.

Aos meus amigos de Maravilhas e Belo Horizonte, peço desculpa pela ausência, mas saibam que eu nunca me esqueço de vocês. Karine, Davi, Thaís e Denise, obrigado por sempre estarem comigo quando precisei, com vocês eu confirmo a minha intuição de que a amizade perdura a tempo e distância sim. Abração a vocês.

Minha família com todos os seus defeitos é maravilhosa. Agradeço de coração à família Maciel Machado e a família Andrade, pelo carinho que sempre recebo de vocês. Nos momentos de cansaço e desespero vocês sempre me libertavam. Sou grato pela vida de cada um de vocês.

Ao meu pai Luiz Carlos e meu irmão Danilo Andrade, presença viva em meu coração, peço que continuem cuidando de mim. Permaneçam sempre comigo, onde quer que eu vá. Saber que vocês caminham ao meu lado, me deixa forte pra enfrentar todas as barreiras que surgirem. Eu amo vocês!

A maior incentivadora desse processo, sem dúvidas é minha mãe. Essa mulher guerreira, que abriu mão de seus desejos para que eu pudesse concluir mais uma etapa em minha vida, passando por dificuldades que só nós sabemos. Mãe, não tem um dia nessa vida que meu coração não transborde de gratidão a Deus por você ser a minha mãe. Eu te amo muito, e dedico esse mestrado à senhora. Obrigado por todos valores passados a mim, por ser exemplo de força e por sempre acreditar que eu seria mestre. Mais uma vez chegamos juntos ao fim de uma batalha. Eu te amo!

Essa vivência deixou marcas, que carregarei comigo ao longo de toda minha trajetória terrestre. Chego ao término dessa batalha ferido, mas nem um pouco triste, pelo contrário, chego radiante, e como sempre, com um grande sorriso estampado no rosto.

De todo meu coração, gratidão a cada ser que em minha vida habita!

*“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”*

Theodore Roosevelt

## RESUMO

A utilização de materiais alternativos na produção de matrizes cimentícias se tornou uma necessidade, visto que, por um lado, há uma grande demanda do setor de construção por materiais naturais, e por outro, a necessidade de se promover destinação adequada de uma gama de resíduos industriais, cuja geração é crescente. No entanto, as matrizes alternativas devem apresentar desempenho similar às convencionais, dessa forma, vários testes devem ser realizados, afim de se atestar a qualidade desses materiais. Na presente pesquisa, concretos estruturais produzidos com substituição total dos agregados convencionais por agregados de escória de aciaria foram avaliados, sendo que o desempenho mecânico e de durabilidade desses produtos foram verificados. A carbonatação do concreto exposto a atmosferas naturais, é um processo lento, mas os resultados para décadas de utilização precisam ser estimados em tempo viável e com boa confiabilidade. Dessa forma, testes acelerados utilizando atmosferas com alta concentração de CO<sub>2</sub> vêm sendo propostos. Este trabalho vem contribuir para o entendimento da carbonatação de concretos produzidos com 100% de substituição de escória de aciaria, por meio da realização de ensaios acelerados. Adicionalmente, a velocidade de pulso ultrassônico e a resistência mecânica desses concretos foram avaliadas, e a relação desses parâmetros com o grau de carbonatação inferida.

**Palavras-chaves:** carbonatação, concreto de escória, escória de aciaria.

## **ABSTRACT**

The use of alternative materials in the production of cement matrices has become a necessity, due to the great demand of the construction sector for natural materials and the constant search to promote the adequate destination of a range of residues industries, whose generation is growing. However, the alternative matrices must perform similarly to conventional ones, in this way, several tests must be performed, in order to verify the quality of these materials. In the present research, structural concretes produced with total replacement of conventional aggregates by steel slag were evaluated, and the mechanical and durability performance of these products were tested. The carbonation of concrete exposed to natural atmospheres is a slow process, but the results for decades of use need to be estimated in a feasible time and with good reliability. Thus, accelerated tests using atmospheres with high CO<sub>2</sub> concentration have been proposed. This work contributes to the understanding of the carbonation of concretes fabricated with 100% replacement of steel slag by means of accelerated tests. Additionally, the ultrasonic pulse velocity and the mechanical strength of these concretes were evaluated, and the relationship of these parameters with the degree of carbonation measured.

**Keywords:** carbonation, steel slag concrete, steel slag.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	Objetivos .....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	17
2.1	Resíduos industriais .....	17
2.2	Produção do Aço .....	18
2.3	Escória de Aciaria .....	19
2.4	Destinação das Escórias de Aciaria.....	20
2.5	Durabilidade.....	21
2.5.1	Carbonatação.....	22
2.6	Cimento Portland .....	25
2.7	Aditivos .....	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1	Projeto das misturas de concreto.....	31
3.2	Produção das matrizes .....	33
3.3	Resistência a compressão .....	34
3.4	Velocidade de pulso ultrassônico.....	34
3.5	Durabilidade.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1	Matrizes Cimentícias.....	38
4.2	Caracterização do Concreto no Estado Endurecido <b>Erro! Indicador não definido.</b>	
4.2.1	Índice de Vazios, Absorção de Água e Velocidade de Pulso Ultrassônico .....	42
4.3	Massa Específica .....	46
4.4	Resistência à compressão .....	47

4.5	Zona de Transição Interface (ZTI) .....	49
4.6	Carbonatação .....	51
5	Conclusão .....	58
6	Bibliografia.....	59

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma simplificado da Produção do Aço. ....	19
Figura 2: Deslocamento do concreto e corrosão da armadura. ....	24
Figura 3: Curva de saturação para o aditivo. ....	33
Figura 4: Esquema de impermeabilização do CP. ....	36
Figura 5: Difração escória BOF. ....	39
Figura 6: Difração escória EAF. ....	40
Figura 7: Distribuição granulométrica dos agregados. ....	41
Figura 8: Índice de Vazios dos Concretos. ....	43
Figura 9: Absorção de água dos concretos. ....	44
Figura 10: Velocidade de Pulso Ultrassônico. ....	45
Figura 11: Massa específica dos concretos não aditivados. ....	46
Figura 12: Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias. ....	47
Figura 13: Forma dos agregados graúdos. a) Gnaisse b) EAF c) BOFS. ....	49
Figura 14: Seção Transversal do Corpo de Prova de Concreto de Escória. ....	50
Figura 15: ZTI do concreto de escória. ....	50
Figura 16: ZTI do concreto de referência. ....	51
Figura 17: Traços não aditivados após aspensão de fenolftaleína. ....	54
Figura 18: Traços aditivados após aspensão de fenolftaleína. ....	55
Figura 19: VPU concreto C15. ....	56
Figura 20: VPU concreto C25. ....	57
Figura 21: VPU concreto C35. ....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de Cimento.....	26
Tabela 2: Análise química do cimento.....	30
Tabela 3: Traços utilizados.....	32
Tabela 4: Parâmetros utilizados no ensaio de carbonatação acelerada.....	35
Tabela 5: Fluorescência de Raio – X dos agregados.....	38
Tabela 6: Carbonatação.....	52

# Capítulo 1 – Introdução

A redução da geração de resíduos sólidos é meta comum para as indústrias. Dentro deste contexto, o estudo da possibilidade do aproveitamento de resíduos nos diversos segmentos da construção civil é de grande importância. O Brasil é o 9º produtor de aço bruto a nível mundial, totalizando em 2017 uma produção de 31,3 milhões de toneladas de aço produzido.

## 1 INTRODUÇÃO

A evolução das questões ambientais também está ligada à conscientização da população e às legislações ambientais vigentes que, a cada dia, estão mais rigorosas. O setor da construção civil é o maior consumidor de recursos naturais no mundo, seguido por setores da indústria do cimento, siderurgia, alumínio, química, ferro-liga e papel/celulose (Juras, 2015; Tripathi & Chaudhary, 2016; IAB, 2015)

A redução da geração de resíduos sólidos é meta comum para as indústrias. Dentro deste contexto, o estudo da possibilidade do aproveitamento de resíduos nos diversos segmentos da construção civil é de grande importância. O Brasil é o 9º produtor de aço bruto a nível mundial, totalizando em 2017 uma produção de 31,3 milhões de toneladas de aço produzido (IAB, 2018).

As escórias de aciaria gerada a partir da produção do aço, são oriundas de dois processos; fornos conversores Linz – Donawitz (BOFS), ou de Arco Elétrico (EA). Segundo IAB (2015) a geração de resíduos em toda a cadeia produtiva do aço, gera 600 kg/ton de aço. Considera-se que, para cada tonelada de aço produzidos são gerados 150 kg de escória de aciaria (IAB, 2018).

Muitos estudos de viabilidade na utilização de escórias de aço em compósitos à base de cimento foram realizados e os resultados indicam que processos como estabilização e separação magnética são eficientes na neutralização de agentes deletérios (Diniz, Carvalho, Mendes, & Peixoto, 2017). Materiais tecnicamente competentes foram produzidos e relatados na literatura, destacando o uso de escórias de aciaria na substituição total ou parcial de agregados naturais em compósitos à base de cimento, incluindo concreto estrutural (Jesus, et al., 2011; Diniz, Carvalho, Mendes, & Peixoto, 2017; Haltiery, Borges, Rangueri, Silva, & Peixoto, 2014; Barros, S'antana, Januzzi, Cury, & Peixoto, 2014; Hernandez, Cortés, & Bustos, 2015; Hidayah Roslan, Ismail, Abdul-Majid, & Ghoreishiamiri, 2016; Tripathi & Chaudhary, 2016; França, et al., 2013). A viabilidade econômica do processamento e uso de escória de aciaria como agregados para construção civil e pesada também foi demonstrada (Gonçalves, Fontes, Mendes, Silva, & Peixoto, 2016).

A durabilidade das estruturas de concreto armado está relacionada com a integridade das armaduras frente aos ataques dos agentes agressivos do meio. A corrosão do aço, como efeito da despassivação da armadura induzida pela carbonatação do concreto é um fator preocupante. (Zhang, Zhou, Zhou, Gao, & Wang, 2013). A durabilidade do concreto está intimamente relacionada com sua porosidade, de maneira geral, concretos menos porosos são mais duráveis (Mehta & Monteiro, 2014).

A carbonatação se expressa de forma mais efetiva em ambientes urbanos ou industriais, onde verifica-se maior exposição do concreto a níveis mais elevados de CO<sub>2</sub>. O dióxido de carbono penetra pelos poros do concreto e reage com a água disponível na estrutura, formando-se o ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). O ácido carbônico reage com a pasta de cimento hidratada, particularmente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), e resulta em água e carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). Em um taxa mais baixa, há também reação com CSH (Hills, Gordon, Florin, & Fennel, 2015) (Tokudome, 2009).

O concreto possui comumente o pH entre 12,6 e 13,5, mas, em função do processo de carbonatação, esses valores se reduzem para uma faixa de pH 8,5. A carbonatação ocorre da superfície externa da estrutura para o interior da mesma, segundo uma frente de carbonatação (Cascardo, 2011; Mehta & Monteiro, 2014; Petrucci, 1998; Leemann, Nygaard, Kaufmann, & Loser, 2015).

A partir da despassivação das armaduras, (Tokudome, 2009; Ekolu, 2016), os danos causados são vários, como fissuração do concreto, destacamento do cobrimento do aço, redução da seção da armadura e perda de aderência desta com o concreto.

A carbonatação é ainda função de fatores como condições ambientais (altas concentrações de CO<sub>2</sub>), dosagem do concreto (altas relação de água / cimento resultam em concretos porosos e, portanto, aumentam as chances de difusão de CO<sub>2</sub> nos poros), lançamento e adensamento (se o concreto tiver baixa permeabilidade (compacto), dificultará a entrada de agentes agressivos) e cura (o concreto mal curado possui microfissuras que o enfraquecem).

Alguns estudos de carbonatação para concretos com adição de escória vem sendo desenvolvidos, porém comportamentos equivalentes aos de concretos convencionais vem sendo reportados (Tripathi & Chaudhary, 2016). No entanto, a

maioria dos estudos tratam de concretos com substituição parcial de agregados naturais por agregados de escória de aciaria, no que se difere desse estudo, onde todo agregado natural é substituído integralmente por agregados de escória de aciaria. Concretos produzidos com a substituição integral de agregados naturais por agregados de escória de aciaria produziram matrizes com baixa permeabilidade e adequada resistência mecânica (Haltieri, Borges, Rangueri, Silva, & Peixoto, 2014).

## **1.1 Objetivos**

A presente pesquisa, tem como objetivo geral, o estudo da carbonatação em concretos produzidos integralmente com agregados de escória de aciaria LD e EAF, oriundas de dois processos de aciaria contidos na metodologia de produção do aço, considerando a vida útil de projeto determinada pela NBR 15575/2013.

Como objetivos específicos, relacionam-se:

- Caracterização química, física e morfológica das escórias de aciaria;
- Determinação das propriedades físicas e mecânicas para as matrizes cimentícias com agregados LD e EAF;
- Determinação das características morfológicas e microestruturais para as matrizes cimentícias com agregados LD e EAF;
- Avaliação do desempenho à carbonatação dos concretos produzidos integralmente com agregados de escória de aciaria LD e EAF, em comparação a concretos produzidos convencionalmente.

## *Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica*

A reutilização da escória de aciaria é um tema de crescente estudo. Diversas formas de reutilizar o subproduto da produção do aço vem sendo estudado, a fim de contribuir positivamente com a redução da deposição de resíduos no meio, e, garantindo as mesmas competências dos produtos que são produzidos convencionalmente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Resíduos industriais

De acordo com a NR 25 (Ministério do Trabalho, 2011), entende-se como resíduos industriais aqueles provenientes dos processos industriais, na forma sólida, líquida ou gasosa ou combinação dessas, e que por suas características físicas, químicas ou microbiológicas não se assemelham aos resíduos domésticos, como cinzas, lodos, óleos, materiais alcalinos ou ácidos, escórias, poeiras, borras, substâncias lixiviadas e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como demais efluentes líquidos e emissões gasosas contaminantes atmosféricos.

A geração de resíduos pela siderurgia no ano de 2015 e 2016 se manteve constante, voltando a crescer novamente no ano de 2017. A cada tonelada de aço produzido, origina-se 607 kg de resíduos (pós, lamas, escórias, carepas, refratários, etc.) (IAB, 2018). O instituto Aço Brasil, no relatório de 2018 ainda detalha:

A geração de agregado siderúrgico de alto-forno representou 42% do volume total nos dois anos, e a de escória de aciaria, 27%. O restante foram os finos, pós, lamas e outros, resultantes dos processos e sistemas de tratamento existentes. Desse total, foram reaproveitados 88% em 2016 e 86% em 2017. Os agregados siderúrgicos de alto-forno em sua quase totalidade foram vendidos nos dois anos (96% em 2016 e 92% em 2017), especialmente para a produção de cimento (99%). No caso das escórias de aciaria, foram vendidos 31% em 2016 e 36% em 2017 e reutilizados internamente, 25% e 23%, respectivamente. A sua principal aplicação (46% em 2016 e 50% em 2017) foi como base para a pavimentação de vias e estradas (IAB, 2018).

A escória de aciaria é o principal resíduo do processo siderúrgico. Devido a sua composição química e propriedades tecnológicas, pode ser reutilizada como matéria prima em siderúrgicas, bem como agregados para a construção civil. A alta geração de escória acarreta vários problemas ambientais, se descartada de maneira inadequada. Assim como a China, que lidera o ranking da produção do aço, o Brasil possui uma baixa taxa de reutilização da escória (Guo, Bao, & Wang, 2018).

## 2.2 Produção do Aço

No ano de 2017 a produção de aço bruto no Brasil atingiu 34,4 milhões de toneladas, angariando um crescimento de 9,8% em comparação com o ano de 2016. A nível mundial, o Brasil caiu da 8ª para 9ª posição no ranking de produção de aço, desde a última avaliação apresentada em 2016, que hoje segue liderado pela China. No entanto segue em 1º lugar no ranking quando se avalia a América Latina, correspondendo a 53,5% da produção do aço. O estado de Minas Gerais segue ocupando a 1ª posição juntamente com estado do Rio de Janeiro na produção do aço, a nível Brasil. (IAB, 2018).

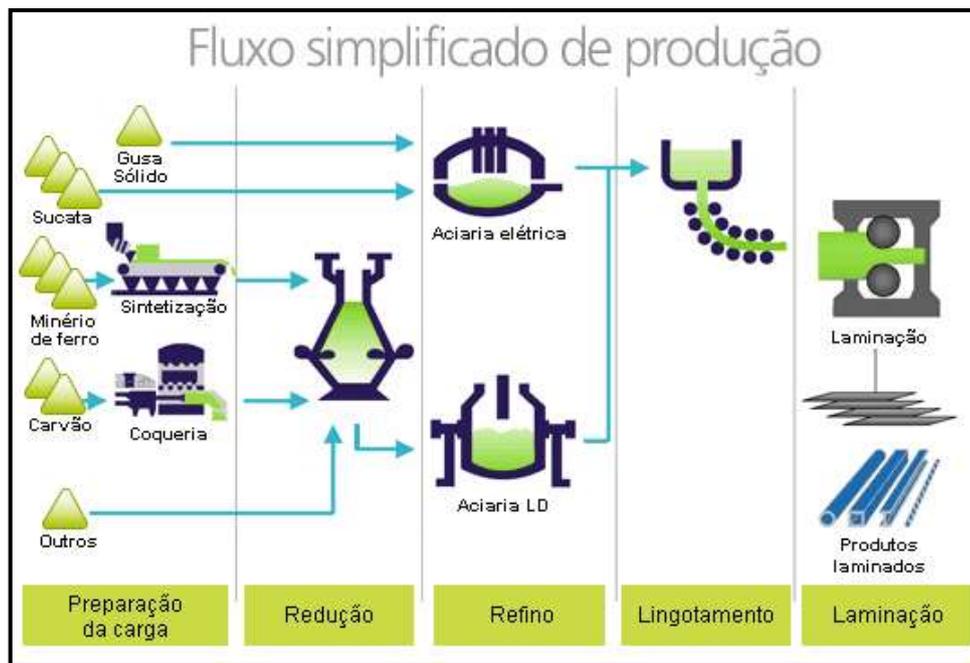
Na siderurgia, usam-se carvão mineral e vegetal. como combustível, necessárias à fusão do minério (1.500 °C) e como redutor, associando-se ao oxigênio que se desprende do minério a alta temperatura, deixando livre o ferro (IAB, 2015).

No processo de redução, que ocorre no alto forno, o ferro se liquefaz e é chamado de ferro gusa ou ferro de primeira fusão. Impurezas como calcário, sílica e outros formam a escória de alto forno, que é matéria-prima para a fabricação de cimento. A etapa seguinte do processo é o refino, onde o ferro gusa é levado para a aciaria, ainda em estado líquido, para ser transformado em aço. O refino do aço se faz em fornos a oxigênio (BOF/LD) ou elétricos (EAF) (IAB, 2018). e segue para laminação.

A etapa do refino ocorre após o processo de produção do ferro gusa. O processo de refinamento do aço é responsável pela oxidação de grande parte do carbono presente no ferro gusa, reduzindo de 4 para 1% o nível de carbono do material. Além da redução do carbono, ocorre também a retirada das impurezas contidas (fósforo, enxofre, entre outras). O carbono é liberado sob a forma de gás (CO e CO<sub>2</sub>) e as impurezas são eliminadas na escória de aciaria (Guo, Bao, & Wang, 2018; IAB, 2018).

O processo de produção do aço pode ser observado na ilustração apresentada na Figura 1 a seguir.

**Figura 1: Fluxograma simplificado da Produção do Aço.**



Fonte: (IAB, 2015).

### 2.3 Escória de Aciaria

Considerando que a taxa de geração de escórias de aciaria por tonelada de aço seja de 607 kg/ton, e que as ações de reciclagem e reuso dessas escórias de aciaria atingiram percentuais de reaproveitamento de 59% em 2017, foram estocadas 12,83 milhões de toneladas de escória de aciaria LD ou EAF neste mesmo ano (IAB, 2018).

As escórias de aciaria podem ser geradas segundo diferentes processos de refino: LD (Linz-Donawitz) conversor de oxigênio elétrico, EAF (Eletric Arc Furnace) forno de arco elétrico e OH (Open Heart) processo Siemens-Martin. De acordo com o IBS (2009), a produção de aço no Brasil concentra-se nas tecnologias do processo LD (80%) e EAF (20%), com algumas siderurgias em processo OH (1,9%) (IAB, 2018).

A escória é transportada da aciaria para os pátios de destinação em seu estado líquido. O material é vertido do conversor em um carro e transportada até o pátio, onde é lançada em baias de resfriamento. Durante a etapa de resfriamento, ocorre a fragmentação da escória que se dá devido ao choque térmico provocado

pela diferença de temperatura do ar ou pela aspersão de jatos de água. Quando resfriada, a escória de aciaria é transportada para pilhas nos pátios de beneficiamento, onde permanece estocada para posterior processamento. No processamento mais convencional, a escória passa por processos físicos de cominuição segregação gravimétrica e magnética. Os materiais magnéticos (aço) retornam ao processo siderúrgico e os não metálicos são estocados em pilhas (IAB, 2018).

As escórias EAF e BOF apresentam composições químicas semelhantes, observando através de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX), que os principais compostos encontrados foram são  $Fe_2O_3$  (34,5% e 34,2% respectivamente), CaO (36,2% e 28,4%) e  $SiO_2$  (13,4% e 18,1%).

## **2.4 Destinação das Escórias de Aciaria**

As tecnologias para a reinserção das escórias de aciaria na cadeia produtiva têm ocupado espaços de importância entre a comunidade científica. Diversas formas de reutilizar o subproduto da produção do aço vem sendo estudadas, afim de contribuir positivamente com a redução dos volumes estocados ao mesmo tempo em que se privilegia uma destinação adequada.

Os estudos de Diniz et al. (2017) e Haltiery et al. (2014) demonstraram que não há diferença entre o comportamento elasto-mecânico de matrizes cimentícias moldadas in-loco ou pré-moldadas, produzidas com agregados naturais ou obtidas da substituição integral dos agregados naturais por escórias de aciaria.

Palankar, Shankar, & Mithun (2016) conduziram experimentos que buscavam determinar a durabilidade de concretos produzidos com escória de aciaria. Foram produzidos modelos com substituição de 0 a 100% do agregado graúdo de rochas naturais, por agregado graúdo de escória de aciaria. Os resultados obtidos indicaram que concretos produzidos com agregados graúdos de escória foram menos duráveis que aqueles produzidos com agregados naturais, embora fossem também verificados menor custo de produção e alguma viabilidade ambiental.

Santos, et al (2014) analisaram a viabilidade da produção de blocos de concreto para alvenaria modular obtidos da substituição integral de agregados naturais por agregados de escória de aciaria tipo LD. Os resultados obtidos para os

blocos de alvenaria produzidos integralmente com escórias pós-processadas (frações não magnéticas) demonstraram-se duráveis considerada a estabilidade dimensional quando expostos a testes acelerados por ataque químico (ASTM C1012), com variação dimensional máxima (expansão) inferior a 0,3%.

Carvalho, et al (2017) demonstraram que blocos de concreto para alvenaria estrutural produzidos com escórias de aciaria são mecanicamente competentes e produzem estruturas estáveis e resistentes aos esforços de utilização para as construções. As matrizes cimentícias obtidas possuem microestrutura bem desenvolvida, de reduzida porosidade como resultado de interações entre a pasta de cimento e os agregados de escória.

## **2.5 Durabilidade**

A durabilidade do concreto é considerada uma das propriedades mais importantes para avaliar os requisitos de serviço e estabilidade durante toda a vida de trabalho. As propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, como resistência à compressão, absorção de água, permeabilidade, congelamento-descongelamento tem sido estudadas intensivamente (Brandt, 2008).

O concreto é usualmente empregado em ambientes diversos, como nas regiões marinha, salina, fria, urbana, rural, planalto, etc. Na prática, ambientes ou climas diferentes podem acelerar a deterioração da durabilidade das estruturas de concreto. Neste contexto, a compreensão do efeito do ambiente é um fator chave na otimização do desempenho do concreto (Wang, Dhir, & Levitt, 1994).

Em regiões marinhas, por exemplo, o concreto sofre corrosão devido à imersão no mar por um longo período e, especialmente, vários fatores afetam a vida útil e a facilidade de manutenção do concreto, que incluem ação de cloreto, sulfato, alcalinidade e eletroquímica (Kwon, Lee, Karthick, & Saraswathy, 2017).

Com o intuito de garantir a segurança dos usuários, a associação Brasileira de normas técnicas prescreve algumas recomendações a respeito da durabilidade das estruturas. Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013), a Vida Útil do Projeto para uma estrutura em concreto deve ser igual ou superior há 50 anos.

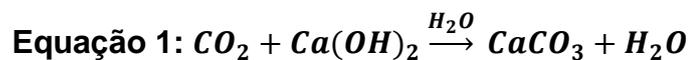
### 2.5.1 Carbonatação

A carbonatação é um dos parâmetros de durabilidade a ser analisado quando se fala em estruturas de concreto. O composto que desencadeia o fenômeno da carbonatação do concreto é bem conhecido e facilmente encontrado em centros urbanos. Nestes ambientes o concreto está exposto a uma alta concentração de CO<sub>2</sub>, que conforme a National Oceanic and Atmospheric Administration, em 2017 bateu o recorde, chegando a 403,3 ppm (partes por milhão).

O dióxido de carbono presente na atmosfera penetra pelos poros do concreto e reage com a umidade (água) presente na estrutura. Com isso, forma-se o ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), que reage com a pasta de cimento hidratada, particularmente com o hidróxido de cálcio Ca(OH)<sub>2</sub>, e resulta em água e carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) (Tokudome, 2009).

Além desse mecanismo de reação é preciso relatar também, que os álcalis do cimento e os álcalis presentes nos agregados da matriz, também criam ambiente adequado para carbonatação, formando carbonatos de sódio e potássio, por exemplo (L. Provis, A. Bernal, Mejía de Gutiérrez, & S. J. van Deventer, 2015).

De acordo com Mehta & Monteiro (2014), os compostos hidratados do cimento suscetíveis a carbonatação são o hidróxido de Cálcio Ca(OH)<sub>2</sub>, o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH), bem como os silicatos alcalinos, conforme ilustrado por Cadore (2008) pelas equações 1 e 2 à seguir.

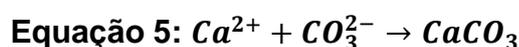


No entanto, inicialmente deve-se haver a penetração do gás CO<sub>2</sub>, nos poros do concreto, para que, em contato com a umidade, os elementos alcalinos reajam com o CO<sub>2</sub>, gerando os produtos mostrados pela equação 3 (Cadore, 2008).

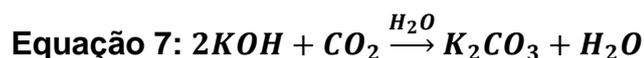
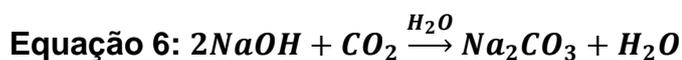


Ocorrida a solubilização do CO<sub>2</sub>, a carbonatação se inicia. Nas equações 4

e 5 é possível observar o processo de solubilização e a formação do carbonato de cálcio (Cadore, 2008).



Os álcalis contidos no cimento (sódio e potássio), também estão sujeitos à carbonatação, e as reações 6 e 7 mostram o mecanismo da reação, exposto por Cadore (2008).

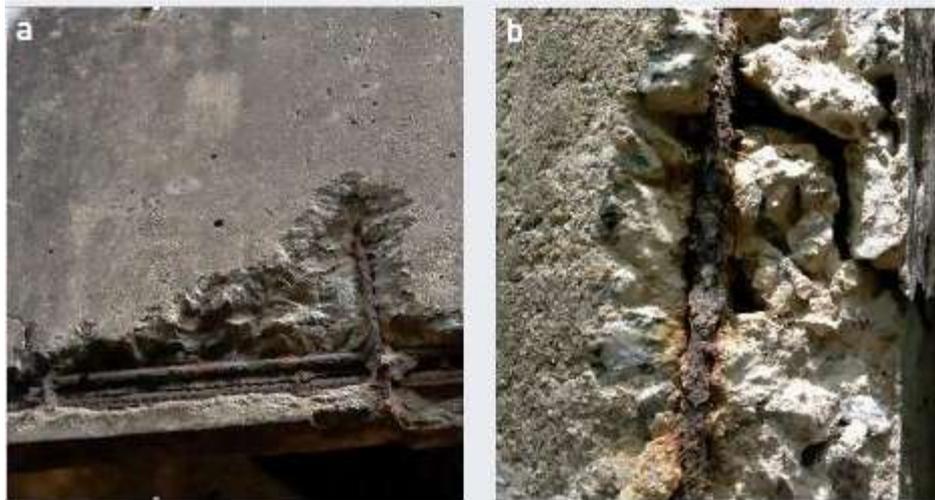


Segundo Tokudome (2009) , o concreto possui comumente o pH entre 12,6 e 13,5. Após o processo de carbonatação, esses valores se reduzem para uma margem de 8,5, que induz uma despassivação das armaduras, criando ambiente favorável ao ataque de agentes externos como água e cloretos, presentes também na atmosfera.

O mecanismo de carbonatação é composto pela formação de uma frente de carbonatação, que avança pela seção, da face externa para o interior da peça, criando uma zona básica e uma neutra, que atua na despassivação das armaduras, Leemann, Nygaard, Kaufmann, & Loser (2015).

Os efeitos do mecanismo da ação da carbonatação sobre as armaduras, podem ser fissuração do concreto, destacamento do cobrimento do aço, redução da seção da armadura e perda de aderência desta com o concreto, Tokudome (2009). A Figura 2 apresenta armadura com corrosão, em concreto carbonatado e com deslocamento, podendo ser observado também a corrosão causada na armadura (Araujo, 2016).

**Figura 2: Deslocamento do concreto e corrosão da armadura.**



Fonte: (Araujo, 2016).

O desenvolvimento dos mecanismos de carbonatação dependem fundamentalmente de fatores relacionados às condições do meio e da matriz cimentícia (Kazmierczak, 1995):

- concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera;
- tipo de ambiente; aberto ou fechado (maior efeito da carbonatação, função da manutenção da umidade);
- umidade relativa do ar; grau de saturação dos poros;
- temperatura; que induz maiores velocidades de carbonatação;
- composição química do cimento e adições; disponibilidade de álcalis, porosidade da matriz e reserva alcalina;
- dosagem do concreto; altas relação de água / cimento (a/c) resultam em concretos porosos e, portanto, aumentam as chances de difusão de  $\text{CO}_2$  nos poros;
- qualidade de execução; lançamento, adensamento e cura (porosidade, grau de hidratação e estado de fissuração)

Cheng, et al. (2017) em seu estudo produziu concretos com vários tipos de agregados, sendo um deles a escória. Em seu estudo verifica-se que, os concretos produzidos com adição de escória apresentaram resistência à compressão 15% superior ao concreto de referência, e nos testes de carbonatação apresentaram resultados 19% melhores, quando comparado ao concreto sem adição.

Para fins de pesquisa, com tempos de execução limitados, faz-se necessário realizar o ensaio de carbonatação acelerada. O mesmo consiste em saturar um ambiente (câmara) com CO<sub>2</sub>, tendo umidade e temperatura controlada, afim de se obter a simulação de anos de exposição de uma estrutura em dias ou meses.

No trabalho de Sanjuán, Andrade, & Cheyrezy (2003) foi encontrada uma relação linear para a profundidade de carbonatação entre o ensaio acelerado e a carbonatação natural. Para tal, os autores produziram 5 tratamentos diferentes, e concluíram que a 60% de umidade, 5% de concentração de CO<sub>2</sub> e 25 °C de temperatura, cria um ambiente em que 6 dias seria equivalente à 1 ano de exposição pelo modo natural.

Os resultados encontrados por Ho & Lewis (1987) são satisfatórios, visto que o mesmo comparou a carbonatação acelerada com a natural. Em seu estudo amostras ficaram expostas por cinco anos, e ao comparar a medida de carbonatação de 1 ano do concreto exposto ao ambiente, percebe-se que, o concreto que ficou exposto ao ensaio acelerado com 4% de saturação de CO<sub>2</sub> durante uma semana, obtiveram os mesmos resultados para carbonatação.

## **2.6 Cimento Portland**

Cimentos hidráulicos ou resistentes à água para aplicações estruturais se constituem basicamente de cimento Portland e suas diversas modificações. O cimento Portland é um cimento hidráulico produzido pela pulverização de clínqueres constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos cristalinos e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e até 5% de calcário como adição na moagem (Mehta & Monteiro, 2014).

A indústria do cimento é responsável por cerca de 5% das emissões mundiais de CO<sub>2</sub> e por aproximadamente 3% das emissões de gases do efeito estufa (MAURY & BLUMENSCHNEIN, 2012). Uma das formas de diminuir o seu impacto ambiental é a incorporação de adições minerais na fabricação do cimento, em substituição ao clínquer. Assim, contribui-se para a reutilização de resíduos, além de conferir características especiais ao cimento. No Brasil existem cinco tipos de cimento normatizados pela NBR 16697:2018. Os mesmos são classificados de acordo com suas adições e funcionalidades e mostrados na Tabela 1.

**Tabela 1: Tipos de Cimento.**

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência (MPa)	Clínquer + Sulfato de Cálcio	Escória Granulada de alto-forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
Cimento Portland Comum	CP I	25, 32 ou 40	95-100	0-5		
	CP I-S		90-94	0	0	6-10
Cimento Portland composto	CP II-E		51-94	6-34	0	0-15
	CP II-F		71-94	0	6-14	0-15
	CP II-Z		75-89	0	0	11-25
Cimento Portland de Alto-Forno	CP III		25-65	35-75	0	0-10
Cimento pozolânico	CP IV		45-85	0	15-50	0-10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V	ARI	90-100	0	0	0-10
Cimento Portland Branco	CPB	25, 32 ou 40	75-100	-	-	0-25

Todos os cimentos ainda podem ser classificados como resistentes a sulfatos (RS), quando apresentam expansão menor do que 0,03% aos 56 dias (ABNT, 2018). Os cimentos tipo RS (com adição de escória) mais comercializados atualmente são CP III e CP IV, no entanto com a crescente demanda por concretos de resistência inicial elevada surgiu o cimento tipo CP V RS, vendidos sob demanda. De forma

geral, os cimentos modificados são parte da rotina brasileira, sendo uma alternativa viável tecnicamente, economicamente e ambientalmente.

## 2.7 Aditivos

A ASTM C 125 define aditivo como qualquer material utilizado na produção do concreto, que se difere de água, cimento ou agregados. O aditivo pode ser utilizado tanto no concreto, quanto em argamassa e deve ser adicionado às misturas antes, ou durante o processo de produção (Mehta & Monteiro, 2014).

Os aditivos possuem variadas composições químicas, o que dificulta a classificação do mesmo, visto que cada tipo de aditivo desempenha mais de uma função, quando aplicado ao concreto/argamassa. Dentre os aditivos disponíveis pode-se citar os plastificantes, superplastificantes, retardadores de pega, incorporador de ar, dentre outros (Mehta & Monteiro, 2014).

Dentre as vantagens de se utilizar aditivos químicos durante a produção do concreto, destaca-se a alta trabalhabilidade, característica que facilita a manipulação, adensamento, aplicação do material e a produção de concretos de elevado desempenho com um consumo menor de água, boa durabilidade e elevada resistência. Desta forma, os aditivos superplastificantes incrementam de forma positiva as propriedades do concreto nas idades iniciais (Castro & Pandolfelli, 2009).

Com respeito aos aditivos superplastificantes, Mehta & Monteiro (2014) considera que:

Os superplastificantes são também chamados de aditivos redutores de água de alta eficiência, porque são capazes de reduzir a água de amassamento em uma determinada mistura de concreto de três a quatro vezes mais efetivamente quando comparados aos aditivos redutores de água normais. Quando adsorvido nas partículas de cimento, o surfactante confere forte carga negativa, que ajuda a diminuir consideravelmente a tensão superficial da água circundante e eleva acentuadamente a fluidez do sistema (Mehta & Monteiro, 2014).

O estudo de Cartuxo, et al. (2015) mostra que o uso de superplastificantes leva a uma maior dispersão das partículas de cimento e uma hidratação mais eficaz e rápida. O fator dispersão também é enfatizado por Diamond (2006), evidenciando então, a maior formação de produtos de hidratação ao longo da matriz, visto que,

quão melhor for a dispersão, melhor será a distribuição dos grãos de cimento ao longo da mesma.

O estudo de Shi, et al. (2016) tem como resultados a nucleação da etringita e o crescimento de cristais com diferentes superplastificantes. Ao adicionar aditivo ao concreto, nota-se melhoram nucleação da etringita, de modo que grande número de cristais são formados, e cada indivíduo tem menos nutrientes (água) para crescer. Os superplastificantes podem aderir a determinadas faces dos cristais formados, limitando o crescimento do mesmo em diferentes direções.

Já no estudo de Shi, et al. (2016) o autor deixa claro que o superplastificante de policarboxilato diminui a formação de  $\text{CaCO}_3$ , além de gerar uma aglomeração em volta do CH, com isso, a morfologia do CH é alterada e contribui diretamente para a redução dos vazios.

Como resultado, Huang, et al. (2016) afirma que ao utilizar aditivo superplastificante tem-se um maior grau de hidratação do cimento no concreto. Portanto, mais produtos de hidratação (em particular maior densidade de (C – S – H) e menor porosidade foram detectados em concretos aditivados.

## Capítulo 3 – Materiais e Métodos

Para realização do presente estudo foram utilizadas duas escórias de aciaria, LD e EAF, ambas provenientes de unidades siderúrgicas do estado de Minas Gerais e São Paulo, respectivamente. Para fins de comparação, concretos convencionais foram produzidos. As dosagens para os concretos foram construídas segundo modelos aditivados e não aditivados, como aglomerante foi utilizado cimento CP V – RS.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para os modelos experimentais propostos, utilizou-se cimento Portland CP V - ARI RS. O material foi recebido no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFOP em containers de papelão com volume aproximado de 20 litros. Após recebimento, o material foi acondicionado em embalagens plásticas hermeticamente fechadas.

A caracterização do cimento é apresentada na Tabela 2. Toda caracterização foi disponibilizada pela empresa Cimentos Nacional, que cordialmente forneceu o cimento utilizado na presente pesquisa.

**Tabela 2: Caracterização do cimento.**

<b>Ensaio</b>	<b>Valor</b>
Resíduo Insolúvel	1,00 %
Perda ao fogo	3,93 %
Índice de finura	0,10 %
Resíduo na peneira #325	1,00 %
Água de consistência normal	29,50 %
Expansibilidade à quente	0,00 mm
Área Específica (Blaine)	4,64 cm <sup>2</sup> /g
Massa Específica	3,01 g/cm <sup>3</sup>
Tempos de pega	(167 – 226) min
Resistência a compressão (1, 3, 7 e 28)	(24,1 – 37,5 – 46,3 – 55,2) MPa

**Fonte: Cimentos Nacional.**

O CP V-ARI RS possui alta resistência inicial, o que o faz ter um desempenho superior aos cimentos comuns para as primeiras idades. Possui maior durabilidade e resistência a sulfatos em ambientes agressivos (obras de saneamento, esgotos e ambientes marinhos), além de apresentar o tempo de pega igual ao CP II E40 e proporcionar uma desforma rápida para agilizar as grandes obras.

Para determinação dos parâmetros de interesse, os agregados utilizados para a produção das matrizes de cimento Portland foram obtidos de amostras de escórias de aciaria geradas pela siderurgia no Brasil. O material utilizado foi recebido no Laboratório de Materiais de Construção Civil – UFOP, com granulometria na faixa (4,75 – 12,5) mm, e mantido em pátio descoberto por 36 meses, exposto às intempéries durante esse período.

O material recebido passou pelo processo de separação magnética utilizando rolo (HF CC, Inbrás®), para retirada da fração magnética, e submetido ao processo de separação gravimétrica, afim de obter a curva granulométrica de Brita Zero (4,75 – 12,5) mm, estipulada pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Os agregados miúdos utilizados para produção das matrizes resultam do processo de cominuição das escórias em britador de mandíbulas (BB 200, Retsch®), afim de se obter um material com granulometria inferior 4,8 mm. A seguir, o material foi submetido a processo de separação magnética utilizando rolo magnético (HF CC, Inbrás®) para a retirada da fração magnética presente no material processado. Finalmente o material passou pelo processo de segregação gravimétrica por peneiramento, os materiais obtidos estão em conformidade com limites indicados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Os agregados utilizados nos concretos convencionais (areia de rio e Brita de gnaisse), também estão de acordo com as curvas granulométricas recomendadas pela NBR 7211.

O modelo experimental proposto contempla tratamentos com aditivos superplastificantes (MC – POWERFLOW 1180, MC – Bauchemie®), e modelos sem aditivos, tanto para concretos produzidos integralmente com escória de aciaria, como para aqueles produzidos com agregados naturais. O aditivo utilizado é de 3ª geração, e foi selecionado visando redução do consumo de água, melhor estabilidade e trabalhabilidade da mistura, visto que, a escória de aciaria possui elevada massa específica, o que pode acarretar segregação.

A caracterização química da escória utilizada foi realizada por Espectrometria de Fluorescência e Difração de Raio-X. A preparação dos materiais para a realização da análise química consistiu em cominuição em moinho de esferas por 3 horas (MA 500, Marconi®) seguida de moagem de alta energia (PM100®, Retsch) para obtenção de um material com partículas inferiores a 0,15mm.

### **3.1 Projeto das misturas de concreto**

As misturas foram projetadas de acordo como método ABCP - Software Especialista para Dosagens de Misturas Cimentícias, Soares (2009). O método escolhido, se justifica pelo fato de considerar todas as especificidades dos

agregados, visto que, a escória não é um agregado considerado convencional. Foram consideradas 3 classes de resistência à compressão aos 28 dias de idade, sendo elas: C<sub>15</sub> (15 MPa); C<sub>25</sub> (25 MPa) e C<sub>35</sub> (35 MPa). A consistência foi determinada pelo abatimento de tronco de cone conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998), e fixada em 80 ± 10 mm para todos os traços mostrados na Tabela 3.

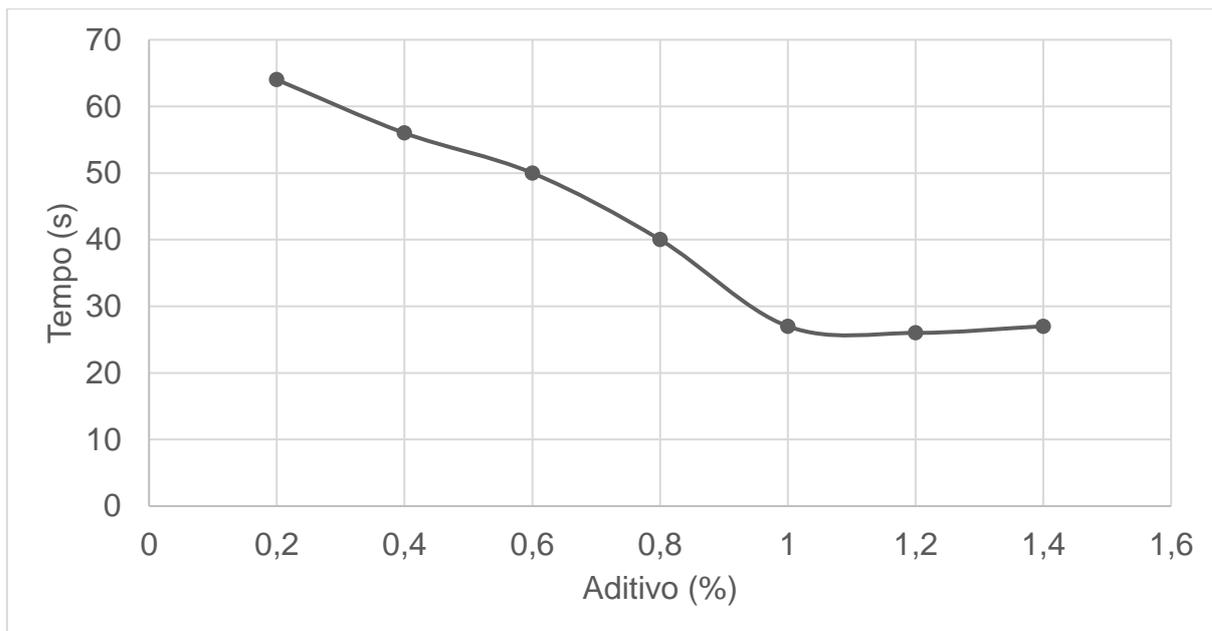
**Tabela 3: Traços utilizados.**

Material	Cimento	Areia	Brita	Água
<b>EAF15</b>	1	2,6	3,5	0,64
<b>EAF25</b>	1	2,02	2,9	0,48
<b>EAF35</b>	1	1,46	2,31	0,44
<b>EAF15 - A</b>	1	5,62	4,75	0,64
<b>EAF25 - A</b>	1	3,33	2,9	0,48
<b>EAF35 - A</b>	1	3,11	2,81	0,44
<b>BOFS15</b>	1	2,63	3,45	0,64
<b>BOFS25</b>	1	2,02	2,9	0,48
<b>BOFS35</b>	1	1,24	2,08	0,44
<b>BOFS15 - A</b>	1	4,13	3,36	0,64
<b>BOFS25 - A</b>	1	3,33	2,9	0,48
<b>BOFS35 - A</b>	1	2,27	1,99	0,44
<b>REF15</b>	1	1,69	2,55	0,64
<b>REF25</b>	1	1,17	2,05	0,48
<b>REF35</b>	1	0,84	1,73	0,44
<b>REF15 - A</b>	1	2,84	2,78	0,64
<b>REF25 - A</b>	1	2,48	2,52	0,48
<b>REF35 - A</b>	1	2,34	2,4	0,44

Para cada mistura, foram produzidas matrizes sem aditivos (REF / EAF / BOFS) e com aditivo (REF - A / EAF - A / BOFS - A). A dosagem de aditivos foi determinada de acordo com um método baseado no proposto por Aitcin (2000), que determina o ponto de saturação da mistura de superplastificante (Aitcin, 2000; Daminieli, Kemeid, Aguiar, & John, 2010). O teste consiste na aferição do tempo de escoamento de uma pasta de cimento contendo diferentes porcentagens de aditivos.

Para isso, usou-se um viscosímetro de Copo Ford para realizar o escoamento. Com os pontos (tempo de escoamento x porcentagem de aditivo) foi possível determinar o ponto de saturação do aditivo em 1% através da curva de saturação, conforme apresentado na Figura 3 a seguir:

**Figura 3: Curva de saturação para o aditivo.**



### 3.2 Produção das matrizes

Para análise da resistência a compressão, índice de vazios, absorção de água, massa específica, velocidade de pulso ultrassônico e carbonatação, foram produzidas matrizes REF, REF – A, EAF, EAF – A, BOFS e BOFS – A. Os corpos de prova (CP) cilíndricos de 5 x 10 cm (diâmetro x altura) foram moldados em duas camadas, adensadas em mesa de fluxo com 15 golpes por camada, e intervalo de 1 segundo entre golpes. A cura dos corpos de prova ocorreu em câmara úmida com temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de 95%, conforme prescrito pela NBR 9479 (ABNT, 2006).

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de resistência à compressão NBR 5739 (ABNT, 2007), velocidade de pulso ultrassônico NBR 8802 (ABNT, 2013), massa específica NBR 9778 (ABNT, 2005), índice de vazios NBR 9778 (ABNT, 2005), absorção de água NBR 9778 (ABNT, 2005) e ensaio de carbonatação

acelerada (Ho & Lewis, 1987; Sanjuán, Andrade, & Cheyrezy, 2003). Os ensaios foram realizados após a cura de 28 dias do concreto.

### **3.3 Resistência a compressão**

A resistência à compressão foi determinada como referência para os tratamentos propostos, para idade de 28 dias após cura em câmara úmida. Os corpos-de-prova foram capeados com enxofre e solicitados axialmente em uma prensa servo-controlada DL 20000-EMIC, célula de carga com capacidade de 200 kN e taxa de incremento de tensão de 0,3 MPa/s.

### **3.4 Velocidade de pulso ultrassônico**

A velocidade de pulso ultrassônico foi determinada utilizando-se ultrassom modelo TICO da marca PROCEQ, com pulsos ultrassônicos de 54 kHz. O equipamento emite ondas ultrassônicas nos corpos-de-prova de concreto, sendo que, quanto mais densa for a matriz, maior será a velocidade do pulso e menor o tempo gasto para que o pulso ultrassônico saia de um transdutor e chegue ao outro. Para aferição, os transdutores foram posicionados nas bases (superior e inferior) do corpo de prova.

A base e o topo dos corpos-de-prova com 28 dias de idade, foram polidos e recobertos por uma camada de vaselina para garantir e homogeneizar o contato entre as superfícies e o transdutor.

### **3.5 Durabilidade**

Para a determinação da durabilidade, tendo como parâmetro a norma de desempenho de habitações, NBR 15575 (ABNT, 2013), foram conduzidos ensaios de carbonatação acelerada utilizando-se a câmara de carbonatação - SCO 26H ShelLab®. Os parâmetros utilizados para os ensaios acelerados no presente trabalho, foram adaptados dos trabalhos de Sanjuán et al. (2003) e Ho & Lewis (1987) apresentados na Tabela 4. A adaptação foi realizada para que o tempo do ensaio, enquadrasse no tempo da pesquisa, e aproxima-se à realidade.

**Tabela 4: Parâmetros utilizados no ensaio de carbonatação acelerada.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Umidade relativa	50-60%
Temperatura	25±1 °C
Concentração (CO <sub>2</sub> )	8-10%

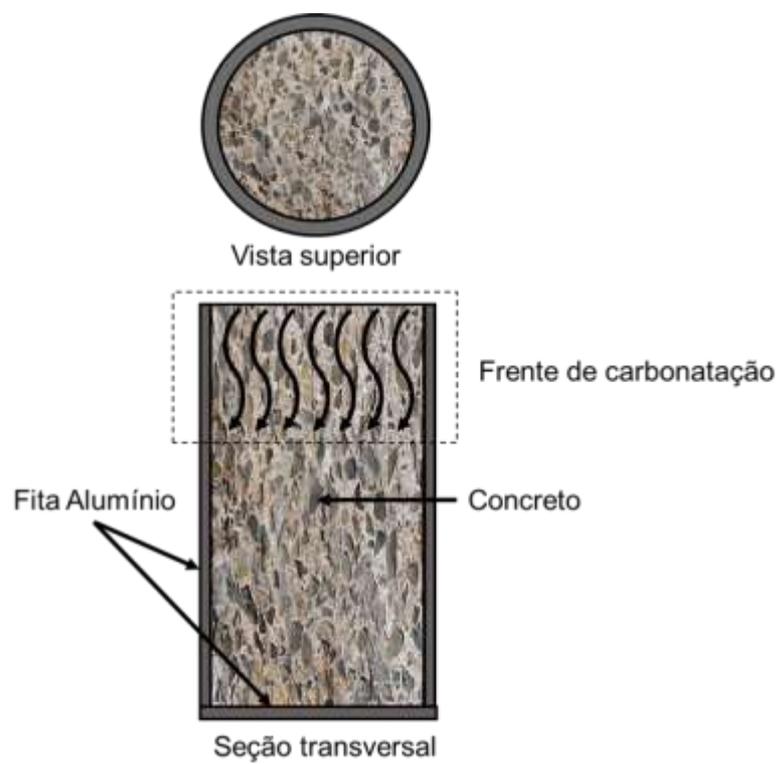
Fonte: (Sanjuán, Andrade, & Cheyrezy, 2003); (Ho & Lewis, 1987), adaptado.

A partir dos valores mostrados na tabela 4, após 160 dias de exposição dos concretos nessas condições, os mesmos passaram por um ataque de CO<sub>2</sub> referente à 50 anos de exposição natural, correspondendo aos 50 anos determinados pela NBR 15575 (ABNT, 2013).

Para a análise da carbonatação os corpos de prova foram recobertos com uma camada de fita “*silver tape*” (constituída de um filme de polietileno na cor prata e trama de tecido com adesivo à base de resina e borracha), ao longo do comprimento. O conjunto CP e fita foram selados externamente com camada adicional de parafina, expondo à atmosfera com CO<sub>2</sub> apenas a face superior, induzindo os processos de carbonatação preferencialmente segundo a geratriz do corpo de prova, considerando o comprimento de 10 cm para frente de carbonatação, conforme padrão Francês XP 18 458. Uma imagem esquemática do modelo de impermeabilização adotado para o corpo de prova é apresentada na Figura 4.

Para determinação da profundidade de carbonatação, será utilizado método colorimétrico, empregando-se solução de fenolftaleína 1% (meio alcoólico), conforme prescrições da norma CPC-18 (RILEM, 1988). Para tal procedimento, o CP é fraturado ao longo do comprimento, visto que o mesmo não pode ser cerrado. Imediatamente após a fratura, fez-se a aspersão da solução de fenolftaleína sobre a superfície, e a partir da tonalidade, rosa quando não houver carbonatação (PH alto) e sem coloração (PH baixo) quando não houve carbonatação.

**Figura 4: Esquema de impermeabilização do CP.**



## Capítulo 4 – Resultados e Discussão

Os concretos produzidos com escória de aciaria apresentam valores de resistência à compressão superiores aos concretos produzidos com agregados convencionais. Os concretos de escória, apresentaram também, menores valores para o índice de vazios e absorção de água, e maior massa específica. No que diz respeito à carbonatação, os concretos produzidos com escória, obtiveram melhores resultados em relação à referência.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Matrizes Cimentícias

As matrizes produzidas com agregados naturais, utilizadas como testemunhos para o programa experimental proposto, foram obtidas com agregados miúdos – areia natural de rio e agregados graúdo – gnaïsse e cimento Portland tipo CPV RS.

Os agregados utilizados nos modelos experimentais produzidos com agregados de escória LD e EAF possuem características diversas daqueles utilizados nas matrizes convencionais. Na Tabela 5 é apresentada a Fluorescência de Raios – X dos agregados utilizados.

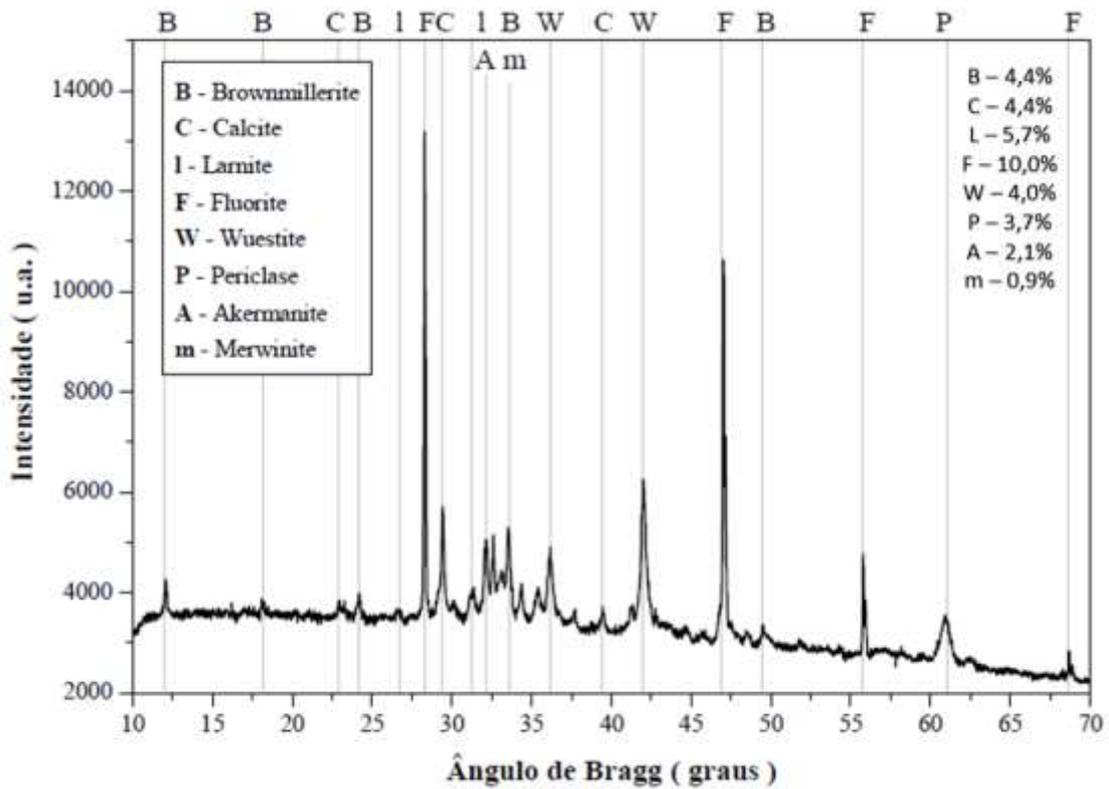
**Tabela 5: Fluorescência de Raio – X dos agregados.**

Composto	Areia de Rio	Brita (Gnaïsse)	BOF	EAF
SiO <sub>2</sub>	59,6%	69,3	14,6 %	19,0 %
CaO	0,5%	2,6	36,8 %	27,4 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,7%	1,6%	32,2 %	33,5 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,4%	1,6 %	1,1 %
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0,7 %	1,3 %
MnO	0,1%	-	3,7 %	4,0 %
MgO	-	0,7%	5,5 %	5,6 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,3%	15,9%	3,7 %	6,5 %
SO <sub>3</sub>	1%	-	0,3 %	0,3 %
TiO <sub>2</sub>	1,2%	0,3%	0,5 %	0,8 %
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	0,1 %	0,1 %
K <sub>2</sub> O	1,7%	2,8%	-	-

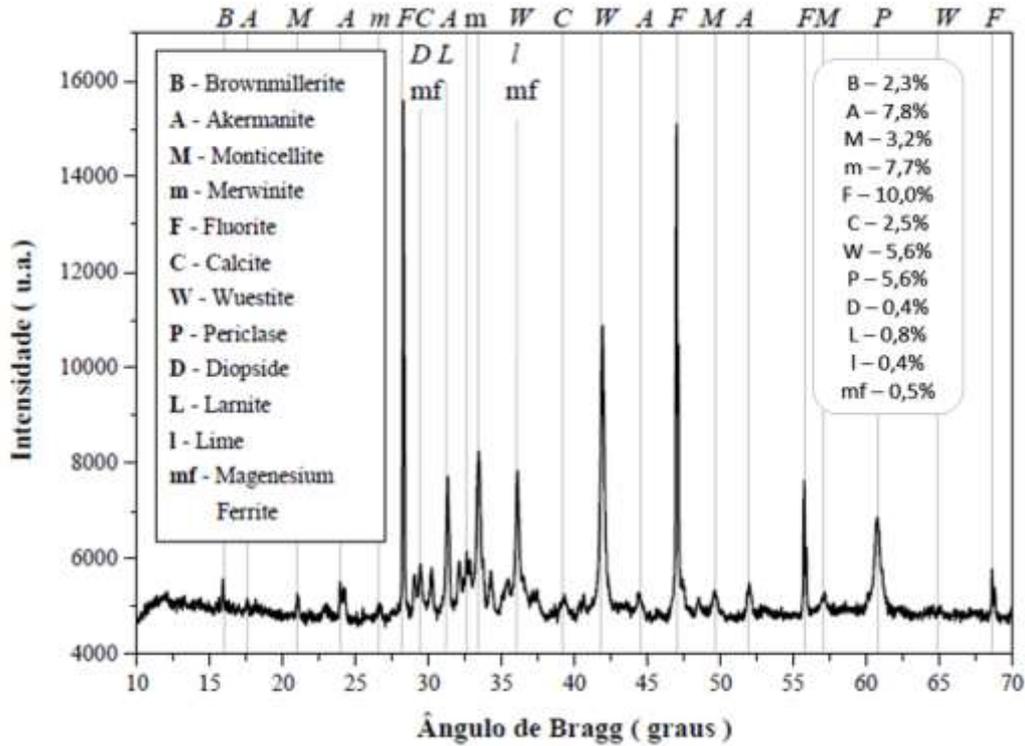
Os resultados obtidos da FRX indicam valores para a escória BOF de 14% de sílica enquanto a escória FEA apresenta 19%, sendo 35% superior à escória BOF. A presença de óxido de cálcio (CaO) encontrado é um fator que requer atenção, visto que se trata de um agente deletério, uma vez que, se hidratado, é expansivo e pode levar a problemas de durabilidade no concreto. Pode-se observar que, a escória LD

apresenta um percentual 20% maior que a escória FEA, quando se analisa a proporção de CaO contido nas amostras. No entanto ao analisar os resultados encontrados nas difrações de raio – x, percebe-se que a amostra analisada não apresenta cálcio livre Figura 5 e Figura 6, o que é coerente com a condição da escória que foi intemperizada por 3 anos. Para realização da difração foi utilizado Fluorita, e o pico pode ser observado nos resultados.

**Figura 5: Difração escória BOF.**



**Figura 6: Difração escória EAF.**

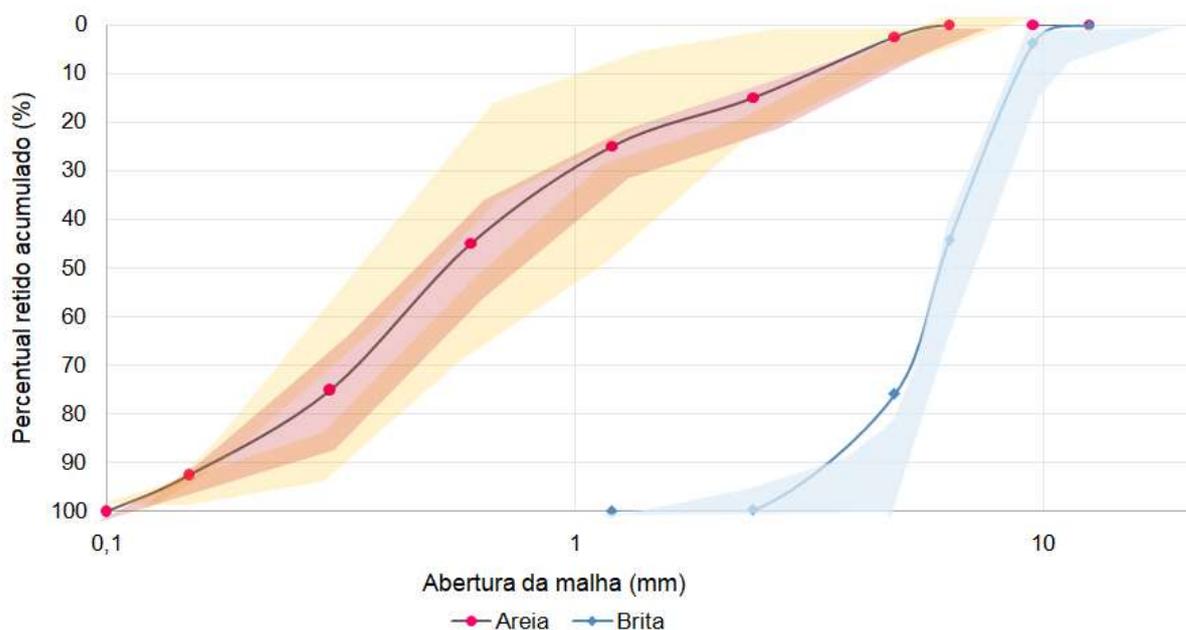


O fator mais importante a ser observado nas escórias de aciaria é a presença das ligas metálicas compostas de ferro (FeO) presente nas escórias não processadas. Essas ligas, são muito suscetíveis a oxidação, estão dispersas por todo o material, possuem grande potencial de expansão e geram tensões de magnitude suficiente para promover efetiva degradação da matriz de cimento Portland (Silva, et al., 2011).

O pós-processamento e a recuperação dos materiais magnéticos procedido para essas escórias reduziram o teor destes materiais em 28,75%. Dessa forma, o processo de separação magnética se mostra eficiente, diminuindo a proporção de ligas metálicas que poderiam apresentar condições deletérias ao concreto.

Os agregados obtidos a partir das escórias foram enquadrados na segunda zona ótima (Figura 7), para granulometria de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009). O agregado miúdo apresenta diâmetro máximo característico de 4,8 mm e módulo de finura 3,55. Quanto ao agregado graúdo, o mesmo apresenta diâmetro máximo característico de 9,5 mm e módulo de finura 5,71.

**Figura 7: Distribuição granulométrica dos agregados.**



Quanto aos resultados de massa específica dos agregados miúdos, os resultados para BOF, EAF e AR foram 3,52; 3,76 e 2,6 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Na mesma sequência para os agregados graúdos foram 3,32; 3,48 e 2,61 g/cm<sup>3</sup>. A diferença nos valores de massa específica, é justificada pela composição química dos materiais, onde, a escória apresentam cerca de 30% de ferro. Ainda se percebe que a escória EAF possui 4,5% a mais de FeO do que a BOF. A diferença entre os valores de massa específica é de mesma ordem.

A relação água/cimento foi fixada segundo a classe de resistência, sendo de 0,64; 0,48; 0,44 para matrizes C<sub>15</sub>, C<sub>25</sub> e C<sub>35</sub>, respectivamente. O objetivo de fixar o fator a/c foi para avaliar o efeito do uso de aditivo na dosagem da matriz.

Os teores de água e cimento foram adotadas, afim de que se produzissem matrizes com características reológicas semelhantes, relativamente a consistência e trabalhabilidade, controladas pelo abatimento das matrizes (SLUMP test – NBR NM 67) definido em 80mm (±10mm). As estratégias propostas para produção de matrizes com a mesma trabalhabilidade buscaram produzir resultados em que se identificassem as propriedades dos materiais.

## **4.2 Caracterização Física do Concreto no Estado Endurecido**

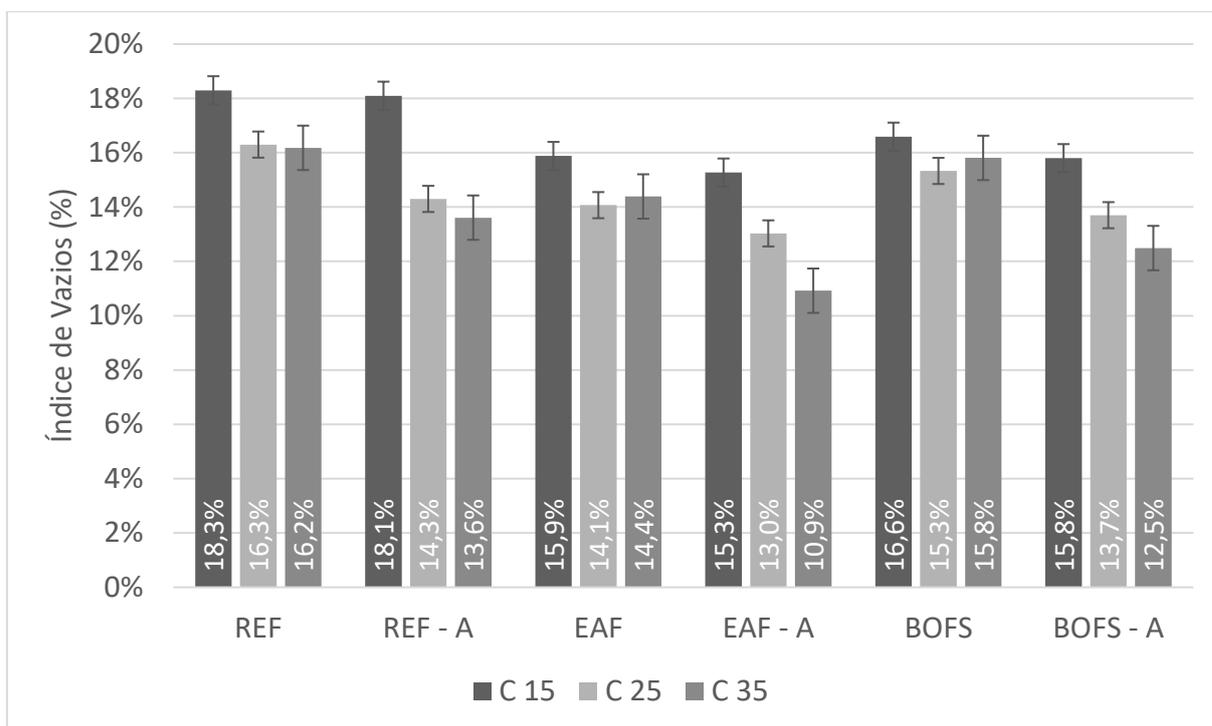
### **4.2.1 Índice de Vazios, Absorção de Água e Velocidade de Pulso Ultrassônico**

Os resultados obtidos para índice de vazios dos concretos produzidos com agregados convencionais apresentaram maiores valores, quando comparados com os concretos produzidos com escória de aciaria, (Figura 8).

Ao analisar os resultados apresentados, percebe-se uma redução do índice de vazios de 1,09%, 12,26% e 16,04%, para os concretos de referência não aditivados C<sub>15</sub>, C<sub>25</sub> e C<sub>35</sub> respectivamente, em relação aos aditivados. Os concretos produzidos com escória EAF, apresentam reduções de 3,77% para o concreto C<sub>15</sub>, 7,08% para C<sub>25</sub> e 24,30% para C<sub>35</sub>. Os traços compostos por BOF mostram de redução de 4,8%, 10,45% e 20,8% para os concretos C<sub>15</sub>, C<sub>25</sub> e C<sub>35</sub> respectivamente. Comparando os concretos entre tratamentos, percebe-se que os concretos de escória apresentaram menores porcentagens em todas as classes de resistência estudadas.

Percebe-se uma relação no aumento da porcentagem de redução do índice de vazios, conforme a classe de resistência do concreto aumenta. Isso está relacionado ao maior consumo de cimento em concretos de maior resistência à compressão. Apesar dos concretos aditivados terem menor quantidade de cimento, o mesmo se mostra mais eficiente na geração de produtos de hidratação, devido ao efeito nucleador do aditivo superplastificante utilizado (Cartuxo, Brito, Evangelista, Jiménez, & Ledesma, 2015; Shi, He, Zhang, Wang, & Hu, 2016; Huang, et al., 2016).

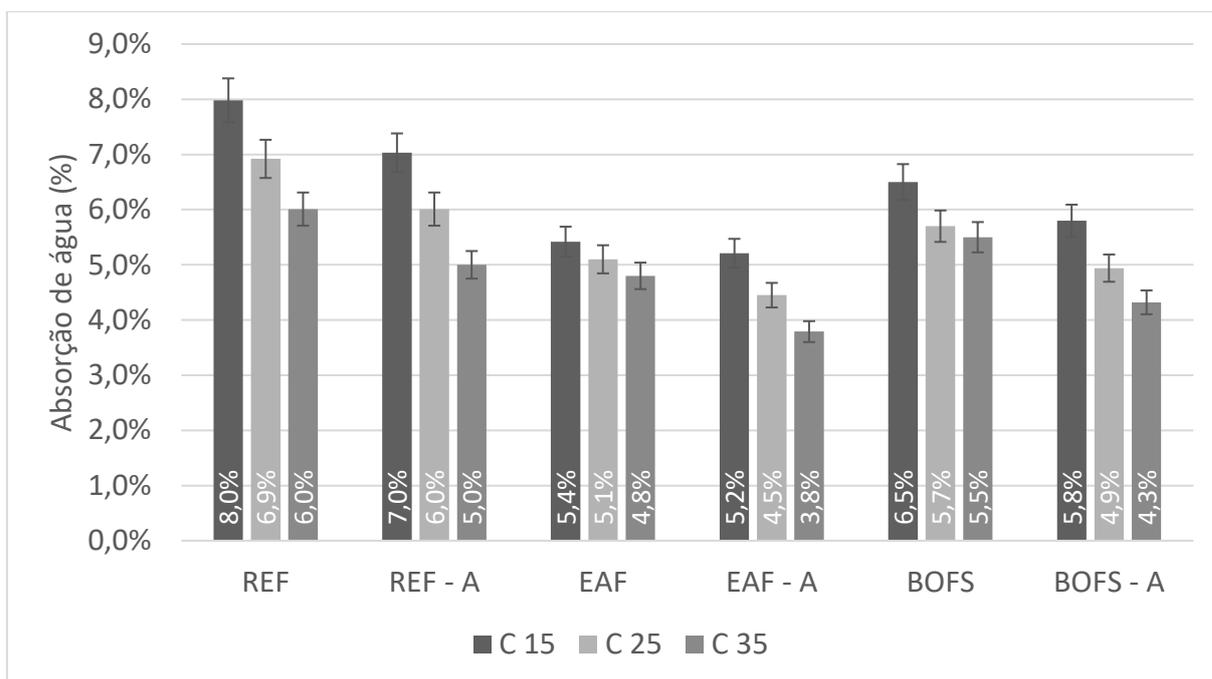
**Figura 8: Índice de Vazios dos Concretos.**



Os resultados obtidos para absorção de água apresentado na Figura 9, mostram uma redução de 12,5%, 13% e 16% para os concretos de referência aditivados C<sub>15</sub>, C<sub>25</sub> e C<sub>35</sub> respectivamente, quando comparados aos concretos sem aditivo, enquanto os concretos EAF atingiram 3,7%, 11,7% e 20,8% respectivamente. Os concretos BOF por sua vez, apresentam valores de 10,7%, 14% e 21,8% para os concretos C<sub>15</sub>, C<sub>25</sub> e C<sub>35</sub>.

Bravo et. al. (2017) avaliou a absorção de água de concretos produzidos com agregados reciclados da construção civil. Em seu estudo ele adota classe de resistência C<sub>30</sub>, 1% de aditivo, chegando a um percentual de 25% de redução nesse parâmetro para concretos produzidos com substituição total dos agregados.

**Figura 9: Absorção de água dos concretos.**

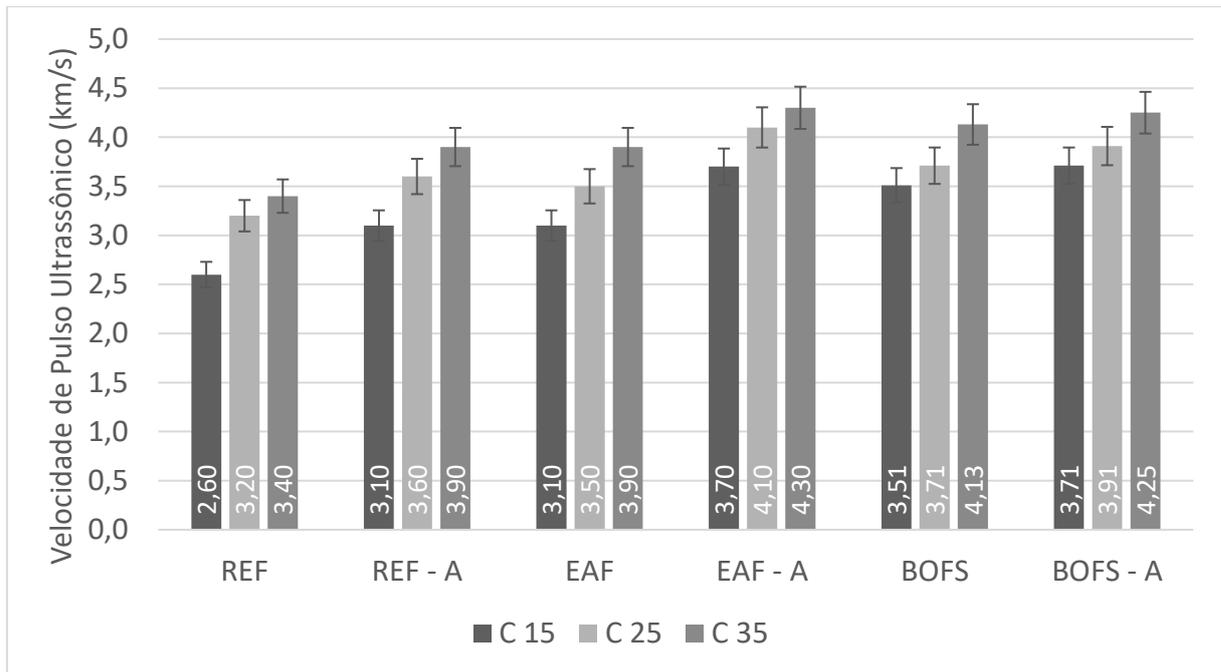


Os resultados obtidos para velocidade de pulso ultrassônico (VPU) são mostrados na Figura 10. De acordo com Mehta & Monteiro (2014) e Mendes, et al. (2017) a porosidade e a forma com o que os vazios estão conectados, afetam diretamente o valor da velocidade de pulso ultrassônico. O valor desse parâmetro, obtido por meio da velocidade de ondas ultrassônicas, decai com o aumento de vazios presentes na matriz.

Ao comparar os resultados de VPU dos concretos aditivados com os concretos não aditivados, percebe-se que os concretos aditivados mostram um aumento de 10,2%, 17,1% e 19,3% para os concretos de referência C<sub>15</sub>, C<sub>25</sub> e C<sub>35</sub> respectivamente, enquanto os concretos EAF atingiram 14,7%, 12,5% e 19,2% de aumento. Os concretos BOF por sua vez, apresentaram aumento dos valores de 4,9%, 5,4% e 5,7% para os concretos C<sub>15</sub>, C<sub>25</sub> e C<sub>35</sub>.

Analisando as percentagens entre os concretos aditivados e não aditivados, o efeito da utilização do aditivo superplastificante fica evidenciado. O aumento das percentagens nos concretos aditivados, implica em uma maior compacidade das matrizes produzidas, como notado nos resultados de caracterização física, anteriormente apresentados.

**Figura 10: Velocidade de Pulso Ultrassônico.**



Saxena & Tembhurkar (2018), investigaram o impacto nas propriedades frescas e endurecidas do concreto quando o agregado graúdo natural é substituído em proporções de 15% a 100% por agregado de escória de aciaria. Verificaram que a substituição do agregado de basalto por agregado de escória indica melhoria na resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade do concreto em 33%, 9,8% e 22% aos 28 dias respectivamente. Na análise de velocidade de pulso ultrassônico, para o concreto com 100% de substituição, a VPU aumentou 5,2% aos 28 dias (Saxena & Tembhurkar, 2018).

De acordo com Pang, Zhou, & Xu (2015), à medida que aumenta o percentual de substituição dos agregados por escória, percebe-se também o aumento da velocidade de pulso ultrassônico dos concretos produzidos. Saxena & Tembhurkar (2018), propõe uma faixa de classificação da qualidade do concreto relacionado à UPV. De acordo com essa escala, todos concretos de escória de aciaria são classificados como concretos de boa qualidade ( $UPV \geq 3,5$  km/s), e os de referência como concretos de média qualidade ( $UPV \leq 3,5$  km/s).

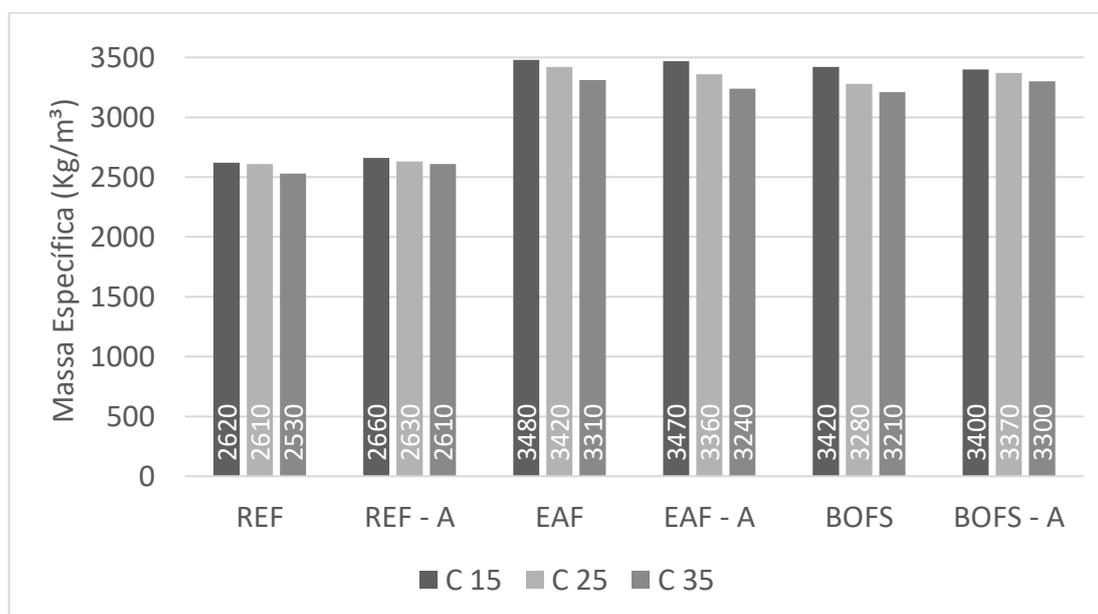
### 4.3 Massa Específica

Os resultados obtidos para massa específica são apresentados na Figura 11, onde todos os concretos produzidos com escória de aciaria apresentam valores de massa específica superiores aos concretos de referência. Esses dados vão de encontro com os resultados encontrados nos ensaios de massa específica dos agregados utilizados conforme apresentados anteriormente.

Santamaría, Orbe, San José, & González (2018), fizeram um estudo sobre a durabilidade do concreto estrutural incorporando escória de aciaria em diferentes proporções e granulometrias, e dentro de suas considerações, mostram que a massa específica dos concretos de escória aumentou de 10 a 15% em relação aos concretos produzidos com agregados convencionais.

Os concretos de escória são classificados como concretos pesados, e os concretos produzidos com agregados convencionais se enquadram na faixa de concretos normais (ABNT, 2015). Os valores de massa específica variando de 2000 a 2800 kg/m<sup>3</sup> caracterizam os concretos como normais, concretos leves apresentam massa específica abaixo de 2000 kg/m<sup>3</sup>, e os concretos pesados apresentam massa específica maior que 2800 kg/m<sup>3</sup>. (Mehta & Monteiro, 2014; Han-Seung & Wang, 2016; Freitas, 2012; Natalli, 2017; ABNT, 2015).

**Figura 11: Massa específica dos concretos não aditivados.**



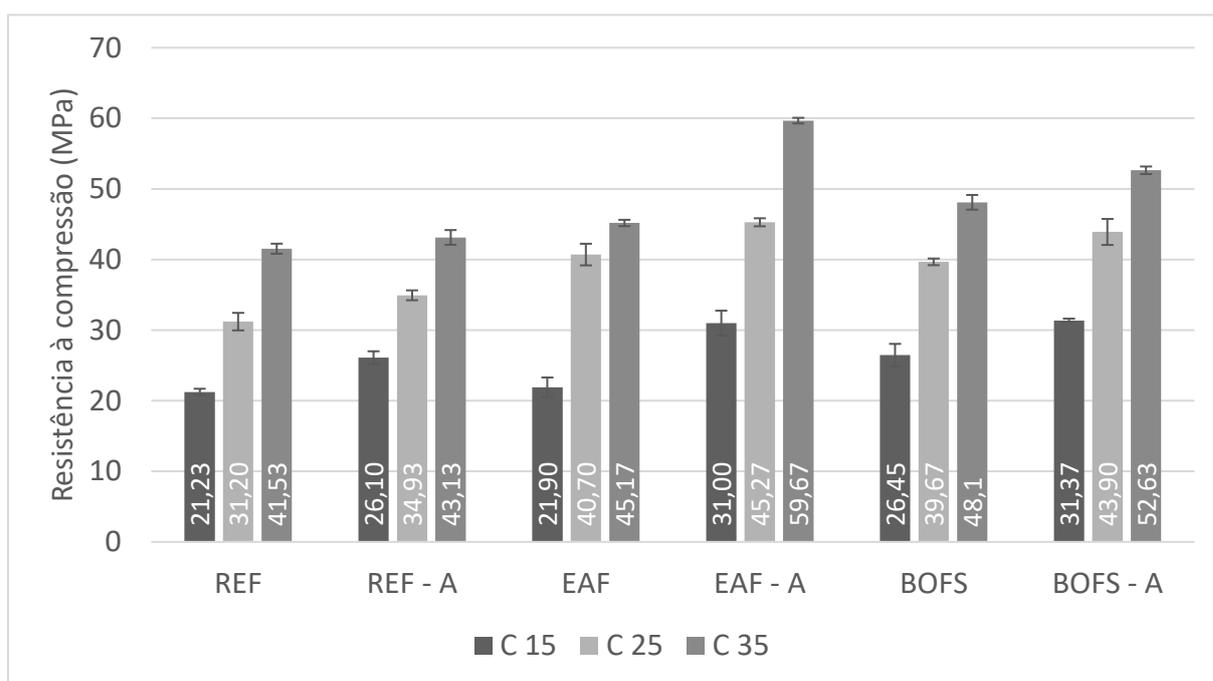
#### 4.4 Resistência à compressão

Os resultados obtidos para resistência a compressão são observados na Figura 12, onde se percebe, que todos os concretos ganharam resistência ao utilizar aditivo superplastificante, e os concretos produzidos com agregados de escória de aciaria, apresentaram melhor desempenho mecânico, em relação aos concretos que foram produzidos com agregados convencionais.

Ao comparar os resultados dos concretos aditivados e não aditivados, percebe-se que os concretos aditivados mostram um aumento de 22,9%, 12% e 3,8% para os concretos de referência C<sub>15</sub>, C<sub>25</sub> e C<sub>35</sub> respectivamente, enquanto os concretos EAF atingiram 41,6%, 11,2% e 32,1% na mesma ordem de classe de resistência. Os concretos BOF por sua vez, apresentaram aumento dos valores de 18,6%, 10,6% e 9,4% para os concretos C<sub>15</sub>, C<sub>25</sub> e C<sub>35</sub>.

Os valores encontrados para os concretos de escória, estão em concordância, com os resultados anteriormente apresentados, onde, esses concretos, apresentaram menores valores de índice de vazios, menor valor de absorção de água e maior massa específica.

**Figura 12: Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias.**



Concretos produzidos com escória de aciaria apresentam resultados para resistência à compressão melhores quando comparados aos concretos produzidos com agregados convencionais (Rondi, et al., 2015) (Zhang, Yu, Wei, & Li, 2011). Em seu estudo, Monosi, Ruello, & Sani (2015) encontrou melhora de 66% para resistência a compressão concretos com substituição de agregado natural por agregado de escória de aciaria.

Os concretos aditivados apresentaram valores de resistência à compressão superiores aos valores encontrados para os não aditivados. Ao utilizar o aditivo superplastificante, reduziu-se a quantidade de cimento e água, para que o fator água/cimento, fosse mantido. Mesmo com a redução da quantidade de cimento nos concretos produzidos com a adição de aditivo superplastificante, os mesmos apresentaram resultados de resistência à compressão aos 28 dias superiores. Isso ocorre devido a melhor dispersão das partículas de cimento na matriz, quando aditivada, acarretando em maior formação de produtos de hidratação ao longo da mesma (Diamond, 2006; Cartuxo, Brito, Evangelista, Jiménez, & Ledesma, 2015).

Quando comparados aos concretos aditivados, nota-se a queda nos valores do consumo de cimento. Os concretos de referência apresentaram redução de 16%, 24% e 32% para os concretos de 15, 25 e 35 MPa respectivamente. A redução dos concretos produzidos com agregados de escória EAF foi de 30%, 13% e 24%. Não diferente, os concretos produzidos com escória BOFS, apresentaram redução de 12%, 14% e 13% para os concretos de 15, 25 e 35 MPa respectivamente.

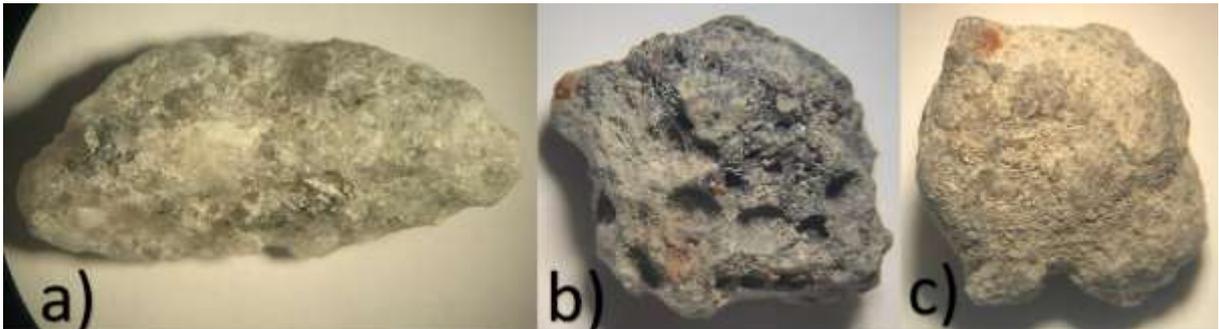
O bom desempenho dos concretos de escória se deve em parte à ação cimentante do material, indicada pelo considerável teor de CaO. No entanto, a ação cimentante esperada é mais lenta e os resultados são melhores a longo prazo (Diniz, Carvalho, Mendes, & Peixoto, 2017). No estudo de Qiang, Peiyu, Jianwei, & Bo (2013), foi observado o aumento de 87,5% da resistência a compressão dos concretos com substituição parcial de 45% de escória quando se compara a resistência aos 10 dias e 100 dias. Para os de referência, o aumento foi apenas de 50%, evidenciando a ação cimentante da escória.

Os estudos de Pang, Zhou, & Xu, (2015) e Özbay, Erdemir, & Ibrahim Durmus, (2016) também relatam aumento de resistência em concretos produzidos com escória na faixa de 15% a 44% a medida em que se aumenta a porcentagem de substituição do agregado convencional por escória e a idade do mesmo.

Outro fator que contribui diretamente para o ganho de resistência a compressão dos concretos de escória, é a forma dos agregados. O agregado com formato cúbico melhora a interação com a matriz cimentícia. Além disso, a resistência do agregado de escória de aciaria é maior do que o convencional (Pang, Zhou, & Xu, 2015). A Figura 13 mostra a forma dos agregados utilizados.

**Figura 13: Forma dos agregados graúdos.**

a) Gnaiss b) EAF c) BOFS



#### 4.5 Zona de Transição Interface (ZTI)

A boa distribuição dos agregados ao longo da matriz é um fator que contribui para a melhora da resistência do concreto (Felice, Freeman, & Ley, 2014). Com isso, ao observar a seção de um corpo de prova de concreto de escória, Figura 14, percebe-se boa distribuição dos agregados. Apesar dos agregados de escória possuírem valores maiores de massa específica, não houve segregação do agregado graúdo, garantindo uniformidade da matriz.

A imagem gerada, mostra que o método de adensamento utilizado no trabalho foi eficaz, e que os parâmetros adotados para o concreto (fator a/c, teor de argamassa, trabalhabilidade, etc.), estão em concordância, resultando em uma boa distribuição dos agregados, baixa quantidade de vazios. Sabe-se que a escória de aciaria é muito porosa e com isso, pode ser observado alguns vazios no agregado graúdo.

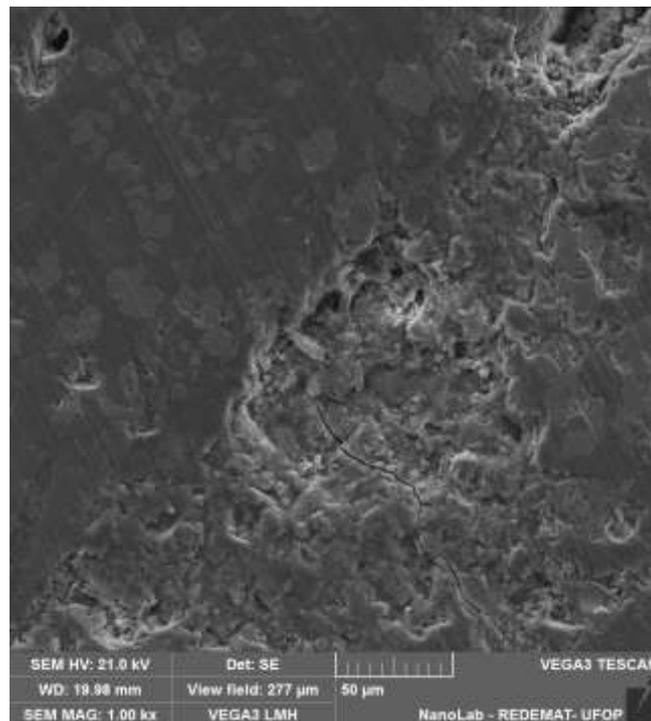
**Figura 14: Seção Transversal do Corpo de Prova de Concreto de Escória.**



Imagens de MEV foram geradas para avaliação da Zona de Transição Interface (ZTI) dos agregados com a argamassa, afim de também contribuir no entendimento dos resultados.

Ao analisar a Figura 15, é perceptível a boa interação entre o agregado de escória e a argamassa. A ZTI se apresenta íntegra e sem rupturas, o que contribui diretamente com a resistência à compressão do concreto. Os concretos de escória de aciaria não apresentam ruptura na ZTI, a mesma ocorre na argamassa, de forma perpendicular ao agregado (Brand & Roesler, 2018).

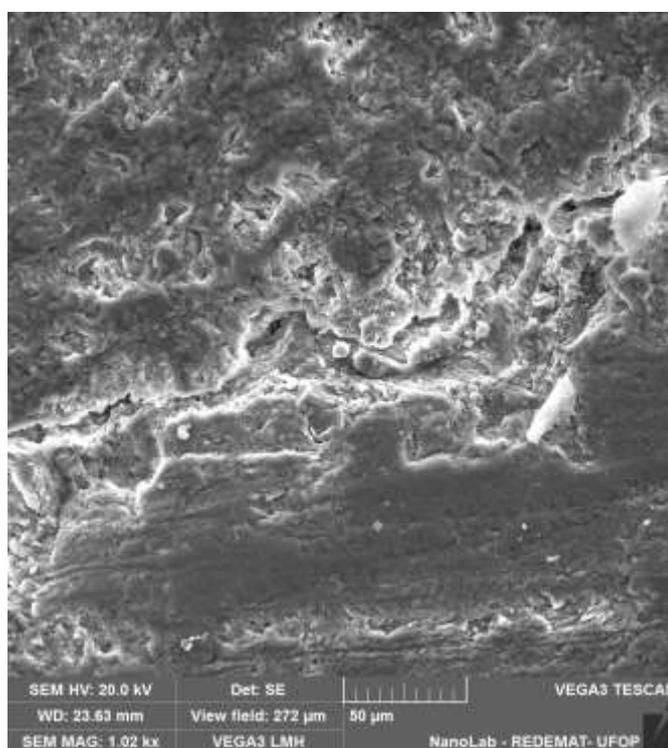
**Figura 15: ZTI do concreto de escória.**



A Figura 16, apresenta a imagem da ZTI do concreto produzido com agregados convencionais. É possível observar pela imagem de MEV que a ZTI do concreto de referência não se apresenta tão íntegra quanto a ZTI dos concretos de escória. Fica evidenciado na imagem uma linha de ruptura entre o agregado e a argamassa, o que contribui para um menor valor de resistência à compressão.

Em sua pesquisa, Pang, Zhou, & Xu (2015) analisando imagens de MEV para ZTI, afirma que os poros e vazios de ar do concreto foram reduzidos usando escória, e a matriz era mais compacta que as demais.

**Figura 16: ZTI do concreto de referência.**



#### **4.6 Carbonatação**

Os resultados de carbonatação obtidos para os concretos produzidos com escória de aciaria foram melhores quando comparados aos concretos fabricados com agregados convencionais, mostrados na Tabela 6. Qiang, Peiyu, Jianwei, & Bo (2013) apontam em seu estudo, que concretos com substituição parcial (até 45%) de agregado natural por escória de aciaria, com 3 ou mais dias cura, apresentam boa resistência à carbonatação.

**Tabela 6: Carbonatação.**

<b>Classe de Resistência</b>	<b>REF</b>	<b>EAF</b>	<b>BOF</b>
<b>C<sub>15</sub></b>	40,5 mm	12,5 mm	13,3 mm
<b>C<sub>15</sub> ADT</b>	36,0 mm	6 mm	9,5 mm
<b>C<sub>25</sub></b>	27,0 mm	11,0 mm	10,0 mm
<b>C<sub>25</sub> ADT</b>	23,5 mm	4,8 mm	9,0 mm
<b>C<sub>35</sub></b>	25,0 mm	7,8 mm	8,5 mm
<b>C<sub>35</sub> ADT</b>	21,0 mm	3,8 mm	8,0 mm

No entanto não existe um consenso na literatura quanto a eficácia de escória de aciaria na redução à carbonatação. Santamaría A. , et. all (2018) expôs corpos de prova de concreto convencional e fabricados com agregados de escória à ambientes agressivos. Ambos tiveram resultados similares quando aplicados ao indicador de fenolftaleína, não indicando vantagens ao se utilizar a escória de aciaria (Santamaría A. , Orbe, San José, & González, 2018).

Por outro lado, para substituição total dos agregados (conforme presente trabalho) os resultados foram favoráveis. Qiang, Peiyu, Jianwei, & Bo (2013) mostra em seu trabalho que a profundidade de carbonatação em concretos com substituição parcial diminui à medida em que o tempo de cura aumenta, onde, a carbonatação de concretos com 28 dias de cura, apresentam resultados com 66% menos carbonatação quando comparados com concretos curados por 3 dias.

Ao comparar os resultados dos concretos aditivados e não aditivados, percebe-se que os concretos aditivados mostram uma redução de 11%, 13% e 16% para os concretos de referência C<sub>15</sub>, C<sub>25</sub> e C<sub>35</sub> respectivamente, enquanto os concretos EAF atingiram 52%, 56,4% e 45,7% na mesma ordem de classe de resistência. Os concretos BOF por sua vez, apresentaram aumento dos valores de 28%, 10% e 5,8% para os concretos C<sub>15</sub>, C<sub>25</sub> e C<sub>35</sub>.

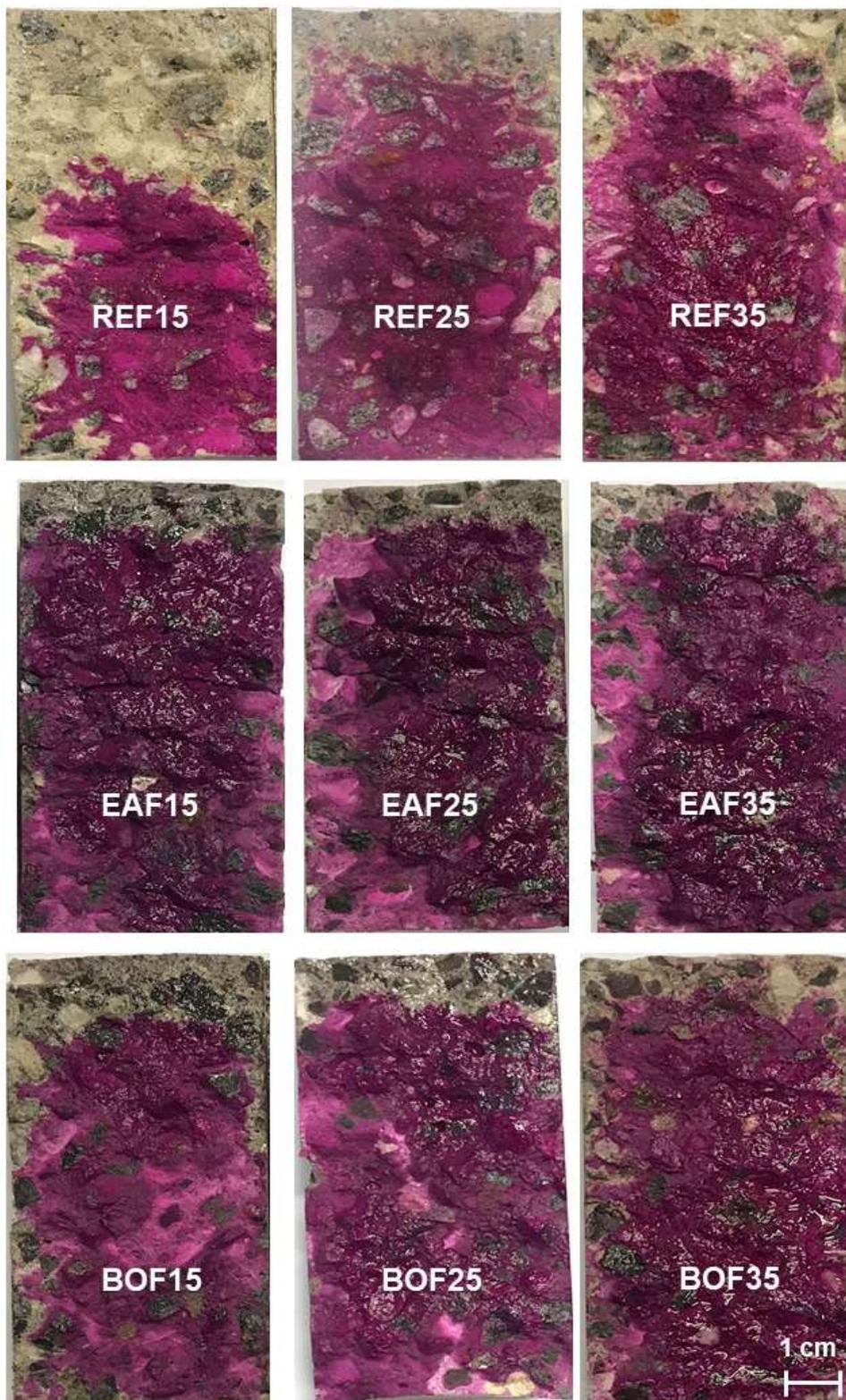
Essa diminuição da profundidade de carbonatação dos concretos aditivados, deve-se a redução da porosidade promovida pela maior formação de produtos de hidratação, decorrente do maior grau de hidratação do cimento (Shi, He, Zhang, Wang, & Hu, 2016). Além disso, o superplastificante de policarboxilato reduz a

formação de  $\text{CaCO}_3$ , que é um precursor da carbonatação (Shi, Zhang, He, & Li, 2016)

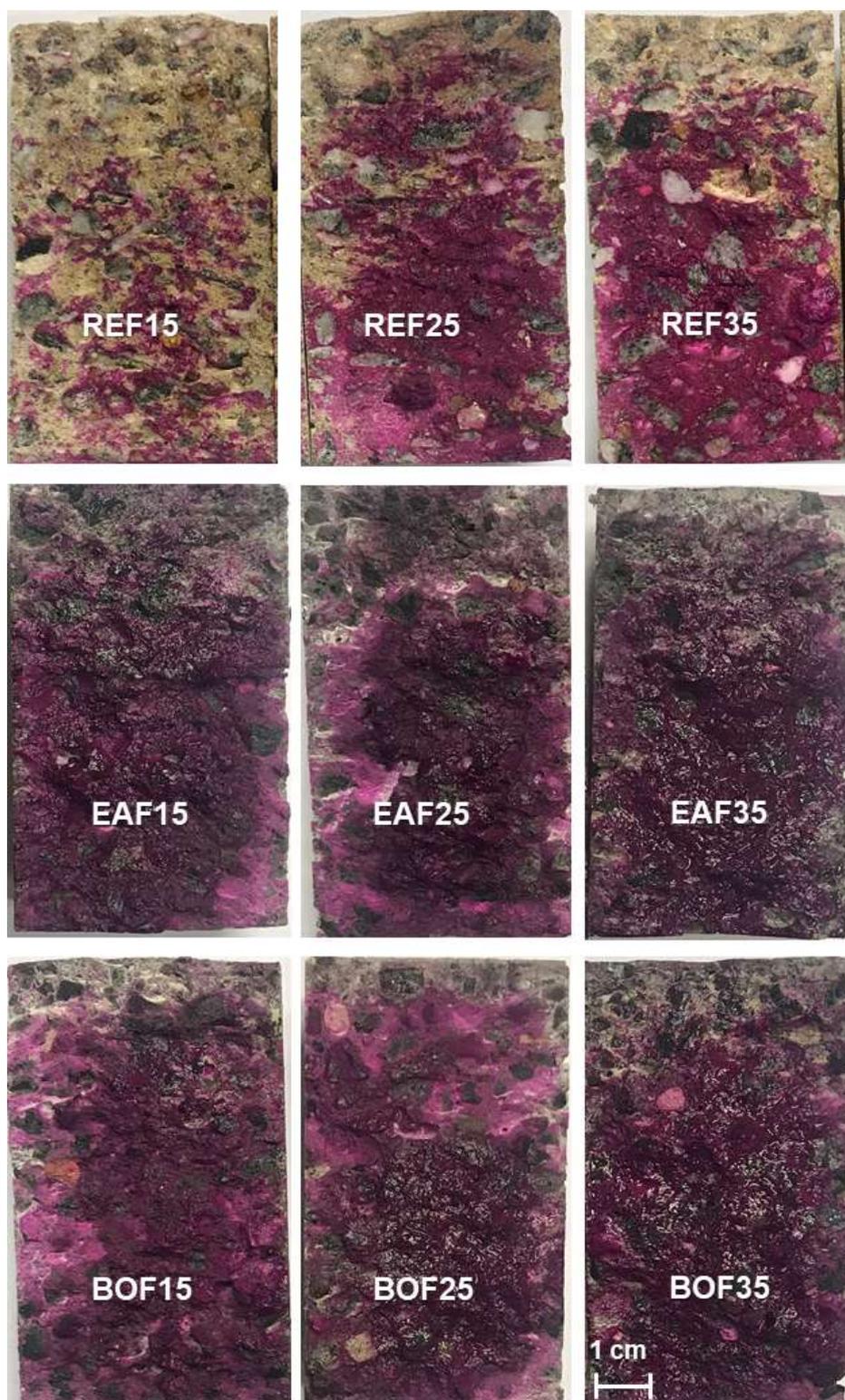
Os melhores resultados de carbonatação para os concretos produzidos com agregados de escória foram os encontrados para a escória EAF aditivado. O concreto C15 aditivado produzido com escória EAF teve uma diferença de 83,3% quando comparado ao concreto C15 convencional. A diferença na carbonatação é mostrada na Figura 17 e Figura 18 a seguir.

Analisando a profundidade de carbonatação dos concretos de referência não aditivados, é notória a redução da profundidade de carbonatação do concreto C15 para o concreto C25 e C35. Essa redução ocorre pela menor quantidade de água nos traços. À medida que aumenta a resistência, diminui o consumo de água, ou seja, o concreto C15 possui a maior quantidade de reagente para a reação de carbonatação e, apresentando o pior resultado nesse parâmetro.

**Figura 17: Traços não aditivados após aspersão de fenolftaleína.**



**Figura 18: Traços aditivados após aspensão de fenolftaleína.**



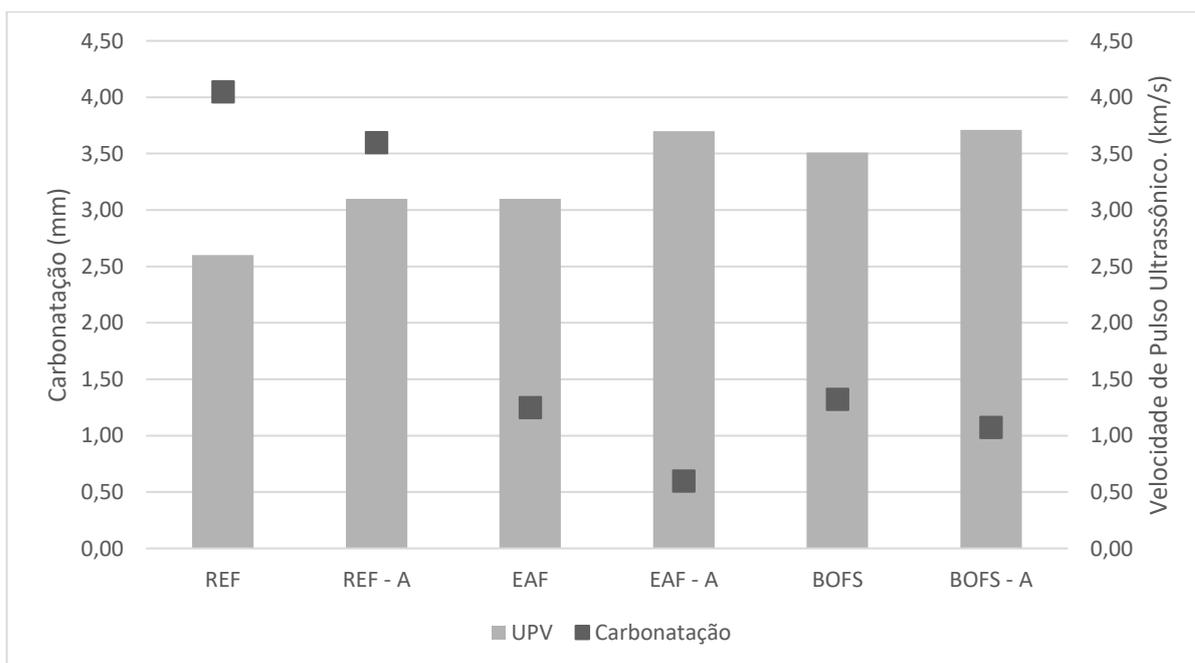
O melhor desempenho do concreto EAF quando comparado com BOF, é justificado pela quantidade de CaO dos matérias. A escória BOF possui 25% a mais

de CaO do que EAF, observando na difração que esse cálcio se encontra majoritariamente na forma de CaCO<sub>3</sub>.

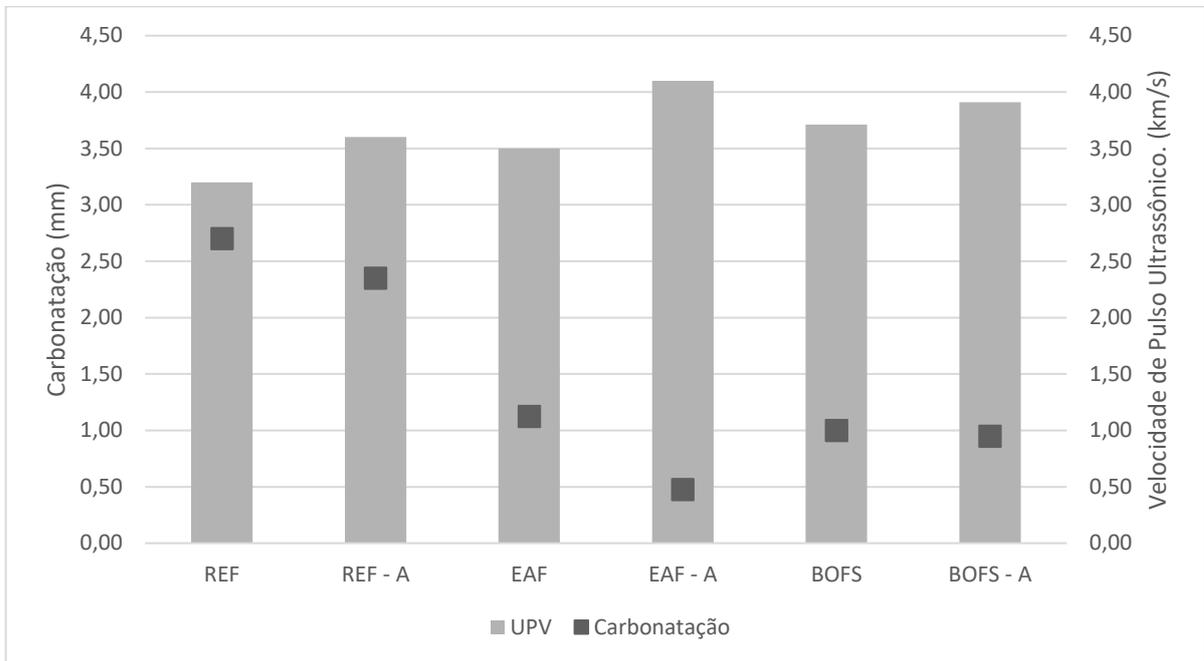
De forma geral, o bom desempenho à profundidade de carbonatação do concreto de escória EAF, vão de encontro com os resultados da caracterização física do concreto. Observa-se que, os concretos EAF apresentam menores valores de índice de vazios e menor valor para absorção de água. Todos esses parâmetros apontam que o concreto EAF é menos poroso do que BOF e REF, permitindo menor penetração do CO<sub>2</sub>.

Um parâmetro que está diretamente ligado com a porosidade é a velocidade de pulso ultrassônico, visto que a onda se propaga com maior dificuldade no vazio. Na Figura 19, Figura 20 e Figura 21 é correlacionado os valores de VPU e carbonatação para cada classe de resistência. Observa-se que quanto menor a velocidade do pulso ultrassônico, maior registro de carbonatação, sendo esse fenômeno apresentado pelos concretos de referência. Ao analisar os tratamentos de escória, percebe-se que a VPU aumenta enquanto a carbonatação diminui. Todas as classes de resistência apresentaram a mesma tendência ao correlacionar os resultados de UPV e Carbonatação. No entanto, nota-se, como esperado, que os concretos C<sub>35</sub> possuem os maiores resultados de UPV, indicando um concreto, mas denso e com menos vazios resultando em menores valores para carbonatação.

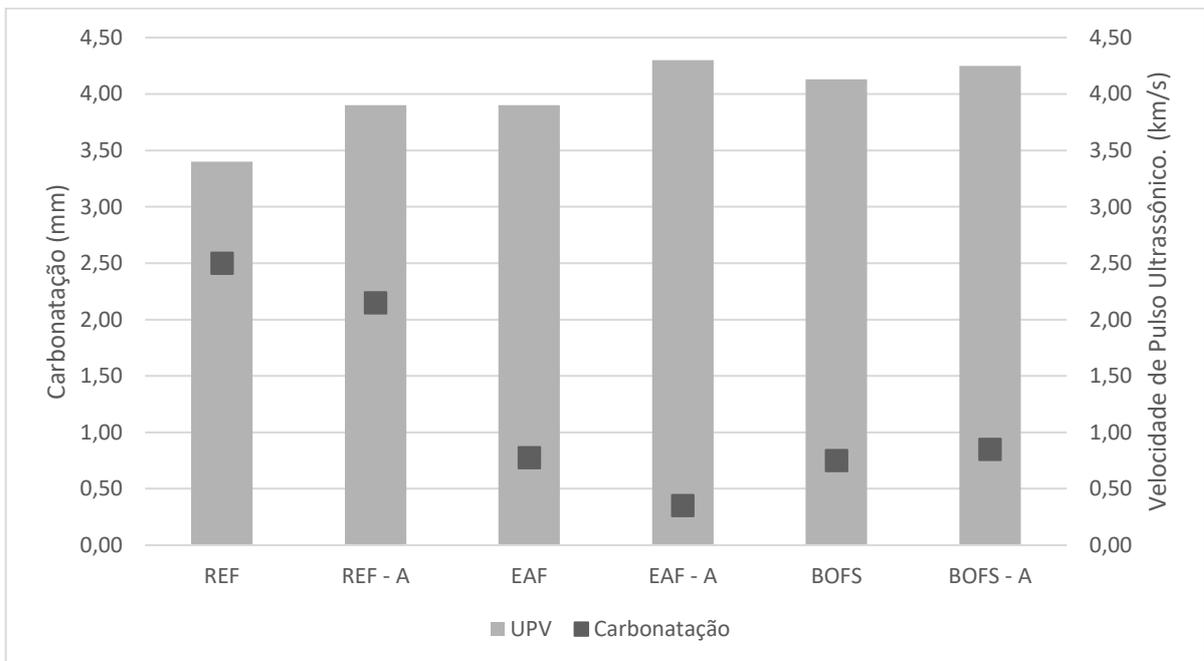
**Figura 19: VPU concreto C15.**



**Figura 20: VPU concreto C25.**



**Figura 21: VPU concreto C35.**



## 5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, é possível observar que os concretos produzidos com escória de aciaria elétrica apresentam resultados superiores quando comparados aos concretos de referência para todos os parâmetros analisados no presente trabalho. Ao produzir concretos com 100% de substituição de agregado natural por agregados de escória, e compará-los, nota-se:

- Redução do valor de índice de vazios e absorção de água;
- Aumento da velocidade de pulso ultrassônico;
- Maiores valores de massa específica, induzido pelo maior valor de massa específica dos agregados de escória;
- Maiores resultados de resistência à compressão;
- Menor profundidade de carbonatação.

O aumento considerável na resistência à compressão dos corpos de prova produzidos com agregados de escória de EAF e BOF é condizente com os valores encontrados na caracterização física do concreto. Todos os traços de escória apresentaram melhor desempenho no teste de carbonatação acelerada. Os concretos de escória apresentaram desempenho, em média, 80% melhores que os concretos convencionais.

Ao analisar os resultados para os concretos aditivados, percebe-se a influência que o aditivo proporciona na matriz. Destacando-se a profundidade de carbonatação, observa-se que todos os valores de carbonatação para os concretos aditivados foram melhores quando comparados aos sem aditivo. Este fato, evidencia o efeito do mesmo nas matrizes cimentícias, que ao ser utilizado, melhora a dispersão das partículas de cimento, ocasionando em maior formação de produtos de hidratação ao longo da matriz, tendo como resultado maior coesão do produto final.

O bom desempenho dos concretos estudados acarretam em um ganho ambiental de grande valia, haja vista a quantidade de resíduos que a produção do aço gera. Associando o bom desempenho dos concretos estudados com seus valores de massa específica, pode-se então indicar a utilização desses concretos em obras de fundação, obras de artes especiais, obras situadas em ambientes agressivos, elementos de rápida desforma, peças pré-moldadas, entre outras aplicações.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- ABNT. (1998). *NBR NM 67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*.
- ABNT. (2005). *NBR NM 23: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*.
- ABNT. (2006). *NBR 9479: Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova*.
- ABNT. (2007). *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*.
- ABNT. (2009). *NBR 7211: Agregados para concreto - Especificações*.
- ABNT. (2013). *NBR 15575: Edificações habitacionais — Desempenho*.
- ABNT. (2013). *NBR 8802 - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*.
- ABNT. (2015). *NBR 8953: Concreto Para Fins Estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT. (2018). *NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos*.
- Aitcin, P. (2000). *High performance concrete*. São Paulo, SP, Brasil: PINI.
- Aitcin, P.-C. (29 de Novembro de 2000). *Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow*. *Cement and Concrete Research*, pp. 1349 - 1359.
- Araujo, A. (15 de 11 de 2016). *Comportamento eletroquímico do aço-carbono em concreto*. Obtido de Técnica: <https://techne.pini.com.br/2016/11/pesquisadora-analisa-o-comportamento-eletroquimico-do-aco-carbono-em-concreto/>
- Barros, T., S'antana, P., Januzzi, R., Cury, A., & Peixoto, R. (2014). *Blocos de Escória de Aciaria para Alvenaria Estrutural*. Em *Anais do XXII Seminário de Iniciação Científica da Universidade Federal de Ouro Preto* (p. 1). UFOP.
- Brand, A., & Roesler, J. (2018). *Interfacial transition zone of cement composites with steel furnace slag aggregates*. *Cement and Concrete Composites*, 117 - 129.
- Brandt, A. (2008). *Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering*. *Composite Structures*, 3 - 9.

- Bravo, M., Brito, J., Evangelista, L., & Pacheco, J. (2017). Superplasticizer's efficiency on the mechanical properties of recycled aggregates concrete: Influence of recycled aggregates composition and incorporation ratio. *Construction and Building Materials*, 129 - 138.
- Cadore, W. (2008). *Estudo da Carbonatação da Camada de Cobrimento de Protótipos de Concreto com Altos Teores de Adições Minerais e Cal Hidratada*. Santa Maria, RS - Brasil: Universidade Federal de Santa Maria.
- Cartuxo, F., Brito, J., Evangelista, L., Jiménez, J., & Ledesma, E. (2015). Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer. *Construction and Building Materials*, 89, 36 - 47.
- Carvalho, J., Borges, M., Januzzi, R., Peixoto, R., & Cury, A. (2017). Study of the Mechanical Behavior of Blocks for Structural. *Journal of the International Masonry Society*, 31 - 38.
- Cascudo. (2011). Action of carbonation on concrete. Em G. C. Isaia (Ed.), *Concrete: Science and Technology* (pp. 849-886). São Paulo: IBRACON.
- Castro, A. L., & Pandolfelli, V. C. (2009). *Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a*. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos.
- Cheng, S., Shui, Z., Sun, T., Yu, R., Zhang, G., & Ding, S. (2017). Effects of fly ash, blast furnace slag and metakaolin on mechanical properties and durability of coral sand concrete. *Applied Clay Science*, 141, 111-117.
- Damineli, B., Kemeid, F., Aguiar, P., & John, V. (15 de Julho de 2010). Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement & Concrete Composites*, pp. 555 - 562.
- Diamond, S. (2006). The patch microstructure in concrete: The effect of superplasticizer. *Cement and Concrete Research*, 36, 776 - 779.
- Diniz, D., Carvalho, J., Mendes, J., & Peixoto, R. (Maio de 2017). Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical. *Journal of materials in civil engineering*, 29. Obtido em 18 de Maio de 2017, de [http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/dissertao\\_\\_dayse\\_diniz.pdf](http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/dissertao__dayse_diniz.pdf)
- Ekolu, S. (2016). A review on effects of curing, sheltering, and CO<sub>2</sub> concentration upon natural carbonation of concrete. *Construction and Building Materials*, 127, 306-320.
- Felice, R., Freeman, J., & Ley, T. (2014). Durable Concrete with Modern Air Entraining Admixtures. *Concrete International*, pp. 37 - 45.

- França, M., Souza, B., Pereira, A., Fontes, W., Santos, D., & Peixoto, R. (2013). Argamassa de Escória de Aciaria Elétrica para Assentamento de Alvenarias e Revestimento. *X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*.
- Freitas, R. P. (2012). Controle de Qualidade em Concreto Endurecido: Ensaio Mecânicos. Juiz de Fora - MG : Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Gonçalves, D. R., Fontes, W. C., Mendes, J. C., Silva, G. J., & Peixoto, R. A. (2016). Evaluation of the economic feasibility of processing plant for steelmaking slag. *Wast & Management, 34*(2), 107-120.
- Guo, J., Bao, Y., & Wang, M. (2018). Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. *Waste Management*.
- Haltier, D., Borges, A., Rangueri, T., Silva, G., & Peixoto, R. (Outubro de 2014). Blocos de concreto produzidos com escória de aciaria para uso em alvenaria modular. Em *Anais do 56º Congresso Brasileiro de Concreto* (pp. 1 - 16). Natal: IBRACON.
- Han-Seung, L., & Wang, X.-Y. (2016). Evaluation of compressive strength development and carbonation depth of high volume slag-blended concrete. *Construction and Building Materials, 124*, 45-54.
- Hernandez, R., Cortés, C., & Bustos, L. (2015). Durability and acoustics of concrete with slag of cupola furnace as fine aggregate replacement. *Tecnura, 19*(43), 37 -51.
- Hidayah Roslan, N., Ismail, M., Abdul-Majid, Z., & Ghoreishiamiri, S. (2016). Performance of steel slag and steel sludge in concrete. *Construction and Building Materials, 104*, 16 - 24.
- Hills, T., Gordon, F., Florin, N., & Fennel, P. (2015). Statistical analysis of the carbonation rate of concrete. *Cement and Concrete Research, 72*, 98-107.
- Ho, D., & Lewis, R. (1987). CARBONATION OF CONCRETE AND ITS PREDICTION. *CEMENT and CONCRETE RESEARCH, 489 - 504*.
- Huang, H., Qian, C., Zhao, F., Qu, J., Guo, J., & Danzinger, M. (2016). Improvement on microstructure of concrete by polycarboxylate superplasticizer (PCE) and its influence on durability of concrete. *Construction and Building Materials, 110*, 293 - 299.
- IAB. (2015). *Processo siderúrgico*. Obtido em 17 de Maio de 2017, de Instituto Aço Brasil - IAB: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>
- IAB. (2018). *Relatório de Sustentabilidade - Instituto Aço Brasil - IAB*. Retrieved Junho 17, 2017, from <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>

IBS. (12 de abril de 2009). *INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA* .

Jesus, V., Nunes, T., Oliveira, S., Peixoto, R., Pnciano, B., & Santos, D. (Novembro de 2011). Habitações Sustentáveis Construídas a Partir de Elementos Construtivos Produzidos com Resíduos de Escória de Aciaria. Em *Anais do 53º Congresso Brasileiro de Concreto* (53º ed., pp. 1 - 10). Florianópolis, Brasil: IBRACON. Obtido em 17 de Maio de 2017, de [http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/HABITAcOES\\_SUSTENTaVEIS.pdf](http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/HABITAcOES_SUSTENTaVEIS.pdf)

Juras, I. d. (17 de Maio de 2015). *Os impactos da indústria no meio ambiente*. Consultoria Legislativa - Câmara dos Deputados, Brasília. Obtido em 17 de Maio de 2017, de Consultoria Legislativa: [http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/areas-da-conle/tema14/impactos-da-industria-no-meio-ambiente\\_ilidia-juras\\_politicas-setoriais](http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/areas-da-conle/tema14/impactos-da-industria-no-meio-ambiente_ilidia-juras_politicas-setoriais)

Kazmierczak, C. (1995). Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação. *Tese de Doutorado*. São Paulo, SP, Brasil: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Kwon, S., Lee, H., Karthick, S., & Saraswathy, V. (2017). Long-term corrosion performance of blended cement concrete in the marine environment – A real-time study. *Construction and Building Materials*, 349 - 360.

L. Provis, J., A. Bernal, S., Mejía de Gutiérrez, R., & S. J. van Deventer, J. (2015). Accelerated carbonation testing of alkali-activated slag/metakaolin blended concretes: effect of exposure conditions. *Materials and Structures*, 48, 653-669.

Leemann, A., Nygaard, P., Kaufmann, J., & Loser, R. (2015). Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete. *Cement & Concrete Composites*, 62, 33-43.

MAURY, M. B., & BLUMENSCHHEIN, R. N. (04 de 06 de 2012). Produção de cimento: Impactos à saúde e meio ambiente. *Sustentabilidade em Debate*, p. 21.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). *Concrete: microstructure, properties and materials*. São Paulo: IBRACON.

Mendes, J., Moro, T., Figueiredo, A., Defáveri, K., Silva, G., Silva, G., & Peixoto, R. (2017). Mechanical, rheological and morphological analysis of cement-based composites with a new LAS – based air entraining agent. *Construction and Building Materials*, pp. 648-661.

- Ministério do Trabalho. (2011). Norma Regulamentadora 25.
- Monosi, S., Ruello, M. L., & Sani, D. (12 de Agosto de 2015). Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production. *Cement and Concrete Composites*, pp. 66-72.
- Natalli, J. F. (2017). Desempenho do Concreto Leve em Seções Mistas. Ouro Preto - MG: Universidade Federal de Ouro Preto.
- Özbay, E., Erdemir, M., & Ibrahim Durmus, H. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. *Construction and Building Materials*, 105, 423-434.
- Palankar, N., Shankar, A., & Mithun, B. (2016). Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 437 - 448.
- Pang, B., Zhou, Z., & Xu, H. (2015). Utilization of carbonated and granulated steel slag aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 84, 454-467.
- Petrucci, E. G. (1998). *Portland cement concrete* (13th ed.). São Paulo: Globo.
- Qiang, W., Peiyu, Y., Jianwei, Y., & Bo, Z. (2013). Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 1414 - 1420.
- RILEM. (1988). CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth. *Materials and Structures*, 21(126), 453-455.
- Rondi, L., Bregoli, G., Sorlini, S., Cominoli, L., Collivignarelli, C., & Plizzari, G. (27 de Outubro de 2015). Concrete with EAF steel slag as aggregate: A comprehensive technical and environmental characterisation. *Composites*, pp. 195-202.
- Sanjuán, M. A., Andrade, C., & Cheyrezy, M. (2003). Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions. *Advances in Cement Research*, 15(4), 171-180.
- Santamaría, A., Orbe, A., San José, J., & González, J. (2018). A study on the durability of structural concrete incorporating electric steelmaking slags. *Construction and Building Materials*, 94 - 111.
- Santamaría, A., Orbe, A., San José, J., & González, J. (2018). A study on the durability of structural concrete incorporating electric steelmaking slags. *Construction and Building Materials*, 94 - 111.

- Saxena, S., & Tembhurkar, A. (2018). Impact of use of steel slag as coarse aggregate and wastewater on fresh and hardened properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 126 - 137.
- Shi, C., He, T.-s., Zhang, G., Wang, X., & Hu, Y. (2016). Effects of superplasticizers on carbonation resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 108, 48 - 55.
- Shi, C., Zhang, G., He, T., & Li, Y. (2016). Effects of superplasticizers on the stability and morphology of ettringite. *Construction and Building Materials*, 112, 261 - 266.
- Silva, M., Bezerra, A., Alves, V., Nunes, T., Almada, S., & Peixoto, R. (2011). UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA NA FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO. *Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto*.
- Soares, A. F. (2009). *Specialized software for mix design of cement-based composites*. Belo Horizonte: CEFET-MG.
- Tokudome, N. (22 de junho de 2009). *Carbonatação do concreto*. (C. Itambé, Editor) Obtido em 22 de Maio de 2017, de Massa Cinzenta: <http://www.cimentoitambe.com.br/carbonatacao-do-concreto/>
- Torgal, F., Miraldo, S., Labrincha, J., & Brito, J. (2012). An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC. *Construction and Building Materials*, 36, 141-150.
- Tripathi, B., & Chaudhary, S. (2016). Performance based evaluation of ISF slag as substitute of natural sand in concrete. *Cleaner Production*, 112, 672-683.
- Tripathi, B., & Chaudhary, S. (2016). Performance based on evaluation of ISF slag as substitute of natural sand in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 672-683.
- Wang, J., Dhir, R., & Levitt, M. (1994). Membrane curing of concrete: Moisture loss. *Cement and Concret Research*, 1463 - 1474.
- Zhang, T., Yu, Q., Wei, J., & Li, J. (17 de Agosto de 2011). Investigation on mechanical properties, durability and micro-structural development of steel slag blended cements. *Journal Therm Calorim*, pp. 633-639.
- Zhang, X., Zhou, X., Zhou, H., Gao, K., & Wang, Z. (2013). Studies on forecasting of carbonation depth of slag high performance concrete considering gas permeability. *Applied Clay Science*, 79, 36 - 40.