

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

PROPEC

Dissertação

**Desempenho de concretos de
escória de aciaria frente a
ataque de cloretos.**

Laís Cristina Barbosa Costa

Ouro Preto
2019



UFOP

Laís Cristina Barbosa Costa

DESEMPENHO DE CONCRETOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA FRENTE A ATAQUE DE
CLORETOS

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.

Orientador: Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto, DSc.

Ouro Preto

2019

C837d

Costa, Laís Cristina Barbosa.

Desempenho de concretos de escória de aciaria frente a ataque de cloretos [manuscrito] / Laís Cristina Barbosa Costa. - 2019.

80f.: 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.

Área de Concentração: Estruturas e construção.

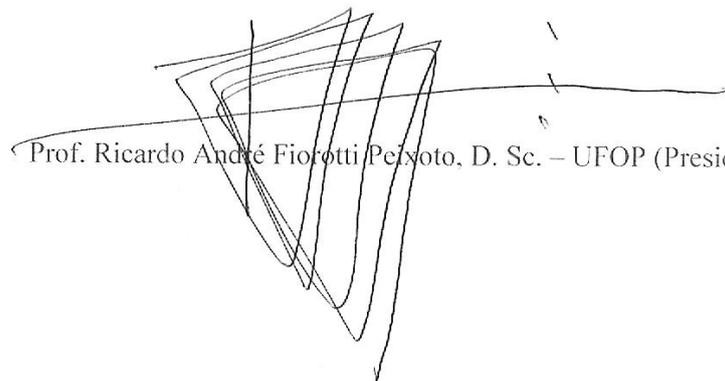
1. Escória de Aciaria. 2. Penetração de Cloretos. 3. Durabilidade. 4. Concretos Reciclados. 5. Sal de Friedel. I. Peixoto, Ricardo André Fiorotti. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624

DESEMPENHO DE CONCRETOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA FRENTE A ATAQUES DE CLORETOS

AUTORA: LAÍS CRISTINA BARBOSA COSTA

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 25 de fevereiro de 2019, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



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



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



Prof. Flávio Teixeira de Souza, D. Sc. – IFMG

AGRADECIMENTOS

A caminhada ao longo do mestrado é um caminho árduo demais para ser percorrido sozinho. Por isso, sou feliz em dizer que no decorrer desse tempo pude contar com o apoio de diversas pessoas que foram inspiração, apoio e motivação. Inicialmente agradeço a força, coragem e amor transmitidos pela minha família: mãe, pai, Nalu e madrinha. A distância não os impediu de serem presentes nos momentos de alegria e afago nas horas tristes.

Em especial, gostaria de agradecer ao professor Ricardo Fiorotti, que ao longo desse percurso generosamente compartilhou conhecimentos e instigou dúvidas. Obrigada por confiar em mim e sempre me motivar a ser e produzir melhores versões. Sou feliz em dizer que nesse tempo você foi mais que um orientador, foi um entusiasta da nossa pesquisa e da minha formação.

Além disso, gostaria de agradecer a todos os membros do grupo de pesquisa Reciclos, obrigado por serem minha família em Ouro Preto e por me ensinarem tanto. Agradeço a Fernanda, Luana e Humberto por estarem comigo quando mais precisei, obrigado por serem tão companheiros. Agradeço a todos os ensinamentos transmitidos pelo Professor Guilherme e aos diversos conselhos e consultorias oferecidas caridosamente pelo José Maria. À Julia, Juliana, Aline e Marina agradeço ao apoio, conselhos, troca de experiências e amizade que engrandeceram esse caminho.

Mas agradeço principalmente, ao Juninho e a Marcela que são os grandes responsáveis pela execução dessa pesquisa. Ao longo dessa jornada vocês se doaram física e intelectualmente, esse trabalho apresentado com certeza também é de vocês. Obrigada por abraçarem a causa, por me fazerem continuar quando eu queria parar e por me obrigarem a descansar quando eu mais precisava. Mas mais do que isso, agradeço por serem motivação constante e por estarem comigo superando todos os obstáculos. Em vocês sabia onde encontrar a força, coragem, energia e alegria. Serei sempre grata por terem me ensinado tanto sobre ser amigo.

Agradeço também a todos os meus amigos adquiridos nessa caminhada ou que persistem comigo ao longo dos anos, obrigada por me proporcionarem apoio e alegrias.

Por fim, agradeço À FAPEMIG, CAPES, CNPq e PROPEC pelo apoio financeiro e organizacional que contribuíram para a realização e apresentação dessa pesquisa.

RESUMO

Em 2017, o Brasil fabricou 34,4 milhões de toneladas de aço, sendo a nona maior produção mundial. Essa atividade gera diversos resíduos e coprodutos, destacando-se a escória de aciaria, que em sua maioria tem destinos pouco nobres, como aterros, depósitos e revestimento para vias secundárias. Estudos recentes comprovaram que concretos com escória de aciaria tem desempenho mecânico equivalente ou superior aos convencionais. Porém, existem poucas pesquisas avaliando a durabilidade dos mesmos. Os ambientes sujeitos ao efeito das marés são os mais perigosos para estrutura de concreto armado devido presença de cloretos que levam a diminuição da seção das armaduras e subsequente fissuração do concreto. Assim, esse trabalho avaliou a durabilidade frente a ataque de cloretos de concretos fabricados utilizando de escória de aciaria como agregado e adição mineral. Nessa pesquisa foram produzidos concretos com dois consumos de cimento (310 kg/m³ e 450 kg/m³). Com finalidade de comparação, foram fabricadas matrizes de referência utilizando agregados convencionais e adições minerais comerciais, como sílica ativa e metacaulim. Inicialmente todas as matrizes foram caracterizadas quanto as suas características físicas e mecânicas, tais como índice de vazios, massa específica, resistência à compressão e resistência à compressão por tração diametral. Subsequente, foi analisado a resistência a penetração de cloretos, através da exposição de corpos de prova a soluções agressivas de NaCl por períodos de 35 e 55 dias. Após esse período foi avaliado as profundidades penetradas por cloretos e a capacidade de formar sal de Friedel das três adições minerais utilizadas. De forma geral, os concretos com agregado convencional apresentaram menor índice de vazios e menor massa específica, os diferentes consumos de cimento não afetaram significativamente essas características. No entanto, apesar dos maiores índices de vazios, as matrizes fabricadas com agregado de escória de aciaria possuem resistência à compressão e à tração superiores aos convencionais. O aumento do consumo de cimento proporcionou uma melhora no desempenho mecânico dos concretos produzidos com ambos os agregados. A adição mineral de escória de aciaria apresentou comportamento semelhante à das adições comerciais quando combinada aos dois tipos de agregado e nos dois consumos de cimentos. Suas características físicas e mecânicas foram principalmente similares as matrizes produzidas com incorporação de metacaulim. Com relação a durabilidade, os concretos produzidos com agregado de escória de aciaria tiveram menores profundidades de penetração de íons cloretos quando comparado aos convencionais. O aumento do consumo de cimento implicou na produção de concretos mais duráveis, com menores profundidades atacadas. Avaliando a capacidade de formar cloretos combinados (Sal de Friedel) a adição mineral de escória de aciaria apresentou comportamento similar a sílica ativa. O maior teor de cloreto combinado foi notado no concreto com metacaulim. De modo geral, nessa pesquisa observou-se que agregados e adições minerais produzidas com escória de aciaria são opções tecnicamente viáveis para fabricação de concretos.

Palavras-chaves: Escória de Aciaria; Penetração de Cloretos; Durabilidade; Concretos Recicladados; Sal de Friedel

ABSTRACT

In 2017, Brazil manufactured 34.4 million tons of steel. The country has the ninth largest production in the world. This industry generates several residues and coproducts, highlighting the steel slag, which has not noble destinations, such as landfills, deposits and surfacing secondary roads. Recent studies have shown that concretes with steel slag have mechanical performance equivalent or higher than the conventional ones. However, there are few studies evaluating their durability. The tidal zones in marine environment are the most dangerous for the structure of reinforced concrete due to the presence of chlorides that lead to the reduction of the section of the reinforcement bar and leads subsequent to concrete cracking. Thus, this work evaluated the durability against chloride attack of concrete produced using steel slag as aggregate and mineral admixture. In this research were fabricated concretes with two cement contents (310 kg / m³ and 450 kg / m³). For comparison purposes, reference concretes using conventional aggregates and commercial mineral admixtures such as silica fume and metakaolin were produced. Initially all composites were characterized as their physical and mechanical characteristics, such as voids index, specific mass, compressive strength and tension strength by diametrical compression. Subsequently, the penetration resistance of chlorides was analyzed by exposing test specimens to aggressive solutions of NaCl for periods of 35 and 55 days. After this period, the penetration depths and the ability to form Friedel salts for the three mineral admixtures used were evaluated. In general, the concretes with conventional aggregates presented lower voids index and lower specific mass, the cement content did not affect these characteristics significantly. However, despite the higher void indices, the composites made with steel slag aggregate presented higher compressive and tensile strength than conventional ones. The increase of the cement content provided an improvement in the mechanical performance of the concretes for the both aggregates. The mineral admixture made with steel slag had a similar performance compared to the commercial ones when combined with the two types of aggregates and in the two cement content. The physical and mechanical characteristics of concretes fabricated with steel slag mineral admixture were mainly similar to the matrices produced with the incorporation of metakaolin. Regarding the durability, the concretes produced with steel slag aggregates had lower chloride penetration depths when compared to conventional ones. The increase in cement content impacted directly in the production of more durable concretes, with lower attacked depths. Evaluating the ability to form combined chlorides (Friedel's salts) the steel slag mineral admixture present similar behavior to silica fume. The highest combined chloride content was observed in the concrete made with metakaolin. In general, this research observed that aggregates and mineral admixtures produced with steel slag are technically feasible options for concrete manufacturing.

Key-words: Steel slag, Chloride penetration; Durability; Recycled Concretes; Friedel salts.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
3 REVISÃO DA LITERATURA	4
3.1 Durabilidade	6
3.2 Penetração de íons cloretos em matrizes cimentícias	8
3.2.1 <i>Corrosão</i>	12
3.2.2 <i>Ataques químicos combinados</i>	13
3.2.3 <i>Análise experimental</i>	15
3.3 Escória de Aciaria	17
3.3.1 <i>Escória de aciaria em concretos</i>	18
4 METODOLOGIA	20
4.1 Materiais	20
4.2 Métodos	22
4.2.1 <i>Preparação dos materiais</i>	22
4.2.2 <i>Caracterização dos materiais</i>	23
4.2.3 <i>Estudo de dosagem e fabricação do concreto</i>	25
4.2.4 <i>Caracterização do concreto no estado endurecido</i>	26
4.2.5 <i>Análise de durabilidade</i>	28
5 RESULTADOS	32
5.1 Caracterização da escória de aciaria bruta	32
5.2 Caracterização dos agregados	33
5.3 Caracterização das adições minerais	36
5.4 Curva de saturação do aditivo⁰	38
5.5 Caracterização do concreto no estado fresco	40
5.6 Caracterização do concreto no estado endurecido	42
5.6.1 <i>Índice de Vazios e Absorção de água por Imersão</i>	42
5.6.2 <i>Velocidade de Pulso Ultrassônico</i>	45
5.6.3 <i>Massa Específica do Concreto</i>	46
5.6.4 <i>Porosidade na seção</i>	47
5.6.5 <i>Resistência à Compressão</i>	49
5.6.6 <i>Resistência à Tração</i>	53
5.7 Análise de Durabilidade no Concreto	54
5.7.1 <i>Penetração de íons cloreto no concreto</i>	54

5.7.2 Capacidade de formar cloretos combinados	58
5.7.3 Velocidade de Pulso Ultrassônico	59
6 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Zonas de agressividade ao concreto em regiões marítimas.	9
Figura 2 – Representação do duplo filme de óxidos na camada de passivação	12
Figura 3 – Representação esquemática do processo de corrosão por pitting	13
Figura 4 – Disposição do ensaio de Salt Ponding Test	15
Figura 5 – Esquema dos corpos de prova imersos em solução no ensaio de Bulk Diffusion ..	16
Figura 6 – Esquema prático do ensaio Rapid Chloride Permeability Test.....	16
Figura 7 – Fluxograma das etapas do programa experimental proposto.....	20
Figura 8 - Curvas granulométricas dos agregados utilizados ao serem recebidos	21
Figura 9 – (a) Seção do corpo de prova registrada digitalmente para ensaio de porosidade (b) Imagem da seção após tratamento em software de edição de imagem	28
Figura 10 - Corpo de prova preparado para ensaio de penetração de cloretos.....	29
Figura 11 – (a) Esquema indicativo do ensaio (b) Corpo de prova preparado para análise.....	29
Figura 12 - (a) Corpo de prova após a aspersão de nitrato de prata (b) Corpo de prova tratado para contabilizar a área atacada	30
Figura 13 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo e miúdo utilizado no estudo	34
Figura 14 - Morfologia dos agregados graúdos (a) Convencional, gnaisse (b) Escória de Aciaria LD	35
Figura 15 - Distribuição granulométrica das adições minerais e do cimento utilizado.....	36
Figura 16 - Morfologia das adições minerais obtidas com MEV magnitude de 500x (a) cimento; (b) powder LD; (c) metacaulim; (d) sílica ativa.....	37
Figura 17 - MEV das partículas de metacaulim e powder LD com magnitude de 5000x.....	37
Figura 18 - Curvas de saturação do aditivo PowerFlow 1180.....	39
Figura 19 - Correlação entre o D90 das partículas e seus respectivos pontos de saturação	40
Figura 20 - Relação entre abatimento e o teor de aditivo utilizado.....	41
Figura 21 - Teste slump do concreto de REF-P14-310	41
Figura 22 - Índice de Vazios e Absorção de Água por Imersão dos concretos produzidos	42
Figura 23 - Relação entre o índice de vazios e o consumo de água por tonelada de concreto .	43
Figura 24 -TG das matrizes com consumo de cimento 310kg/m ³ e 450kg/m ³	44
Figura 25 - Velocidade de Pulso Ultrassônico dos concretos fabricados.....	45
Figura 26 - Massa Específica dos concretos fabricados	46
Figura 27 - Percentual de poros nas seções dos corpos de prova de concreto	47

Figura 28 - Seção de um corpo de prova de concreto produzido com agregado de escória de aciaria.....	48
Figura 29 - Resistência à compressão dos concretos produzidos.....	49
Figura 30 – (a) Agregado de escória de aciaria (b) Agregado convencional de gnaisse.....	51
Figura 31 - Resultados de resistência à compressão dos concretos combinado aos índices de vazios.....	52
Figura 32 - Resistência à Tração dos concretos	53
Figura 33 - Resultados de resistência à tração e percentual de poros na seção.....	54
Figura 34 - Gráfico com a profundidade e a área atacada por cloretos, nas idades de 35 e 55 dias.....	55
Figura 35 – Resultado da análise termogravimétrica dos concretos (a) Curva DTG (b) Curvas de Perda de Massa	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química média da escória de aciaria nas siderúrgicas brasileiras (Fonte: IBS (1999) apud Oliveira (2006)).....	17
Tabela 2 – Fluorescência de raio-X do cimento CP IV RS 32.....	20
Tabela 3 – Relação dos ensaios de caracterização física para os agregados.....	24
Tabela 4 - Traços dos concretos em relação ao consumo de cimento.....	26
Tabela 5 - Ensaio e respectivos protocolos de caracterização dos concretos.....	27
Tabela 6 - FRX das frações obtidas durante a separação magnética.....	32
Tabela 7 - Caracterização quantitativa do DRX da escória de aciaria.....	33
Tabela 8 - Caracterização física dos agregados utilizados.....	34
Tabela 9 – FRX das adições minerais utilizadas.....	38
Tabela 10 - Massa específica e unitária das adições minerais utilizadas.....	38
Tabela 11 – Comparação das taxas de deterioração por dia (%/dia e mm/dia) nos períodos de exposição de 35 e 55 dias.....	57
Tabela 12 – Variação da VPU após 35 e 55 dias de exposição em solução de NaCl.....	59

1 INTRODUÇÃO

Problemas de durabilidade em estruturas produzem gastos significativos. Por exemplo, os Estados Unidos usam um valor equivalente a 3% do seu PIB para reparar problemas de corrosão no país. Desses gastos, 16,4% estão concentrados no setor de infraestruturas (principalmente pontes), sendo que o país possui mais de 19 mil quilômetros de costa marítima (Koch, et al., 2002). Quanto ao Brasil, não há informações exatas sobre os prejuízos na infraestrutura (e consequentemente econômicos) ocasionados por corrosão. No entanto, sabe-se que o país possui uma das vinte maiores costas marítimas do mundo, com 7.491 km. A ausência de dados sobre esse fenômeno já é um indicativo de como esse assunto é por vezes negligenciado.

A corrosão de armaduras pode ser provocada pela penetração de cloretos. Nesse aspecto, as regiões marítimas demandam especial atenção. A legislação brasileira para projetos em concreto armado, NBR 6118 (ABNT, 2013), classifica com a maior classe de agressividade as estruturas diretamente em contato com respingos do mar. Sabe-se que a corrosão da armadura leva à diminuição da seção de aço e à fissuração do concreto devido à formação de hidróxidos expansivos (Young, et al., 1998; Geng, et al., 2010). Uma das causas da corrosão é a penetração de cloretos, que ocorre principalmente por difusão, sendo o coeficiente de difusividade relacionado a estrutura dos poros (Wang, et al., 2018). Assim, em ambientes agressivos é fundamental a utilização de concretos de alto desempenho com uma estrutura de poros refinada. No entanto, a produção desses concretos apresenta, muitas vezes, elevado valor agregado.

Dessa forma, a produção de matrizes de cimento Portland (concreto armado) resistentes aos ataques de agentes externos, pode garantir maior desempenho e vida útil a essas estruturas. Nessa direção, o uso de adições minerais apresenta-se como uma boa alternativa. Utilizar adições minerais obtidas de rejeitos pode significar uma boa alternativa econômica, ambiental e tecnológica. A construção civil possui uma grande demanda por matérias-primas. Em 2015 foram consumidos 741 milhões de toneladas de agregados, produzidos por uma atividade extrativa com grande consumo de recursos (ANEPAC, 2015). A incorporação de resíduo em matrizes cimentícias reduz o impacto da construção civil e reintroduz esse material na cadeia produtiva. Nesse sentido, destaca-se a indústria siderúrgica brasileira, que gerou 20,9 milhões de toneladas de resíduos e coprodutos em 2017, sendo 27% escória de aciaria (IABR, 2018).

Dentre os diversos estudos sobre a escória de aciaria, ressaltam-se os que avaliam sua utilização na forma de adição mineral, analisando o seu potencial como material cimentante

suplementar (Wang, et al., 2013; Shi, et al., 2017). Roslan *et al* (2016) estudou matrizes fabricadas com fração fina de escória de aciaria em substituição a 10% do cimento, observando resultados de resistência à compressão superiores aos convencionais. Isso indica que esse material contribui com o refino dos poros possibilitando uma matriz menos permeável a agentes externos (Carvalho, et al., 2019).

A utilização da escória de aciaria como agregado (em diversas frações) para concreto já vêm sendo estudada e apresenta propriedades mecânicas e físicas superiores e/ou equivalentes aos convencionais, quando combinada ou não a adições minerais (Monosi, et al., 2016; San-José, et al., 2014; Biskri, et al., 2017; Souza, 2015). Quanto a sua durabilidade, Santamaria *et al* (2018) comprovou que concretos produzidos com agregados de escória de aciaria expostos a ambientes marítimos tem desempenho superior ao convencional, com menor penetração de íons cloreto. No entanto, não existe consenso dessa informação. Biskri *et al* (2017) e Arribas *et al* (2014), ao contrário, observaram que concretos produzidos com escória de aciaria apresentaram maior permeabilidade aos íons cloreto e expansibilidade quanto as matrizes convencionais avaliadas. Os três trabalhos foram com escória de aciaria do tipo arco elétrica, com substituição total de agregado graúdo por escória de aciaria e adição desse material na fração de agregado miúdo.

Assim, o objetivo desse estudo é avaliar o desempenho de concretos totalmente produzidos com agregados de escória de aciaria combinado a adições minerais (comerciais e fabricadas com escória de aciaria) expostos a ataque de cloreto, a fim de melhor compreender a influência desses materiais na durabilidade de matrizes cimentícias.

2 OBJETIVOS

Investigar o desempenho de concretos produzidos com agregado graúdo e miúdo de escória de aciaria e com adição mineral de escória de aciaria quanto à penetração de cloreto.

Os objetivos específicos consistem em:

- Analisar a influência dos agregados de escória de aciaria e da adição mineral de escória de aciaria na estrutura da matriz de concreto;
- Determinar as propriedades mecânicas e físicas dos concretos produzidos com agregado de escória de aciaria e adição de escória de aciaria comparativamente aos concretos convencionais, fabricado com agregados e adições minerais comerciais;
- Investigar o desempenho de concretos produzidos com escória de aciaria frente ao ataque de cloreto de sódio;
- Estudar a influência da adição mineral de escória de aciaria na formação de sal de Friedel comparado as adições convencionais.

3 REVISÃO DA LITERATURA

O concreto pode ser definido como um material compósito formado por aglomerante, agregados e água, sendo composto por duas fases: uma contínua, constituída pela pasta; e outra formada por partículas dispersas (Young, et al., 1998). A qualidade do concreto está diretamente relacionada com a qualidade de seus materiais constituintes e da sua fabricação, por isso é relevante compreender melhor a função de cada elemento no compósito (Lamond & Pielert, 2006).

Os agregados são materiais com custo baixo e estão em maior proporção na matriz, em torno de 70-80% do volume total. No entanto, sua contribuição não se restringe em diminuir o valor do produto final. Esses materiais são considerados como a parte mais resistente e durável, sendo os principais responsáveis pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade volumétrica da matriz. De forma geral, sua forma e textura são propriedades que influenciam mais significativamente no desempenho geral do concreto do que sua composição química. Além disso, os agregados contribuem também com a trabalhabilidade, resistência mecânica e em diversas propriedades térmicas (Alexander & Mindness, 2005; Mehta & Monteiro, 2006).

Quanto aos aglomerantes, são definidos como materiais com propriedades adesivas e coesivas que possibilitam a ligação entre diferentes fragmentos formando assim um conjunto coeso (Neville, 2011). O mais utilizado na fabricação de concretos é o cimento Portland, um tipo de cimento hidráulico que é definido por Lamond e Pielert (2006) como material que enrijece e endurece através de interações químicas com a água.

O cimento Portland é obtido através da moagem do clínquer e uma pequena proporção de sulfato de cálcio. Seus principais componentes são: os silicatos (silicato dicálcico, C_2S , e o silicato tricálcico, C_3S); o aluminato tricálcico (C_3A); e o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). De forma geral, parâmetros da fabricação do cimento, como velocidade de resfriamento e temperatura de queima, têm grande influência nas propriedades do produto final (Neville, 2011). A hidratação dos componentes do cimento é um processo lento, onde partículas dispersas de cimento reagem quimicamente com a água formando uma matriz rígida, com baixa porosidade e significativa resistência mecânica, além de ser o principal responsável pela resistência química do concreto (Mehta & Monteiro, 2006; Skalny, et al., 2011).

Além dos agregados e dos aglomerantes, atualmente, os concretos contam com adições minerais, materiais coloidais ricos em sílica (Mehta & Monteiro, 2006). O objetivo desses é

melhorar a reologia do concreto no estado fresco, suas propriedades no estado endurecido, assim como a durabilidade de toda a matriz (Skalny, et al., 2011). As adições minerais podem ser classificadas quanto a sua atuação, sendo divididas entre aquelas com ação pozolânica, cimentante e que atuam como filler. As vantagens relacionadas à utilização de adições estão ligadas com a redução da porosidade que aumenta a coesão da matriz, tanto no estado fresco quanto endurecido (Mehta & Monteiro, 2006).

Adições minerais com ação pozolânica consomem o hidróxido de cálcio (CH) livre para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H), enquanto que os materiais com ação cimentante formam o mesmo produto a partir da reação com a água, sem interagir com o CH (Neville, 2011). Assim, além do refinamento dos poros as adições pozolânicas contribuem através da redução da zona de transição de interface das pastas com os agregados e aumento da durabilidade da matriz. Existe atualmente uma grande variedade de adições minerais que podem ser incorporadas ao concreto, as comercialmente mais difundidas são a sílica ativa e o metacaulim, ambas classificadas como pozolanas.

Para a fabricação do concreto é fundamental a presença de água, objetivando a total hidratação do cimento e a trabalhabilidade da mistura (Skalny, et al., 2011). Encontra-se aqui um dos maiores dilemas na produção de concretos, a necessidade de uma mistura trabalhável com a menor proporção de água possível, obtendo uma quantidade mínima de cimentos anidros ao final do processo de endurecimento. Os aditivos redutores de água atuam na superfície das partículas, na interface sólido-líquido, onde os mesmos são adsorvidos pelo cimento e devido a sua polaridade negativa levam a maior dispersão da matriz (Neville, 2011; Taylor, 1997). Versões mais modernas desses redutores, como os superplastificantes a base de policarboxilatos, funcionam principalmente por repulsão estérica. O uso desses materiais leva a uma melhor dispersão das partículas de cimento e consequente hidratação mais eficiente (Diamond, 2006; Cartuxo, et al., 2015).

De forma geral, entende-se o concreto como um material extremamente complexo, onde suas características diversas e propriedades são influenciadas por seus materiais e a interação entre eles. Quando se pensa em durabilidade e vida útil de estruturas é importante analisar o desempenho dessa matriz em ambientes agressivos e frente a intempéries.

3.1 Durabilidade

O conceito de produção sustentável engloba o reaproveitamento de materiais, produções com baixo consumo de matérias-primas e uma ampla avaliação do seu desempenho a longo prazo. Assim, materiais com alta energia incorporada podem ser opções viáveis ambientalmente quando possuem boa durabilidade e baixa demanda por manutenção (Torgal & Jalali, 2010). A NBR 15575 (ABNT, 2013) objetiva normatizar o desempenho esperado e a vida útil de estruturas, assim buscam-se elementos com melhor performance a longo prazo. Tratando-se de elementos de concreto, a análise de ciclo de vida e a atuação dos mesmos frente aos ambientes agressivos é tão relevante quanto o desempenho mecânico.

O processo de degradação do concreto está relacionado a fatores mecânicos, físicos e químicos. A deterioração por motivos mecânicos ocorre por fatores, tais como abrasão e erosão (Bertolini, et al., 2004). Esses problemas estão diretamente relacionados aos desgastes concentrados com frequência em um mesmo ponto, podendo ser causados pelo fluxo de água (erosão e cavitação) ou por atrito (abrasão). De ambas as formas, a qualidade da superfície (forma e tamanho das partículas) e a resistência da matriz são fundamentais para prevenir esse processo (Neville, 2011). No entanto, a degradação por impacto ou explosão está relacionada a terceiros e não possuem prevenção, visto que se tratam de sinistros.

Quanto aos fatores físicos que afetam a durabilidade de matrizes cimentícias, esses estão relacionados a variações térmicas e de volume (Bertolini, et al., 2004; Dyer, 2014). Dessa forma, destacam-se os processos de deterioração devido a mudanças no volume relativas ao teor de umidade no concreto, sendo classificadas como retração autógena (eliminação da água de hidratação dos poros da matriz), plástica (perda de água no concreto no estado fresco) e por secagem (perda de água no estado endurecido) (Dyer, 2014). Além disso, a variação da temperatura do concreto pode levar a retração com consequente fissuração (Dyer, 2014). Também relacionada a variações térmicas, tem-se os ciclos de gelo-degelo. Neste caso, a água que penetra pelos poros capilares devido a pressão hidrostática, congela em determinadas faixas de temperatura e aumenta de volume, gerando fissuração (Bertolini, et al., 2004).

Ressalta-se que todos esses mecanismos físicos estão comumente relacionados aos ataques químicos, seja ocorrendo simultaneamente ou facilitando a entrada de agentes agressivos devido às fissuras. A deterioração por reações químicas usualmente ocorre entre o agente agressivo do ambiente e os produtos de hidratação no concreto (Mehta & Monteiro, 2006). Os principais tipos de deterioração química são: ataque por sulfatos; penetração de

cloretos; carbonatação; e reação álcali-agregado (Neville, 2011). Destaca-se que o ataque químico no concreto se manifesta através da degradação de diversos parâmetros físicos do mesmo, como: aumento da porosidade/permeabilidade; redução da resistência mecânica; fissuração; e lascamento (Mehta & Monteiro, 2006).

A reação álcali-agregado (RAA) consiste na reação entre álcalis encontrados na matriz cimentícia e agregados reativos em um ambiente com a presença de água. O resultado é a formação de um gel que expande gerando tensões internas com consequente fissuração (Alexander & Mindness, 2005). Destaca-se que, de forma geral, os íons agressivos que afetam a durabilidade do concreto podem vir do meio externo, o que é mais comum, ou podem ser incorporados à matriz de concreto durante a sua fabricação através da água de amassamento ou de outro componente. A migração dos íons do meio externo para o interior do concreto pode ocorrer devido à permeabilidade, difusão ou sorção. A permeabilidade consiste na movimentação por diferença de pressão, enquanto que a difusão é devido a um gradiente de concentração. Por outro lado, a sorção está relacionada a capilaridade, referindo-se à absorção e adsorção de forma simultânea (Neville, 2011).

Quanto aos outros tipos de ataques químicos, sulfatos levam a formação de produtos expansivos (etringita e taumasita, respectivamente $[Ca_3Al(OH)_6 \cdot 12H_2O]_2 \cdot 3SO_4 \cdot 2H_2O$ e $[Ca_3Si(OH)_6 \cdot 12H_2O] \cdot SO_4 \cdot CO_3$) que geram fissuração e aumentam a permeabilidade da matriz, intensificando de forma cíclica o avanço do ataque. Quanto à carbonatação e a penetração de cloretos, seu prejuízo está relacionado à corrosão da armadura, pois esses promovem a sua despassivação. Barras de aço embutidas no concreto possuem uma camada de passivação formadas por óxidos devido ao alto pH do concreto, que a protegem de reações com a água e ar (Neville, 2011). Essa camada pode ser interrompida pela reação dos íons cloretos com os óxidos presentes nesse filme de proteção ou pela redução do pH consequência da transformação de CO_2 em ácido carbônico dentro da matriz cimentícia (Young, et al., 1998).

De forma geral, a resistência aos ataques químicos por agentes externos do concreto depende de forma significativa de sua permeabilidade, mostrando a necessidade de concretos com baixo teor de água e pouco poroso. No entanto, esse parâmetro é insuficiente ao avaliar a condutividade de matrizes, sendo necessário associá-lo a informações sobre os caminhos formados pela rede de poros (Dyer, 2014). Esta estrutura é afetada pela forma/tamanho do agregado e pela trabalhabilidade da matriz, e são determinados principalmente pela distribuição granulométrica de partículas com dimensão similar ao cimento (Zhong, et al., 2016; Dyer,

2014). Dessa forma, o uso de adições minerais (coloidais) refina os poros, tornando mais complexa e menos interconectada essa rede de poros.

Além disso, algumas características do cimento podem influenciar na durabilidade da matriz, por exemplo, cimentos com grande superfície específica podem levar a um alto calor de hidratação gerando um processo de fissuração (Mehta & Monteiro, 2006). Também é importante considerar a composição desse aglomerante, visto que nela pode ser encontrado MgO (devido impurezas no calcário) que reage com a água formando um produto expansivo (brucita), processo semelhante ocorre com o cálcio livre (CaO) (Mehta & Monteiro, 2006). Deve-se sempre considerar o ambiente de exposição do concreto ao se escolher o tipo de cimento, buscando minimizar os efeitos de intempéries no elemento.

3.2 Penetração de íons cloretos em matrizes cimentícias

Íons cloretos solubilizados são amplamente encontrados em ambiente marinhos. Os mesmos podem estar associados com diferentes cátions, como cálcio, magnésio e sódio. A concentração depende das características da água do mar, em geral para ambientes com salinidade de 35‰ a concentração de íons cloretos é em torno de 19 g/L (Dyer, 2014). Isso indica que cloretos representam mais de 55% da salinidade total da água do mar, sendo o íon em maior proporção (Castro & Huber, 2003). Esse agente agressivo também é encontrado em sais de degelo para rodovias.

Em regiões marítimas os cloretos podem ser encontrados na água e na atmosfera. O ambiente onde esse íon está diluído interfere no processo de penetração no concreto, na agressividade do ataque e nas consequências para a estrutura. Basicamente estão presentes em quatro zonas diferentes: submersa; flutuação de maré; respingo; spray (Bertolini, et al., 2004). A Figura 1 mostra essas diferentes regiões de agressividade possíveis.

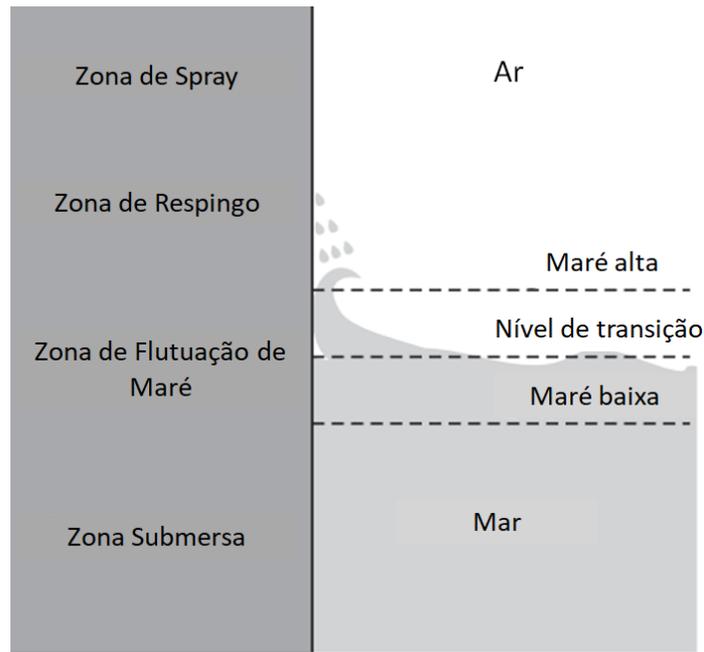


Figura 1 – Zonas de agressividade ao concreto em regiões marítimas.
 Fonte: Adaptado de Bertolini, *et al* (2004)

De forma geral, a penetração de íons cloretos na matriz de concreto é regida pela segunda Lei de Fick, onde se correlaciona o gradiente de concentração de um soluto no espaço com sua respectiva taxa de transferência, a qual varia no tempo (Sun, et al., 2012). Esse modelo de difusão é simplificado e genérico, mostrado na Equação 1, onde C define a concentração de soluto por espaço (x) e tempo (t), enquanto D é o coeficiente de difusividade.

$$\frac{dC}{dT} = D \frac{d}{dx} \left(\frac{dC}{dx} \right) \quad \text{Equação (1)}$$

O coeficiente de difusividade é uma constante que depende da natureza do soluto e da matriz cimentícia, sendo modificada pelo grau de saturação dos poros, a porosidade total e o tipo de cimento (Gjørv, 2009). O processo de penetração de um fluido por difusividade é consideravelmente lento. Poros menores, menos contínuos e mais tortuosos implicam em taxas de transferência mais brandas devido ao menor coeficiente de difusividade (Mays, 1997).

Além disso, o elemento que se liga ao íon Cl^- influencia no processo de difusão, podendo estar associado ao cálcio (CaCl_2) ou sódio (NaCl). A superfície dos poros de concreto é formada uma camada eletronegativa, assim o cátion associado ao íon cloro é atraído por essa superfície (Dyer, 2014). Dessa forma, quanto maior a carga iônica do cátion menor a concentração necessária do mesmo para suprir com a carga negativa da superfície dos poros. Então, quando a solução em contato com o concreto for CaCl_2 , por exemplo, será necessário uma menor

concentração de cátions cálcio para equilibrar com a carga negativa da superfície dos poros. Essa menor concentração promove o aumento a taxa de difusão do cátion. Como a solução nos poros tem que ser eletricamente neutra, balanceada com a mesma concentração de cátions e ânions, a taxa de difusividade do cloro também aumentaria. Assim entende-se que íons cloretos associados ao cálcio apresentam um processo de difusão mais rápido do que com sódio (Chatterji, 1994).

No entanto, raramente a difusividade ocorre de forma isolada e pura, visto que para isso é necessário que todos os poros estejam devidamente saturados (Bertolini, et al., 2004). Usualmente a água contendo cloretos também ingressa na matriz por capilaridade. Esse fluxo é determinado pela Equação 2, e depende do gradiente do volume da matriz saturada (θ) e do coeficiente de difusividade hidráulica (D) (Dyer, 2014). Esse coeficiente não é constante e varia com o volume saturado, então a taxa de transferência é acelerada à medida que a matriz é preenchida com solução.

$$\frac{d\theta}{dt} = \nabla D \nabla \theta \quad \text{Equação (2)}$$

A penetração por capilaridade ocorre principalmente nos estágios iniciais de ataque, sendo que a mesma pode ser intensificada pela presença de ciclos de secagem-molhagem, como ocorre em zonas de respingo e flutuação de maré (Gjørsv, 2009; Dyer, 2014). Durante esses ciclos, o estágio de molhagem fornece íons cloretos para a matriz e os mesmos são depositados nos poros durante a secagem. Quanto mais rigorosa for a eliminação da água no período de seca, maior será o nível de água absorvida no próximo estágio, levando a um coeficiente de difusividade mais acentuado e taxas de transferência maiores (Dyer, 2014). Uma consequência desse processo cíclico é maiores concentrações de Cl^- na superfície, pois os poros não saturados transportam os íons mais vagorosamente. Para superfícies imersas, o ingresso do agente em maiores profundidades do concreto é intensificado (Bertolini, et al., 2004).

O cloreto que ingressa a matriz pode se combinar química ou fisicamente aos produtos de hidratação do concreto, sendo um processo não expansivo e sem prejuízos a matriz. Apenas os íons cloro que se encontram livres podem contribuir para o início do processo de corrosão. Esse cloreto combinado pode estar adsorvido ao C-S-H ou na forma de sal de Friedel, obtido pela reação do monossulfato com o cloro livre. Apesar de o íon cloro ter uma maior capacidade de se combinar química do que fisicamente, o C-S-H é o produto de hidratação em maior proporção na matriz cimentícia, por isso a maior parte do cloreto combinado provavelmente

encontra-se nessa forma (Dyer, 2014). A Equação 3 indica a reação de formação do sal de Friedel.



A formação de cloretos combinados ainda interfere na porosidade da matriz e sua conectividade, dessa forma entende-se que o coeficiente de difusividade não é necessariamente uma constante e também varia com o tempo, diminuindo à medida que os íons cloro se combinam (Sun, et al., 2012; Pack, et al., 2010). Ressalta-se que os cloretos combinados não são completamente estáveis, já que quedas no pH para valores inferiores a 12,6 podem levar à dissolução do cloro combinado, liberando íons cloro que estavam quimicamente ligados ao C_3A ou fisicamente ao C-S-H (Glass & Buenfeld, 1997).

A capacidade de uma matriz de concreto formar cloretos combinados depende da presença de adições minerais, umidade, temperatura e de qual área de exposição está inserida (Zuquan, et al., 2018). As zonas de spray e respingo ficam expostas aos íons cloreto de forma intermitente, e por isso possuem menor capacidade de formação de cloretos combinados do que a região submersa (Zuquan, et al., 2018). A dificuldade do cloreto se combinar aos produtos de hidratação do concreto implica em maior concentração de íons cloro livre, o que contribui para que as regiões de respingo e spray sejam mais agressivas ao concreto.

Apesar dos íons Cl causarem prejuízo a estruturas pela despassivação de sua armadura, sabe-se que existe um valor mínimo de concentração necessário para que isso ocorra, definido como teor crítico (Page & Page, 2007). Esse pode ser expresso na forma de concentração máxima de cloretos na matriz ou com relação à taxa $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ (Broomfield, 2007). Esse último parâmetro é atualmente mais utilizado na literatura visto que a concentração de hidroxilas afeta diretamente na formação do filme de passivação nas barras de aço, enquanto o cloro é um catalisador no processo inverso (Dyer, 2014).

Conhecendo a dinâmica do processo de penetração de cloretos, entende-se que o teor crítico de cloreto depende de uma série de fatores e é diferente para cada tipo de concreto. O mesmo é influenciado principalmente pelo pH da matriz, visto que altera a concentração de hidroxilas (Bertolini, et al., 2004). Além disso, a capacidade dessa matriz formar cloretos combinados afeta na concentração de íons livres e conseqüentemente no teor crítico. Isso está relacionada ao pH, saturação dos poros, composição do cimento e temperatura (Dyer, 2014; Hussain, et al., 1995). Por fim, o teor crítico de cloreto depende do potencial eletroquímico da

barra, que está relacionado à umidade e oxigênio disponível para que ocorra a corrosão (Broomfield, 2007; Bertolini, et al., 2004).

3.2.1 Corrosão

Para entender o processo de corrosão é importante conhecer a camada de passivação que protege as barras de aço no concreto armado. Basicamente, os poros do concreto estão preenchidos com uma solução altamente alcalina, que na presença de oxigênio, forma um filme de óxidos sobre a superfície das barras deixando-as impermeáveis (Gjørsv, 2009). A camada de passivação é formada por um filme mais interno de óxido ferroso e outro mais externo de óxido férrico (Mehta & Monteiro, 2006). Essa camada é extremamente fina, 1µm, e impede que o processo de corrosão se inicie (Dyer, 2014). A Figura 2 mostra uma representação esquemática da camada de passivação. Para a total integridade da armadura é fundamental a estabilidade dessa camada de proteção que é afetada pela: diminuição do pH (<10); depleção de oxigênio; e pela presença de íons dissolvidos, como cloretos (Page & Page, 2007).

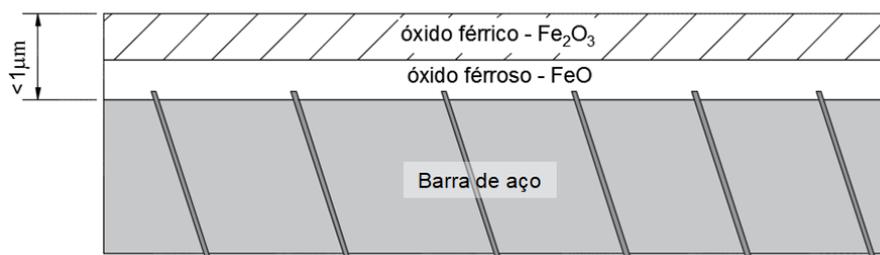
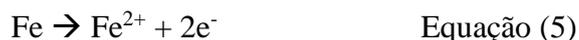


Figura 2 – Representação do duplo filme de óxidos na camada de passivação

O processo de despassivação induzido pela penetração de cloretos consiste na reação do ânion cloro com o cátion ferro proveniente dos óxidos que formam a camada de passivação, óxido férrico (Fe_2O_3) e óxido ferroso (FeO), descrito pela Equação 4. No entanto, o produto formado por essa reação é solúvel. Dessa forma, o material é removido do filme de proteção, criando áreas expostas (Dyer, 2014).



As regiões não mais protegidas se tornam zonas ativas, agindo como ânodos (Equação 5), enquanto que nas áreas com filme de passivação íntegro ocorre reações catódicas (Equação 6). Nesse ponto é importante que o concreto se encontre úmido para atuar como eletrólito. O processo de corrosão catalisado pela presença de cloretos é eletroquímico e pontual, sendo denominado *pitting* (Bertolini, et al., 2004). Essa é a principal diferença da corrosão promovida pela carbonatação, que é generalizada e uniforme.



As zonas anódicas e catódicas formam um fluxo de corrente com conseqüente formação de produtos do tipo $\text{FeO}(\text{H}_2\text{O})_x$, sendo esses expansivos e responsáveis pela cor alaranjada (ferrugem). Dependendo do estágio de corrosão, pode ocorrer um aumento de volume de seis vezes em relação ao ferro, caso do $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Os produtos mais comumente encontrados ($\text{Fe}(\text{OH})_2$ e $\text{Fe}(\text{OH})_3$) ocupam um volume em torno de quatro vezes maior do que o original (Mehta & Monteiro, 2006). Ressalta-se que o tempo para se iniciar o processo de corrosão depende do teor crítico do concreto, e as condições do sistema determinam a resistência do mesmo ao processo de despassivação (Broomfield, 2007).

Observa-se na Figura 3 um esquema sobre o processo de corrosão iniciado pela penetração de cloretos. Na imagem pode-se verificar que a perda de elétrons é acompanhada pelo ganho de íons cloro, como indicado na Equação 4, e a zona corroída é formada por água, ferro e cloro. Ainda, as principais conseqüências da corrosão de armaduras é a diminuição de sua seção, podendo levar a prejuízo estrutural, além de fissuras e lascamento que permitem a entrada de novos agentes agressivos (Young, et al., 1998; Geng, et al., 2010).

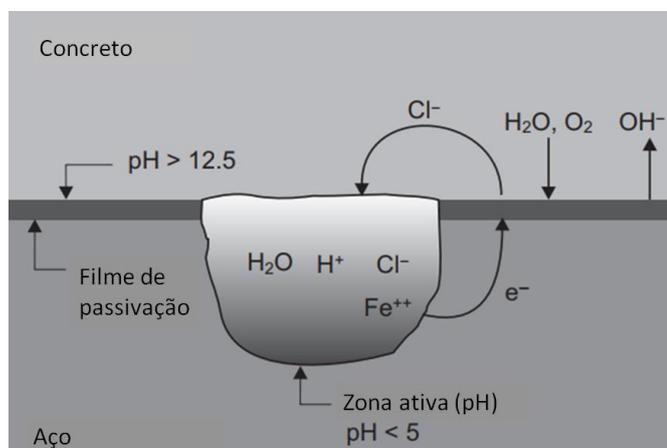


Figura 3 – Representação esquemática do processo de corrosão por *pitting*
 Fonte: Adaptado de Bertonilli *et al* (2004)

3.2.2 Ataques químicos combinados

A maioria das estruturas de concreto armado está sob ação combinada de diversos tipos de ataque, seja eles físicos ou químicos. Essa ação combinada intensifica a deterioração dos elementos. A combinação de qualquer ataque físico em estruturas submetidas à ação de cloretos, ou qualquer outro ataque químico, atua sempre no aumento da porosidade que permite maior ingresso de agentes agressivos (Dyer, 2014). No entanto, quando ocorrem dois processos de deterioração química simultaneamente é necessário compreender as influências.

A ocorrência de ataque de cloretos concomitantemente a carbonatação é uma situação muito comum em regiões marítimas, principalmente nas zonas de flutuação de maré, respingos e spray, visto que nessas localidades os poros não estão saturados com água permitindo a entrada do CO₂ (Wang, et al., 2017). Primeiro é necessário entender que a carbonatação é um processo químico, no qual o CO₂ penetra os poros do concreto e reage principalmente com o hidróxido de cálcio formando carbonato de cálcio. Esse processo reduz o pH da matriz a valores inferiores ao necessário para conservação da camada de passivação deixando a armadura desprotegida (Page & Page, 2007).

Quando o concreto está submetido a carbonatação e penetração de cloretos, a corrosão da armadura é muito mais rápida. Ambos os processos envolvem a cristalização de elementos e modificam potencialmente as propriedades do concreto, principalmente a estrutura dos poros, que influencia na penetração de mais agentes agressivos (Ye, et al., 2016). Inicialmente, com o ingresso de íons Cl há a formação de cloretos combinados (como sal de Friedels), que reduz a permeabilidade da mistura devido ao refinamento dos poros. Dessa forma, pode-se notar um certo aumento da resistência à carbonatação desse elemento, visto que há impedimentos para entrada de CO₂ (Liu, et al., 2016; Wang, et al., 2017).

Apesar de na carbonatação também ocorrer o refino de poros devido a formação de CaCO₃, a queda de pH promovida pela penetração de CO₂ reduz a estabilidade dos cloretos combinados (como sal de Friedel) e aumenta a concentração de íons cloro livre (Liu, et al., 2017). Assim, a carbonatação leva ao aumento do transporte de Cl⁻ e a concentração de íons livres (Zhu, et al., 2016). Além disso, a queda de pH promovida na carbonatação acarreta a diminuição do teor crítico de cloretos, sendo necessário menos íons cloro livre para eliminar a camada de passivação da armadura (Hausmann, 1967)

Com uma menor frequência, a penetração de cloretos ocorre de forma simultânea ao ataque de sulfatos. Os mecanismos envolvendo deterioração por sulfatos são diferentes para cada cátion associado, no entanto, em todos os casos há formação de etringita (produto expansivo) e consumo de Ca(OH)₂, reduzindo o pH (Skalny, et al., 2011). Apesar de raramente a estrutura ser atacada, simultaneamente e na mesma proporção, por cloretos e sulfatos, sua atuação simultânea é complexa visto que seu processo de mitigação é oposto. A formação de etringita depende de C₃A disponível, por isso ambientes ricos em sulfatos utilizam cimentos com baixo teor desse componente.

3.2.3 Análise experimental

Ensaio laboratoriais não são totalmente capazes de simular as condições normais de ataque de cloretos, visto que o ambiente externo não é constante e os mecanismos de penetração de íons ocorrem de forma simultânea. No entanto, experimentos são capazes de isolar parte do fenômeno e assim mapear sua ocorrência. Os ensaios de penetração de cloretos são divididos naqueles de curto e longo prazo. Apesar de ambos serem processos acelerados, a sua duração é diferente, assim como o seu resultado. Existe uma infinidade ensaios em laboratórios possíveis, no entanto, serão abordados os três principais métodos para se mapear a difusão de cloretos em concreto: *Salt Ponding Test*; *Bulk Diffusion Test*; e *Rapid Chloride Permeability Test*.

Um dos ensaios mais antigos nesse sentido é o denominado *Salt Ponding Test*, regulado pela AASHTO T259 (AASHTO, 1980). A metodologia básica do ensaio consiste em criar um dique sobre uma placa de concreto (75 x 300 mm), sem preparação prévia, que será preenchido com uma solução de 3% de NaCl, promovendo assim um ataque unidirecional por 90 dias. A Figura 4 mostra esquematicamente como ocorre o procedimento de teste. A utilização de uma placa de concreto com os poros não saturados e a exposição a um ambiente com 50% de umidade intensificam a penetração de cloretos por capilaridade e tornam os resultados de difusividade desse ensaio superestimados (Stanish, et al., 1997).

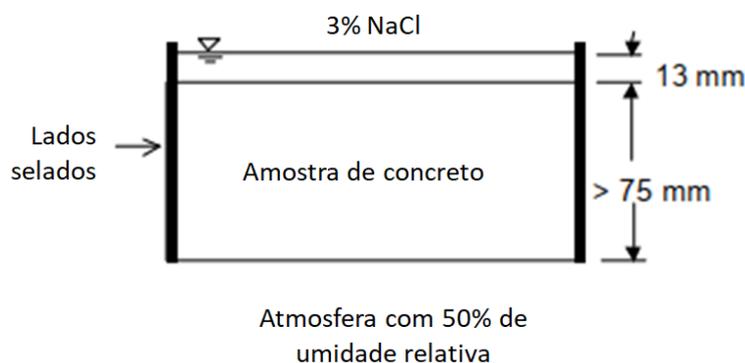


Figura 4 – Disposição do ensaio de Salt Ponding Test
Fonte: Adaptado de Stanish, Hooton e Thomas (1997)

Quanto ao ensaio de *Bulk Diffusion Test*, normatizado pela NT Build 443, esta busca sanar com algumas das falhas deixadas pelo método da AASHTO (Nordtest, 1995). Basicamente consiste em utilizar corpos de prova cilíndricos preparados em solução saturada com cal até constância de massa. Após isso os mesmos são selados em todas as faces (exceto a que será exposta) e imersos em um tanque com solução de 16,5% de NaCl por um período mínimo de 35 dias. A Figura 5 apresenta de forma esquemática a organização do ensaio. Nesse método, a penetração de cloretos também é unidirecional e a saturação dos poros garante melhor

aproximação para modelo dos efeitos da difusão pura, no entanto, o teste ainda é de longa duração, sendo esse um limitador.

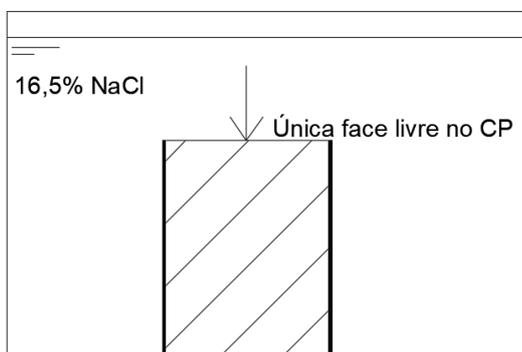


Figura 5 – Esquema dos corpos de prova imersos em solução no ensaio de Bulk Diffusion

O ensaio de *Rapid Chloride Permeability Test*, regido pela norma ASTM C1202 (ASTM, 2005) e AASHTO T277 (AASHTO, 2015), consiste em colocar um disco de concreto (profundidade de 50mm) entre duas câmaras, uma com solução de 0,3% de NaOH e outra com solução de 3% de NaCl. Aplica-se uma voltagem de 60v e são realizadas leituras da corrente a cada 30 minutos, utilizando um multímetro. O corpo de prova deve ficar entre essas duas células por um período de 6 horas. O esquema do ensaio é apresentado na Figura 6 (AASHTO, 2015; ASTM, 2005). A principal vantagem desse ensaio frente aos anteriores é o tempo de realização reduzido. No entanto, ressalta-se que nele não é medida a permeabilidade a cloretos e sim a resistividade (razão entre voltagem e corrente). Além disso, a corrente que é transmitida está relacionada ao transporte de todos os íons (não apenas cloretos) e a alta voltagem aplicada altera a temperatura do concreto o que aumenta a corrente transmitida (Stanish, et al., 1997). Esse ensaio possui uma boa correlação com ensaios de longa duração, apesar de apresentar valores conservadores (McGrath & Hooton, 1999).

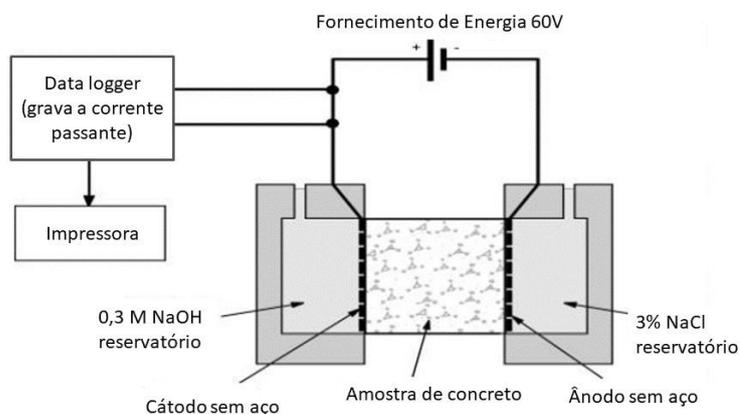


Figura 6 – Esquema prático do ensaio *Rapid Chloride Permeability Test*
Fonte: Adaptado de Stanish, Hooton e Thomas (1997)

3.3 Escória de Aciaria

Em 2017, o Brasil produziu 34,4 milhões de toneladas de aço, sendo o nono maior produtor mundial (IABR, 2018). A indústria siderúrgica é responsável por grande geração de resíduos e coprodutos, como a escória de aciaria. Para entender as características desse material é importante compreender o processo de produção do aço. Basicamente, existem duas rotas de refino na produção de aço: pela aciaria de arco elétrico (semi-integrada); ou pela aciaria de conversor a oxigênio, também conhecida como processo de Linz-Donawitz (integrada). A principal diferença desses processos é que indústrias com conversor a oxigênio utilizam apenas minério de ferro para produção do aço, enquanto as semi-integradas parte da fusão de materiais metálicos (sucata, gusa, entre outros).

De forma geral, a produção do aço é composta pelas etapas de refino, lingotamento e laminação. No caso das usinas com conversor a oxigênio é adicionada a etapa de redução. Durante essa cadeia produtiva são obtidos diversos resíduos como a escória de alto forno, no processo de redução, etapa onde o minério de ferro é transformado em ferro gusa. Já no momento do refino, fusão do ferro gusa e dos materiais metálicos para obtenção do aço, obtidas duas escórias: a de aciaria, durante o processo inicial; e a de forno panela, no refino secundário.

Devido ao processo produtivo, a escória de aciaria possui algumas características próprias como a superfície rugosa, elevada massa específica e boa resistência quando avaliada no teste de abrasão (Toffolo, 2015). Além disso, no refino são adicionados fundentes, como calcário e dolomita, para eliminar as impurezas do aço (enxofre e fósforo), a consequência é que as escórias geradas possuem teores significativos de CaO e MgO. Devido ao processo produtivo existem diferenças na dosagem necessária desses elementos o que implica em variações na composição. A Tabela 1 apresenta a composição química média dos dois tipos de escória de aciaria.

Tabela 1 – Composição química média da escória de aciaria nas siderúrgicas brasileiras (Fonte: IBS (1999) apud Oliveira (2006))

	Escórias de aciaria Linz-Donawitz	Escoria de aciaria arco elétrico
CaO (%)	35,0-47,0	12,0-65,0
MgO (%)	5,5-12,5	3,0-16,9
Al ₂ O ₃ (%)	0,8-4,0	1,0-7,7
SiO ₂ (%)	11,0-15,5	8,0-20,4
MnO (%)	2,1-6,6	3,0-7,3
Fe (%)	14,1-22,3	7,0-35,0
S (%)	0,1-0,3	0,1-3
P ₂ O ₅ (%)	0,7-2,8	0,3-0,7

Os óxidos de cálcio e magnésio possuem alta reatividade e na presença de água se hidratam formando produtos com volume maior do que os originais. A transformação do MgO em brucita ($Mg(OH)_2$) gera uma variação de volume de 119,5% (Machado, 2000). Devido a essa expansibilidade, as escórias são submetidas a processos de estabilização, expostas ao tempo. Para acelerar essa intemperização podem-se utilizar ciclos de molhagem (Toffolo, 2015). Diversos trabalhos já comprovaram a eficiência dos processos de intemperização para mitigar compostos expansivos (Diniz, et al., 2017; Silva, et al., 2016).

3.3.1 Escória de aciaria em concretos

Devido às boas propriedades mecânicas da escória de aciaria o material vem sendo incorporado a concretos na forma de agregados (em todas as frações) ou como adição mineral. Monosi *et al* (2016) utilizaram escória de aciaria de arco elétrico em substituição total ao agregado graúdo e parcial ao agregado miúdo (até 42%). Com 28 dias, os concretos com maiores incorporações de resíduos e classe de resistência média de 35 MPa tiveram as maiores resistências à compressão, chegando a ser 41% superior ao de referência. Também utilizando total substituição dos agregados graúdos e parcial dos miúdos em 30%, San-José *et al* (2014) produziram concretos com resistência à compressão superior aos convencionais em 36,5%.

De forma geral, todas as propriedades mecânicas do concreto tendem a apresentar uma melhora com a substituição dos agregados. Diversos estudos observaram a resistência a tração e módulo de elasticidade crescente acompanhando resultados de compressão (Anastasiou, et al., 2014; Monosi, et al., 2016; San-José, et al., 2014). A incorporação de agregados graúdos de escória de aciaria em concretos de alto desempenho com adições minerais, tais como sílica ativa e escória granulada de alto forno, também geraram melhores resistências a compressão, sendo superiores aos convencionais de alto desempenho em 24% e 17,7%, respectivamente (Biskri, et al., 2017).

Com relação às propriedades físicas dos concretos produzidos com escória de aciaria, os mesmos sempre possuem massa específica superior aos convencionais devido a elevada massa específica do agregado (Monosi, et al., 2016; San-José, et al., 2014; Manso, et al., 2006; Carvalho, et al., 2017). Sabendo da importância do desenvolvimento de produtos duráveis, as pesquisas com relação à escória de aciaria começaram a avaliar seu desempenho em longo prazo.

Quando concretos com agregado de escória de aciaria foram avaliados com relação à reação álcali-agregado, estes apresentaram expansões inferiores ao limite de 0,2% definido por norma para agregados deletérios (Manso, et al., 2006). Já ao avaliar a expansibilidade de concretos com escória, em ensaios de autoclave, o comportamento dos mesmos foi similar ou inferior ao convencional (Santamaria, et al., 2018; Manso, et al., 2006).

Santamaria *et al* (2018) avaliou a resistência a cloretos de concretos com total substituição dos agregados graúdos por escória de aciaria. O autor expôs os corpos de prova em regiões marítimas por cinco anos e no final aspergido indicador de nitrato de prata. Os concretos com escória tiveram melhor desempenho do que os convencionais. Ainda nesse trabalho, foram realizados em laboratório ensaios de corrosão, onde os concretos produzidos com escória foram classificados com corrosão moderada e os convencionais com alta. No entanto, existem estudos que divergem desses resultados, onde matrizes cimentícias fabricadas com escória de aciaria, na forma de agregado ou adição mineral, apresentaram menor resistência à penetração de íons cloretos e conseqüente maior risco de corrosão em testes laboratoriais e em campo (Biskri, et al., 2017; Arribas, et al., 2014; Wang, et al., 2013).

Ainda visando à reutilização do resíduo e melhorar as qualidades do concreto, a escória de aciaria foi incorporada em blocos estruturais e *pavers* de pavimentação de concreto (Silva, et al., 2016; Carvalho, et al., 2017). Além disso, há estudos sobre a propriedade cimentante da escória de aciaria quando utilizada como adição mineral. Concretos produzidos com 10% de substituição de cimento por escória de aciaria apresentaram resistências aos 90 dias superiores aos convencionais em torno de 11% (Roslan, et al., 2016). Outros estudos com utilização de escória de aciaria em frações finas apresentaram resistências equivalentes aos convencionais (Wang, et al., 2013; Shi, et al., 2017). Qiang e Peiyu (2010) avaliaram o processo de hidratação da escória de aciaria, observando a formação de produtos de hidratação semelhantes aos do cimento. Adicionalmente, quanto mais finamente cominuída a escória de aciaria, maior sua superfície específica e conseqüentemente sua reatividade.

4 METODOLOGIA

O programa experimental tem como objetivo avaliar as propriedades mecânicas, físicas e a durabilidade de concretos produzidos com agregado e adição mineral de escória de aciaria quando sujeitos ao ataque por cloretos. As etapas envolvidas estão descritas na Figura 7.

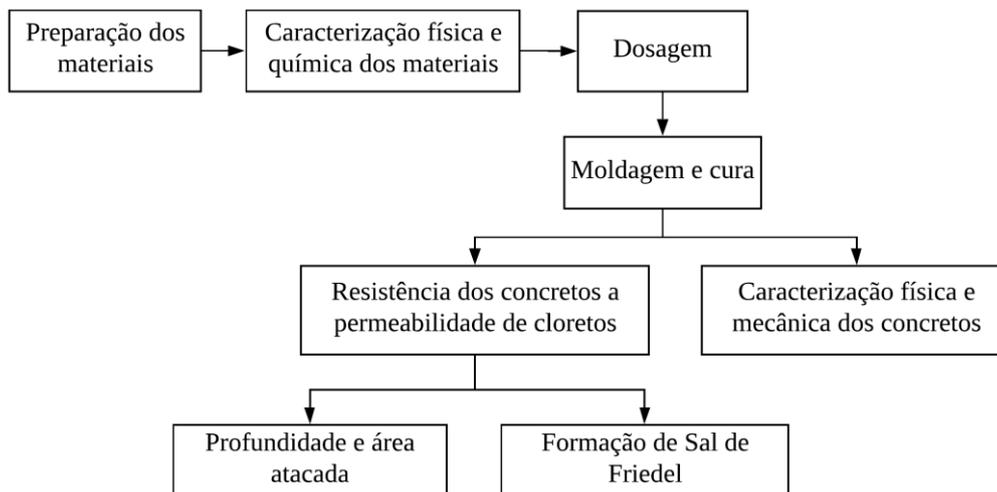


Figura 7 – Fluxograma das etapas do programa experimental proposto

4.1 Materiais

Para a elaboração dos concretos foi escolhido o cimento CP IV RS 32. A opção por um cimento pozolânico e resistente a sulfatos ocorre a fim de garantir estruturas duráveis não apenas a cloretos como também a ataque de sulfatos e reação álcali-agregado. O material possui massa unitária de 0,94g/cm³ e a composição química desse material, obtida por fluorescência de Raios-x (equipamento PANalytical Epsilon3^x), é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Fluorescência de raio-X do cimento CP IV RS 32

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	Outros
CP IV	19,2%	5,5%	64,5%	4,3%	0,8%	0,9%	3,6%	0,3%	0,4%	0,5%

Quanto aos agregados utilizados na pesquisa, para os traços de referência foram adotados a areia de rio proveniente de Ponte Nova (MG), e brita de gnaiss. Para os concretos fabricados com escória de aciaria foram utilizados o resíduo proveniente de uma siderúrgica com processo do tipo Linz-Donawitz localizada em João Molevade (MG). A escória de aciaria LD foi intemperizada em pilhas sujeitas a ciclos de molhagem e secagem por 4 anos. Esse resíduo tem que ser beneficiado para produzir a adição mineral e os agregados utilizados. Como os concretos serão moldados em corpos de prova cilíndricos de 5x10 cm, o agregado graúdo

convencional e a escória de aciaria LD foram adquiridos na granulometria de brita 0 e 00 (respectivamente DMC 12,5mm e 9,5mm), para garantir o atendimento a NBR 5738 (2015) que exige que o DMC do agregado graúdo seja um terço do diâmetro do corpo de prova.

A Figura 8 apresenta as curvas granulométricas dos materiais ao serem adquiridos. As regiões demarcadas representam os limites da NBR 7211:2009 para as zonas ótimas de agregado graúdo (DMC 12,5mm) e miúdo. Nota-se que nenhum agregado atende aos limites estabelecidos por norma. Por isso, todos foram submetidos a beneficiamento para se adequarem a norma e serem granulometricamente idênticos.

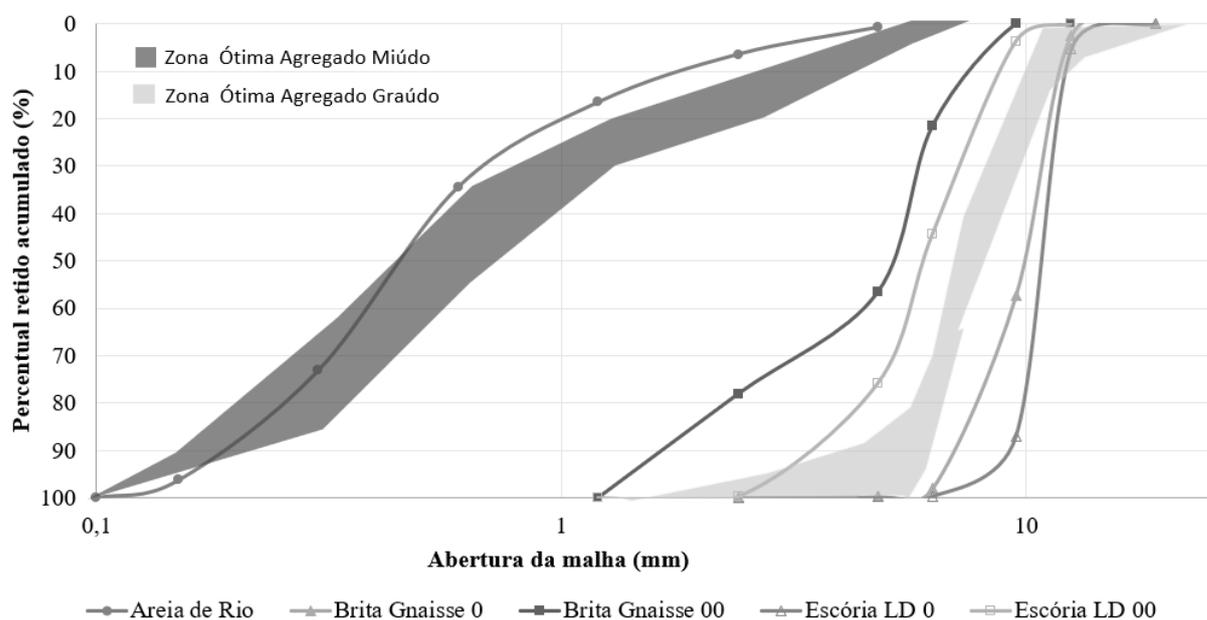


Figura 8 - Curvas granulométricas dos agregados utilizados ao serem recebidos

Metacaulim e sílica ativa foram adotados como referência para adições minerais escolhidos por influenciarem na durabilidade do concreto através do refinamento dos poros, visto que são pozolanas. Além disso, são as adições minerais mais vendidas e utilizadas no Brasil. Para fabricação dos concretos, também foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento público de Ouro Preto, e aditivo superplastificante de terceira geração (eter policarboxílico, MC Bauchemie Powerflow 1180). O aditivo foi escolhido para permitir uma redução no fator água/cimento dos concretos sem perda de trabalhabilidade. Essa busca é necessária principalmente para os concretos com escória de aciaria, já que esse material tem uma massa específica maior, atribuída principalmente a sua composição química e a presença de óxidos metálicos, Fe_2O_3 (Silva, et al., 2016).

4.2 Métodos

O programa experimental foi dividido em seis etapas, que vão do beneficiamento inicial da escória de aciaria até a caracterização dos concretos fabricados. Inicialmente foi realizada a preparação de todos os materiais a serem utilizados na fabricação dos concretos, que posteriormente foram caracterizados de acordo com suas propriedades físicas, químicas e morfológicas. Com essas informações os concretos foram dosados, moldados em corpos de prova e mantidos em condições constantes de cura. Posteriormente, os corpos de prova de concreto foram caracterizados de acordo com suas propriedades físicas e mecânicas, além da resistência à penetração de cloretos.

4.2.1 Preparação dos materiais

Para produção de agregado miúdo de escória de aciaria, o material coletado no depósito de armazenamento foi cominuído em um triturador de mandíbulas (Retsch BB 200). Posteriormente, foi submetido a um processo de separação da fração magnética por via seca em rolo magnético (Inbras CC Ø12 x 12, intensidade 5000 Gauss). Foram realizadas três repetições, onde eram obtidos as frações não-magnética e magnética, sendo essa última descartada. A escória de aciaria já processada foi separada gravimetricamente a fim de se obter uma curva granulométrica compatível com a zona ótima da NBR 7211 (ABNT, 2009).

Para a produção dos agregados graúdos de escória de aciaria não foram necessários processos de cominuição. O material foi submetido a separação da fração magnética e gravimétrica a fim de produzir um agregado graúdo com curva granulométrica compatível as exigências normativas, NBR 7211 (ABNT, 2009).

Os agregados convencionais foram submetidos à separação gravimétrica a fim de que todos estivessem com curva granulométrica idêntica aos agregados de escória de aciaria, sendo também adequada a zona ótima, NBR 7211. Assim, é possível produzir concretos fisicamente semelhantes e entender a real influência da composição do material nas suas propriedades.

Para a produção da adição mineral de escória de aciaria o material foi inicialmente moído e submetido a processo de separação magnético, como na produção do agregado miúdo de escória de aciaria. O produto desse processo foi segregado em uma peneira de 4,75 mm de abertura, sendo a fração passante cominuída em um moinho de bolas (Marconi MA500) por 3 horas a 200 RPM utilizando esferas de aço inox. Após esse processamento, o material foi novamente refinado em um moinho planetário (Retsch PM100), com jarro e esferas de zircônio,

por 15 minutos a 400 RPM, sendo então obtida a adição mineral de escória de aciaria, denominado powder LD.

4.2.2 Caracterização dos materiais

A escória de aciaria LD recebida foi caracterizada quanto ao seu teor de material magnético antes de qualquer processo de beneficiamento. A escória de aciaria foi submetida ao ensaio de determinação do teor de material magnético, baseado no Protocolo RECICLOS #1 (Santos, 2015). Nesse ensaio, uma massa inicial conhecida por escória de aciaria foi passada no rolo magnético (Inbras CC Ø12 x 12, 5000 Gauss), sendo separada em frações magnética e não-magnética. Ambas as frações foram pesadas e a fração magnética foi armazenada enquanto que a não-magnética retornava ao equipamento para um novo ciclo de separação. Esse processo foi repetido sucessivamente até que o material retido no separador (fração magnética) fosse inferior a 0,1% da massa inicial de escória de aciaria. Por fim, a massa unitária das frações magnética e não magnética foram determinadas.

A composição química das frações magnética e não-magnética foram obtidas por fluorescência de raio-X (PANalytical Epsilon3x). Para tanto, uma amostra foi cominuída por 180 minutos em moinho de bolas (jarro e esferas de aço inox, 200 RPM) e 15 minutos em moinho planetário (jarro e esferas de zircônio, 400 RPM). Esse processo gerou um material passante na peneira de 0,045mm de abertura.

Além disso, a fração não-magnética foi submetida a uma avaliação mineralógica através da técnica de difração de Raios-X (Bruker D2 Phaser) com tubo de $\text{CuK}\alpha$, tensão de 45kV, 40mA, velocidade de giro de 8rpm, 2θ variando de 6-80° com passo de 0,02° e tempo de 1 segundo por passo. A fim de fazer uma análise quantitativa, foi adicionado 10% de fluorita em massa como padrão interno. Para identificação das fases mineralógicas e aplicação do método de refinamento de Rietveld foi utilizado o software Topas 5.0 com a Crystallography Open Database (COD) de 2013. O objetivo desse ensaio é verificar teores de FeO e a eficiência do processo de intemperização na hidratação dos compostos expansivos (CaO e MgO).

Os agregados produzidos foram caracterizados de acordo com suas propriedades físicas. A Tabela 3 apresenta as propriedades analisadas para os agregados e as normas utilizadas. No processo de caracterização não houve distinção entre os agregados de escória de aciaria e os convencionais.

Tabela 3 – Relação dos ensaios de caracterização física para os agregados

	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo
Massa específica	NBR 9776:1987 (ABNT, 1987)	NBR NM 53:2009 (ABNT, 2009)
Massa unitária	NBR NM 45:2006 (ABNT, 2006)	
Absorção de água	-	NBR NM 53:2009 (ABNT, 2009)
Material pulverulento	NBR NM 46:2003 (ABNT, 2003)	
Granulometria	NM 248:2003 (ABNT, 2003)	

Além dos ensaios descritos na *Tabela 3*, os agregados graúdos foram caracterizados quanto a sua resistência ao esmagamento. O ensaio consiste basicamente em preencher um embolo cilíndrico com agregado graúdo na granulometria de 9,5mm e aplicar uma força até 400 kN, posteriormente verifica-se qual a porcentagem desse material fica retido na peneira de 2,4mm. Dessa forma a resistência do agregado ao esmagamento é igual a porcentagem de material passante na peneira de 2,4mm. Esse ensaio mede indiretamente a resistência do agregado graúdo através da sua capacidade de se manter íntegro sob uma determinada carga.

Adições minerais (sílica ativa, metacaulim e powder LD) foram caracterizadas de acordo com sua morfologia, propriedades físicas e composição química. As características físicas avaliadas nas adições minerais foram: massa específica (NBR 16605:2017), massa unitária (NBR NM 45:2006) e a granulometria. A distribuição granulométrica foi obtida através da técnica de difração de laser (Bettersize 2000) usando água destilada como meio dispersor. Para o cimento CPIV, a granulometria foi obtida com a mesma metodologia, usando álcool isopropílico como meio dispersor.

A composição química dos materiais utilizados como adição foi obtida por fluorescência de raio-X (PANalytical Epsilon3x). Para preparação das amostras, as adições minerais foram submetidas a separação gravimétrica utilizando os materiais passantes na peneira de abertura 75µm. A morfologia das partículas foi observada por meio de imagens obtidas com um microscópio eletrônico de varredura (TESCAN Vega3). Para tanto, as amostras foram fixadas em *stubs* com fita de carbono e recobertas com pó de ouro (Quorum Q150T). Uma amostra do cimento utilizado foi avaliada quanto a morfologia através do microscópio eletrônico de varredura (TESCAN Vega3), sendo fixada com fita carbono em *stub* e metalizada com pó de ouro (Quorum Q150T).

Para o aditivo, o ponto de saturação foi obtido considerando cada combinação proposta de tipo e teores de adição mineral, sendo realizado o ensaio adaptado de Aitcin (2000) e

Carvalho *et al* (2019). O procedimento consiste em utilizar uma pasta de cimento, adição mineral e água, variando o teor de aditivo. Essa mistura foi vertida em um viscosímetro Ford com abertura de diâmetro de 4 mm, sendo determinado o tempo para que toda a pasta flua. Esse ensaio correlaciona a viscosidade da mistura com o teor de aditivo no tempo. Para obtenção da pasta, inicialmente foi feito a homogeneização de 200 g de cimento com a adição mineral avaliada, na proporção pretendida nos traços de concreto. Para todas as adições, foi utilizado um fator água/aglomerantes de 0,4. Para a mistura foi utilizado um misturador elétrico Philips Walita RI7632. A mistura foi feita em duas etapas. Iniciou-se com uma mistura de 30 segundos de metade de todos os materiais, executou-se a raspagem da pasta das paredes do misturador e adicionou o restante dos materiais homogeneizando por mais 1 minuto.

4.2.3 Estudo de dosagem e fabricação do concreto

Com o objetivo de fabricar concretos fisicamente iguais e com a menor variação de parâmetros possíveis, foram fixados dois consumos de cimento: 310kg/m³ e 450kg/m³. Dessa forma, foi garantido que concretos com adições diferentes terão a mesma proporção de produtos de hidratação devido o cimento. Para composição do traço, utilizou-se a metodologia do Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT) adotando um teor fixo de argamassa de 59%. O fator água/aglomerantes (a/agl) foi fixado para todos os concretos de mesmo consumo de cimento e o slump foi definido como 90 mm com tolerância de 10 mm definido pela NBR 7212 (ABNT, 2012).

Quanto à porcentagem de adições, os valores adotados partiram das sugestões do fabricante. Para a sílica ativa foi recomendado dosagem de 5% a 8% e para o metacaulim de 9% a 14%, em volume. A quantidade de cimento não foi substituída pelas adições, considerando melhorar o desempenho da matriz e a induzir maior durabilidade. Foram adotados os teores limites superiores de cada adição comercial a fim de fabricar matrizes mais duráveis. O powder LD foi utilizado nos teores de 8% e 14%, em volume, a fim de se obter matrizes fisicamente iguais as fabricadas com as adições minerais comerciais (mesmo volume de adição), podendo correlacionar os resultados dos concretos fabricados.

Com essas considerações foram produzidos traços tratados como blocos inteiramente casualizados a partir do tipo de agregado. Foram definidos traços de referência (agregado e adição convencional), de escória de aciaria (agregado e adição de escória de aciaria) e os mistos (agregado ou adição de escória de aciaria). A Tabela 4 apresenta as proporções dos concretos fabricados em relação ao consumo de cimento. Cada traço recebeu identificação no qual a o

código inicial corresponde ao tipo de agregado (REF: referência e ELD: escória de aciaria LD), seguida da adição utilizada: sílica ativa (SA), metacaulim (MC), powder LD 8% (P8) e powder LD 14% (P14). Os últimos três números são referentes ao consumo de cimento daquele traço.

Tabela 4 - Traços dos concretos em relação ao consumo de cimento

Código	Água/aglomerantes	Cimento (kg/m ³)	A. Miúdo (kg/m ³)	A. Graúdo (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Adição (kg/m ³)	Aditivo (%)
REF-SA-310	0,62	310	930,06	861,74	201,82	15,51	0,90
REF-MC-310		310	919,64	854,49	206,99	23,86	0,60
REF-P8-310		310	908,85	846,99	213,46	34,29	0,35
REF-P14-310		310	874,09	822,85	229,4	60	0,15
ELD-SA-310		310	1361,16	1161,31	201,82	15,51	0,70
ELD-MC-310		310	1345,25	1150,26	206,99	23,86	0,70
ELD-P8-310		310	1330,80	1140,21	213,46	34,29	0,30
ELD-P14-310		310	1281,23	1105,77	229,10	60	0,25
REF-SA-450	0,44	450	788,56	860,69	207,00	22,52	0,45
REF-MC-450		450	774,49	850,91	213,24	34,64	0,45
REF-P8-450		450	764,40	843,90	219,90	49,77	0,20
REF-P14-450		450	723,78	815,67	236,32	87,10	0,05
ELD-SA-450		450	1180,44	1133,02	207,91	22,52	0,48
ELD-MC-450		450	1162,65	1120,65	213,24	34,64	0,58
ELD-P8-450		450	1147,78	1110,32	219,90	49,77	0,33
ELD-P14-450		450	1090,43	1070,47	236,62	87,10	0,20

Para definição do protocolo de fabricação do concreto foram realizadas uma série de concretagens testes verificando a melhor ordem de mistura dos constituintes. Dessa forma, devido à dificuldade de homogeneizar as adições, estas foram misturadas a água junto com o aditivo. Assim, conseguiu-se obter maior dispersão das partículas e melhor trabalhabilidade do concreto no estado fresco. A ordem de preparo foi: agregado graúdo; 1/3 da água; cimento; 1/3 da água; agregado miúdo; 1/3 da água. Sendo os tempos de mistura 30 segundos para as primeiras misturas e 5 minutos para a homogeneização final. Todo o processo de fabricação do concreto teve como tempo máximo, por traço, o intervalo de 1 hora, evitando qualquer alteração no traço devido à pega do cimento. Os corpos de prova foram então moldados e curados por 28 dias em câmara úmida com umidade e temperatura controlada ($23 \pm 2^\circ\text{C}$ e 95%).

4.2.4 Caracterização do concreto no estado endurecido

Todos os traços produzidos foram caracterizados quanto as suas propriedades mecânicas, físicas e a resistência a penetração de cloretos. Para essas análises foram moldados corpos de prova de $\varnothing 5 \times 10 \text{cm}$ adensados em duas camadas com 20 golpes por camada na mesa

fluxo. Os ensaios de caracterização física e mecânica do concreto são descritos na Tabela 5, sendo todos realizados com a mesma idade de 42 dias.

Tabela 5 - Ensaios e respectivos protocolos de caracterização dos concretos

Ensaio	Número de Repetições por traço	Normatização
Massa específica	2	NBR 9778:2005 (ABNT, 2005)
Índice de vazios		
Absorção de água por imersão		
Porosidade na seção	2	(Mendes, et al., 2017)
Resistência à compressão	4	NBR 5739:2018 (ABNT, 2018)
Resistência à tração diametral	4	NBR 7222:2011 (ABNT, 2011)
Velocidade Pulso Ultrassônico (VPU)	16	NBR 8802:2013 (ABNT, 2013)

Para os ensaios mecânicos (resistência à compressão e tração) foram utilizados a prensa hidráulica EMIC DL 20000, com célula de carga de 200 kN e velocidade de 0,3 MPa/s. Para o ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) foi usado o equipamento TICO (Proceq) com pulsos ultrassônicos de 54Hz e medições diretas. Com base no resultado de VPU os concretos foram classificados quanto a sua qualidade/integridade. O concreto é classificado como excelente, bom, duvidoso e pobre para os respectivos intervalos de velocidade de pulso: >4500 m/s; 4500-3500 m/s; 3500-3000 m/s; e <3000 m/s (Saxena & Tembhurkar, 2018; Saint-Pierre, et al., 2016)

Para determinação da porosidade, foi utilizada a técnica de teor de poros na seção, de acordo com Mendes *et al* (2017). O protocolo do ensaio consiste em mapear e quantificar o número de poros encontrados em uma seção com alto contraste de cor, a partir da contagem de pixels branco e pretos utilizando um algoritmo no software Scilab®.

Para sua execução, iniciam-se cortando os corpos de prova perpendicularmente à sua altura em fatias de 20 mm com auxílio de uma serra diamantada em corte via úmida. A seguir as faces são polidas com lixa d'água números 80 e 400. Quando a face se encontra lisa, a área é pintada com um pincel preto e recoberta por um material pulverulento de cor branca para ressaltar os poros, uma vez que o software necessita de um alto contraste entre os poros e a matriz. Nessa etapa, os 5 mm mais externos da seção do corpo de prova são descartados, evitando que possíveis danos ocasionados no desmolde do corpo de prova influencie no resultado final de porosidade. As seções foram registradas digitalmente com scanner HP Scanjet G4050 com resolução de 2400 dpi. e tratadas por software de edição de imagens. O tratamento

das imagens consistiu em retirar seções quadradas do centro do corpo de prova e transformá-las em imagens em preto e branco.

A Figura 9 apresenta a imagem da seção do corpo de prova pronta para ser analisada pelo algoritmo e antes da sua edição. As imagens quadradas e binárias foram lidas pelo algoritmo que retornou com a porcentagem de poros na seção (Rabbani, et al., 2014). A precisão desse ensaio foi de $15\mu\text{m}$, determinado pela resolução do scanner.

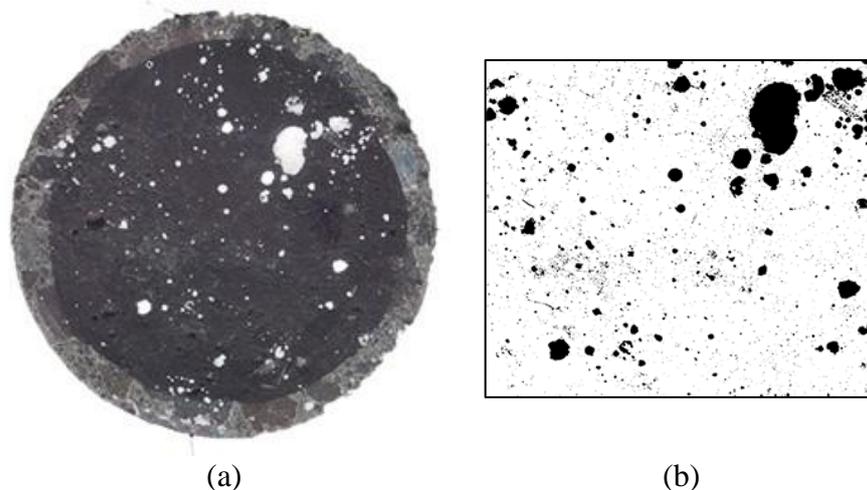


Figura 9 – (a) Seção do corpo de prova registrada digitalmente para ensaio de porosidade (b) Imagem da seção após tratamento em software de edição de imagem

4.2.5 Análise de durabilidade

A fim de avaliar a capacidade de resistir a penetração de cloretos foi aplicada a técnica adaptada NT Build 443 (Nordtest, 1995), que consiste em imergir o corpo de prova de concreto por um período mínimo de 35 dias em uma solução de NaCl. Os corpos de prova foram submetidos a técnica do ensaio de penetração de cloretos quando atingiram a idade de 56 dias.

A primeira etapa da preparação consistiu na regularização da face superior dos CPs ($5 \times 10 \text{cm}$) a fim de homogeneizar as seções, aproximando-as da seção típica do corpo de prova da matriz de concreto. Para isso foi utilizada uma serra diamantada para retirar cerca de 0,5 cm nos corpos de prova que depois eram polidos com lixa d'água número 80 para garantir que seção tivesse a rugosidade reduzida. Em seguida, essa face foi lavada e os corpos de prova foram posicionados na estufa com circulação de ar a 40°C até constância de massa (5%), a fim eliminar a água livre na superfície do corpo de prova, sem comprometer sua estrutura, e garantir que todos estivessem na mesma condição. Após período de secagem em estufa, os corpos de prova foram imersos em solução saturada de cal até constância de massa (0,1%). Finalizando

esse período, os mesmos foram envelopados com fita adesiva reforçada e recobertos por parafina deixando apenas a face lixada livre para o ataque de cloretos. A Figura 10 apresenta o corpo de prova preparado para o ensaio. Observe que uma faixa na seção superior de cerca de 0,5mm é impermeabilizada com parafina para garantir a eficiência na vedação do corpo de prova.



Figura 10 - Corpo de prova preparado para ensaio de penetração de cloretos

Foram acoplados aos corpos de prova, dispositivos tubulares de policloreto de polivinila (PVC) e juntas de com silicone. Os dispositivos foram preenchidos com solução de 16,5% de NaCl (2,85 mol/L) A Figura 11 apresentada a seguir, ilustra o esquema para um corpo de prova utilizado na técnica do ensaio. Essa técnica é uma adaptação da NT Build 443 (Nordtest, 1995).

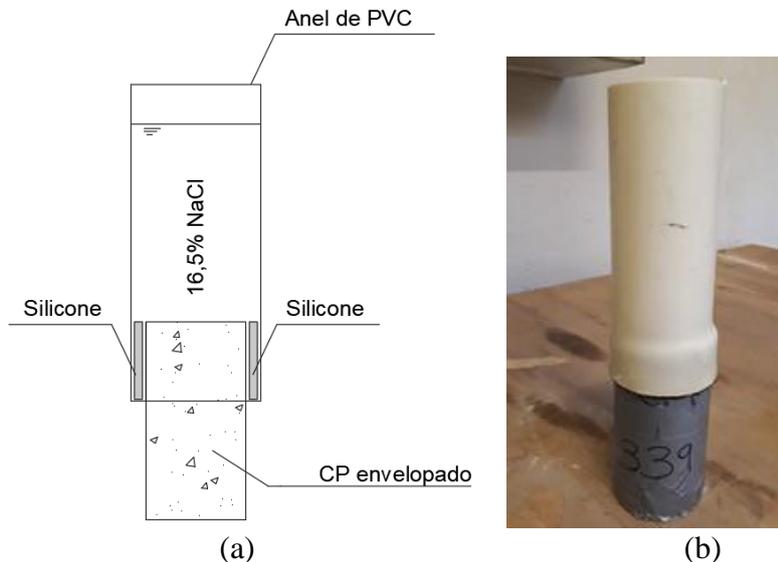


Figura 11 – (a) Esquema indicativo do ensaio (b) Corpo de prova preparado para análise

Os corpos de prova foram expostos a solução de NaCl por dois períodos diferentes: 35 e 55 dias. Para cada idade foram realizadas duas repetições por traço. As soluções foram monitoradas a cada 24h, sendo homogeneizadas e reabastecidas a cada 15 dias, com isso

buscou-se manter a mesma concentração de 16,5% ao longo do todo o ensaio. A demanda por dois diferentes períodos de exposição é coerente com as constatações de Stanish, Hooton e Thomas (1997). Os autores observaram que o período recomendado, 35 dias, era insuficiente para descrever o comportamento e determinar o desempenho de concretos de alta qualidade. A fim de quantificar a profundidade de penetração de cloretos, os corpos de prova foram seccionados ao longo de sua geratriz, sendo aspergida solução de nitrato de prata (0,1 M). Assim, a profundidade penetrada foi medida com auxílio de um paquímetro (precisão 0,1mm) e as seções foram digitalizadas com auxílio do scanner HP Scanjet G4050 com resolução de 2400 dpi. Essas seções foram tratadas em um software de edição de imagens a fim de criar um contraste alto entre a área atacada e a seção do corpo de prova, como mostra a Figura 12. O software Scilab® foi utilizado para determinar a relação entre a área penetrada por cloretos e a área total da seção do corpo de prova (A_A/A_T).

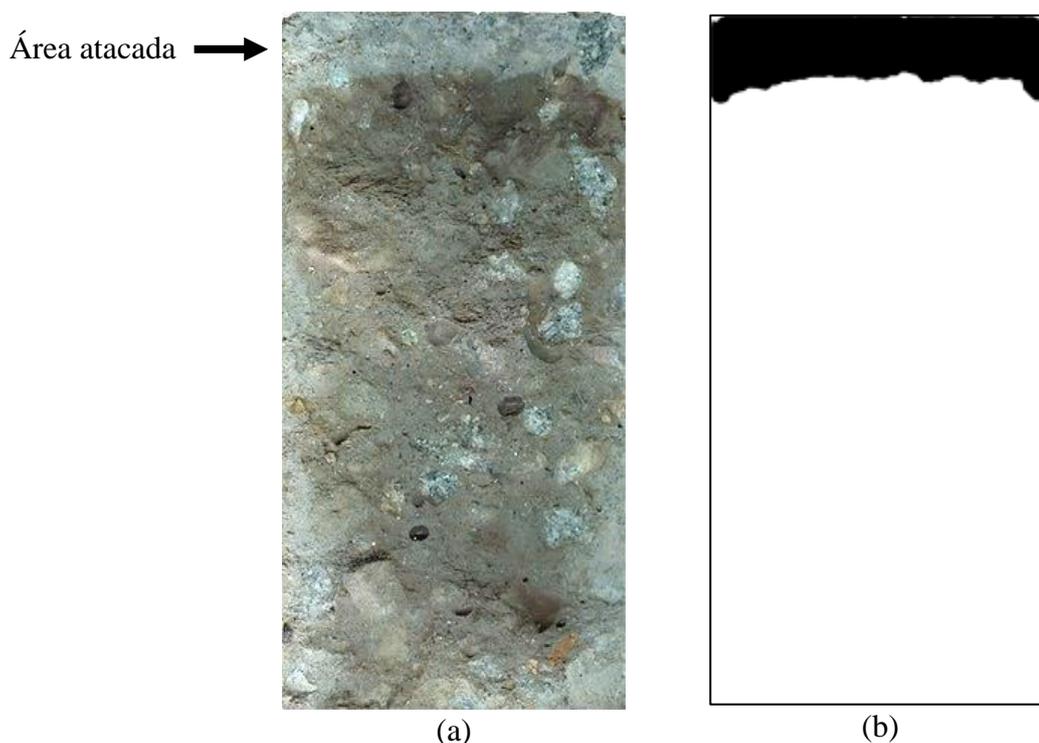


Figura 12 - (a) Corpo de prova após a aspersão de nitrato de prata (b) Corpo de prova tratado para contabilizar a área atacada

Além disso, a velocidade de pulso ultrassônico dos corpos de prova foi determinada antes e depois de cada exposição ao ambiente agressivo com cloretos (idades de 35 e 55 dias). Como esse parâmetro está relacionado à estrutura de poros, descrito por Mendes (2018), buscou-se identificar a formação de sólidos nos poros da matriz (cloretos combinados). Como os concretos são fabricados com cimento pozolânico e possuem adição de materiais cimentante suplementares, foi separado 1 corpo de prova como testemunho, para parametrizar os resultados

que possam ter sido influenciados pela formação de produtos de hidratação. Esse corpo de prova foi submetido aos mesmos protocolos de preparação que os outros, no entanto não foi exposto a cloretos, seu objetivo era apenas isolar o efeito dos materiais cimentantes suplementares. Assim, será descontada da variação do VPU nos corpos de prova expostos em solução agressiva a variação da velocidade de pulso ultrassônico observada no corpo de prova sem imersão.

Sabe-se ainda que a resistência à corrosão de um concreto submetido a ataque de cloretos está diretamente relacionada à sua capacidade de formar cloretos combinados. Por isso, a necessidade de avaliar a influência das três adições minerais incorporados nos concretos (sílica ativa, metacaulim e powder LD) na formação de Sal de Friedel. Para isso foi realizada uma análise termogravimétrica (Shimadzu DTG-60H), onde foi possível visualizar o pico de perda de água incorporado ao sal de Friedel de 230°-410°C (Shi, et al., 2017; Ogirigbo & Black, 2017). O ensaio foi realizado em atmosfera de N₂ com taxa de aquecimento de 10°C/min. As amostras avaliadas foram retiradas da argamassa da região penetrada por cloretos (indicado pelo nitrato de prata) após 35 dias de exposição ao NaCl nos concretos REF-SA-310, REF-MC-310 e REF-P8-310. Não foram avaliados todos os concretos, pois o objetivo é entender o a influência das adições minerais nas matrizes.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados inicialmente a caracterização dos materiais utilizados (agregados e adição mineral) e do concreto (estado fresco e endurecido). Posteriormente, os resultados de durabilidade com relação a resistência dos concretos a penetração de íons cloreto são apresentados.

5.1 Caracterização da escória de aciaria bruta

A escória de aciaria utilizada nesse trabalho apresenta um teor de material magnético de 37,69%. Apesar do valor significativamente alto, acredita-se que boa parte desse material magnético se encontre na forma de hidróxidos de ferro, visto que a escória foi estabilizado por um período de 48 meses e passou por um processo de separação magnética na usina siderúrgica (Toffolo, 2015). A composição química das frações magnética e não-magnética é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - FRX das frações obtidas durante a separação magnética

	Não-magnética	Magnética
MgO	5,1 %	4,9 %
Al ₂ O ₃	4,4 %	3,6 %
SiO ₂	15,6 %	13,4 %
P ₂ O ₅	1,5 %	1,5 %
CaO	36,8 %	36,2 %
MnO	3,5 %	3,7 %
Fe ₂ O ₃	31,2 %	34,5 %
Outros	1,9 %	2,2 %

Esse ensaio requer a preparação do material com cominuição até ser passante na peneira de 0,075 mm. Acredita-se que boa parte do ferro que encontrava-se preso no interior da escória de aciaria foi liberado, por isso os valores foram altos e semelhantes. Ferro esse encontrado na forma de hidróxidos e óxido. A massa unitária da fração magnética é 1,83 g/cm³, enquanto que para a não-magnética é 1,76 g/cm³. Esperava-se uma redução mais acentuada na massa unitária dos materiais, visto que o processo de separação de material magnético retira elementos como o ferro, com alta massa específica. Os valores semelhantes corroboram com o resultado da composição química que indica uma grande concentração de Fe₂O₃ na fração não-magnética.

Acredita-se que o componente ferro encontrava-se aprisionado no interior das partículas de maior dimensão. Os valores obtidos com a fluorescência de raio-X (Tabela 6) devem ser avaliados com cautela. Essa elevada proporção de material magnético (37%) acompanhada de

pequena diminuição do teor de Fe_2O_3 no FRX pode estar relacionado ao campo magnético do equipamento utilizado, que por estar superdimensionado induz um campo magnético menor capaz de arrastar partículas de menor massa e que não teriam ferro livre em sua composição. Um indicativo disso é a redução da proporção de todos os componentes do FRX, não apenas do ferro.

Com relação a caracterização mineralógica da escória de aciaria, a Tabela 7 apresenta os resultados obtidos por difração de Raios-X. Apesar dos altos teores de CaO e MgO apresentados no FRX, nota-se que a maior parte do cálcio encontrado está combinado a outros componentes, apenas 0,16% está na forma de CaO. O mesmo é observado com relação ao magnésio, onde o teor de periclásio (MgO) é apenas 0,18%. Com relação ao teor de ferro, nessa amostra foi indicado apenas 11% de FeO. Sabe-se que algumas formas de hidróxidos de ferro são encontradas como fase amorfa (Wahid & Kamalam, 1993). Dessa forma, provavelmente o restante do ferro indicado na fluorescência de raios-X está englobado nos 52% de amorfo e quimicamente combinado a outros compostos, como na brownmillerita. Baseado nos valores reduzidos de CaO, MgO e FeO encontrados na difração de raios-X acredita-se que a intemperização da escória de aciaria e seu processo de separação magnética foi eficiente, como já descrito por (Silva, et al., 2016; Toffolo, 2015).

Tabela 7 - Caracterização quantitativa do DRX da escória de aciaria

Componente Mineral	Teor (%)
Brownmillerita - $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$	9,31
Calcita – CaCO_3	12,02
Larnita - Ca_2SiO_4	8,46
C3S monoclinico	4,74
Wuestita - FeO	11,03
Periclásio - MgO	0,18
Akermanita - $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$	0,66
Cal - CaO	0,16
Amorfo	52,65

5.2 Caracterização dos agregados

A distribuição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo é apresentada na Figura 13, para os materiais convencionais e agregados de escória de aciaria.

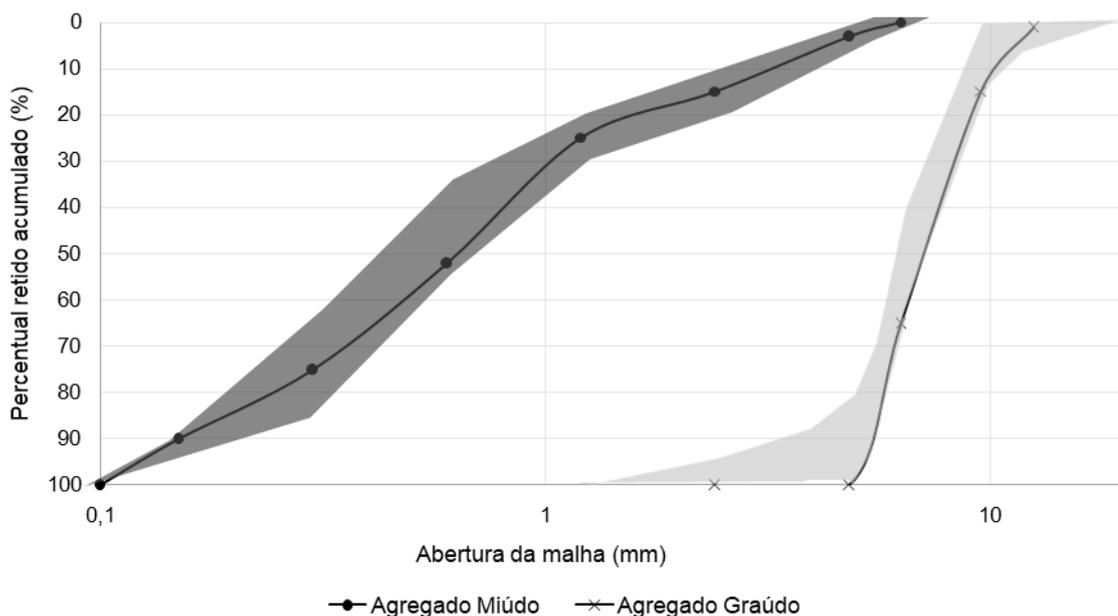


Figura 13 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo e miúdo utilizado no estudo

Ambos os agregados estão enquadrados na zona ótima prescrita em norma. O projeto da distribuição granulométrica para os materiais buscou uma granulometria que seja técnica e economicamente viável, através da maior eficiência de moagem e separação gravimétrica. As demais características físicas dos agregados são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Caracterização física dos agregados utilizados

	A. Miúdo LD	A. Miúdo Convencional	A. Graúdo LD	A. Graúdo Convencional
Massa Específica	3,74 g/cm ³	2,68 g/cm ³	3,58 g/cm ³	2,61 g/cm ³
Massa Unitária	2,22 g/cm ³	1,63 g/cm ³	1,77 g/cm ³	1,44 g/cm ³
Material Pulverulento	8,06 %	6,26 %	1,93 %	0,81 %
Absorção de água	-	-	1,54 %	1,29 %
Módulo de Finura	2,6		6,15	
DMC	4,8mm		12,5mm	

Observa-se pela curva granulométrica e propriedades correlatas, como módulo de finura e diâmetro máximo característico, que os agregados são fisicamente equivalentes. Com relação a massa específica, como esperado, a dos agregados de escória é superior aos convencionais, sendo o agregado miúdo 28,34% superior e o agregado graúdo 27,04%. O resultado concorda com as informações publicadas por Arribas *et al* (2014), Santamaria *et al* (2018). Silva *et al* (2016) obteve resultados de massa específica dos agregados de escória de aciaria (miúdo e graúdo) em torno de 31% superior em relação aos convencionais.

Os agregados graúdos convencionais e de escória de aciaria apresentaram absorção de água semelhante. Por outro lado, o teor de material pulverulento do agregado graúdo convencional foi o único a apresentar um teor inferior ao limite da norma, 1% (ABNT, 2009). Os agregados miúdos apresentaram um teor de material pulverulento inferior a 10%, limite estabelecido por norma para areia britada. Com relação a morfologia, os agregados convencionais (gnaisse) são mais angulares e lamelares, os de escória de aciaria são cúbicos. A Figura 14 apresenta alguns agregados graúdos para comparação. Além disso, a superfície do agregado de escória de aciaria é rugosa, enquanto que o convencional é liso.

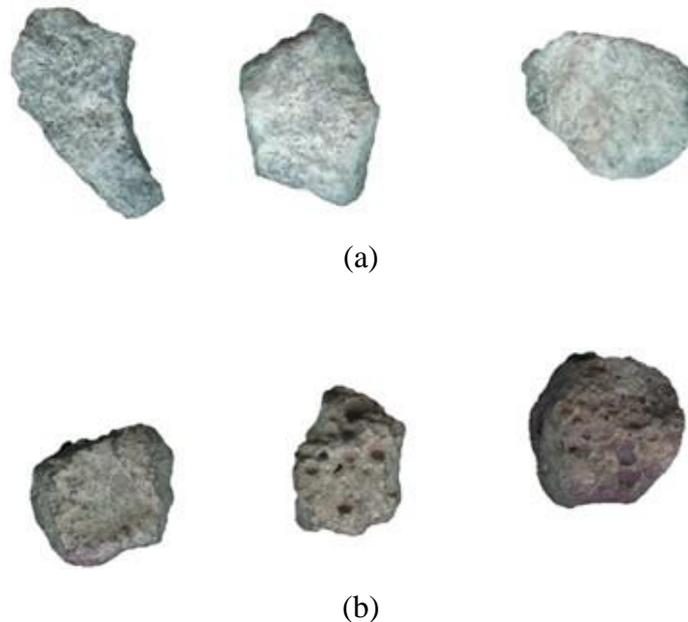


Figura 14 - Morfologia dos agregados graúdos (a) Convencional, gnaisse (b) Escória de Aciaria LD

Com relação as propriedades mecânicas, o agregado de escória de aciaria apresentou índice de resistência ao esmagamento de 89,41% e o agregado convencional de 82,92%. Esse ensaio mede a resistência à granulação do agregado, o tanto que o agregado se manteve íntegro durante a aplicação da carga. O agregado de escória de aciaria foi cerca de 38% mais resistente do que o convencional.

5.3 Caracterização das adições minerais

A Figura 15 indica as curvas granulométricas das adições minerais e do cimento.

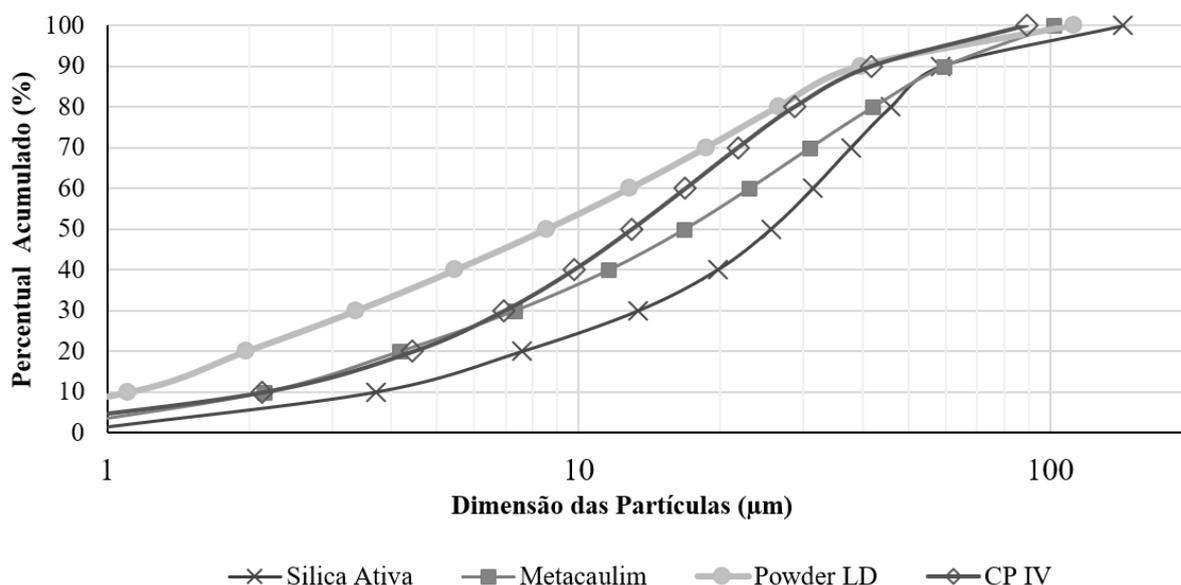


Figura 15 - Distribuição granulométrica das adições minerais e do cimento utilizado

Observa-se que o powder LD é a única adição mineral com diâmetro dos grãos menor que o cimento CP IV. Analisando o diâmetro característico D90 dos materiais, verifica-se que o powder LD é o material mais fino (39,59µm), seguido pelo cimento CP IV (41,87 µm). A sílica ativa é a adição mais grosseira (59,52µm) e possui D90 similar ao do metacaulim (58,74µm). O D90 do powder LD é cerca de 32% inferior ao da sílica ativa. Quando se analisa o diâmetro mediano (D50) nota-se uma maior dispersão entre a curva granulométrica do metacaulim (16,75µm) e da sílica ativa (25,57µm). Observando o parâmetro D50 o powder LD se mantém como adição mais fina, com 8,55 µm, enquanto o cimento apresenta um valor intermediário entre o metacaulim e o powder LD, 12,97 µm. Destaca-se ainda que a dimensão máxima da sílica ativa é 142,9µm, existindo um aumento acentuado de sua granulometria após o resultado de D90.

Quanto à morfologia das partículas (Figura 16), observa-se que a sílica ativa exibe partículas de maior dimensão, sendo visível na imagem uma com diâmetro maior do que 100µm, indicado na escala (Figura 16d). O powder LD possui majoritariamente partículas que se assemelham a forma cúbica (Figura 16b), assim como o cimento (Figura 16a). Nenhuma das adições se aproxima do formato perfeitamente esférico da sílica ativa. Por outro lado, o metacaulim (Figura 16c) apresenta partículas mais angulares.

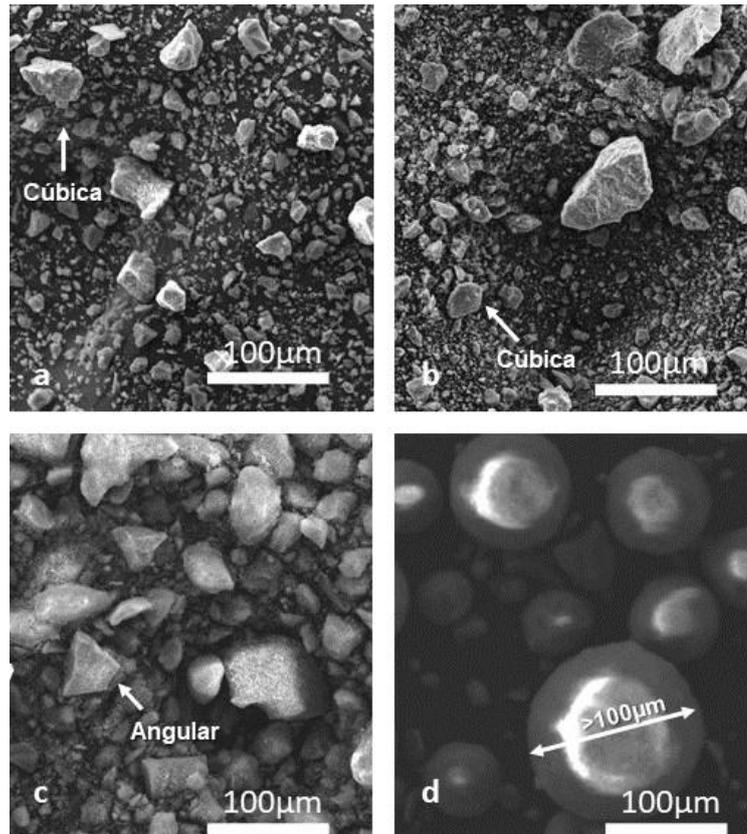


Figura 16 - Morfologia das adições minerais obtidas com MEV magnitude de 500x (a) cimento; (b) powder LD; (c) metacaulim; (d) silica ativa

Para um aumento de 5000x para o metacaulim e o powder LD, Figura 17, é possível observar que no entorno das partículas de ambos os materiais existe material aglomerado. Isso ocorre principalmente no metacaulim, sendo visíveis muitas partículas de dimensão inferior. Esse comportamento das adições minerais induziu estratégia para dosagem descrita na metodologia da pesquisa, onde as adições foram incorporadas dispersas em água com aditivo. Dessa forma, as partículas coloidais se desaglomeraram e sua influencia na reologia dos concretos foi mitigada.

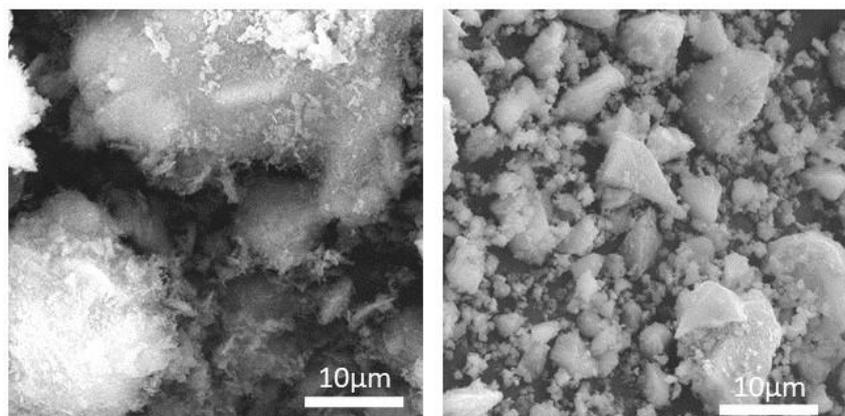


Figura 17 - MEV das partículas de metacaulim e powder LD com magnitude de 5000x

A Tabela 9 apresenta a composição química das adições minerais. Como esperado a sílica ativa é composta basicamente de SiO₂ e o metacaulim de SiO₂ e Al₂O₃. Quanto ao powder LD sua composição é bem semelhante à da escória de aciaria analisada anteriormente. Seu principal componente é o CaO e apresenta altos índices de MgO. Baseado nos resultados apresentados para caracterização mineralógica por DRX da escória, sabe-se que a maior parte desses componentes apresentam-se como hidratos ou combinados a outros elementos.

Tabela 9 – FRX das adições minerais utilizadas

	Sílica Ativa (%)	Metacaulim (%)	Powder LD(%)
SiO ₂	96,8	55,7	14,6
Al ₂ O ₃	-	37,8	3,7
CaO	1,1	-	36,8
P ₂ O ₅	0,4	0,4	1,6
MgO	0,4	0,4	5,5
K ₂ O	0,7	1,9	-
Fe ₂ O ₃	0,2	2,2	32,2
TiO ₂	-	1,5	0,5
MnO	-	-	3,7
Outros	0,4	0,1	1,4

As massas específicas e unitárias das adições minerais são apresentadas na Tabela 10. O comportamento observado entre a massa unitária do metacaulim e da sílica ativa é coerente com a curva granulométrica, onde ambos possuem dimensões de partículas similares. O maior valor encontrado de massa específica e unitária para o powder de escória já era esperado devido a sua composição com altos teores de CaO, SiO₂ e Fe₂O₃ (Silva, et al., 2016).

Tabela 10 - Massa específica e unitária das adições minerais utilizadas

	Powder LD	Sílica Ativa	Metacaulim
Massa unitária (g/cm ³)	1,29	0,58	0,51
Massa específica (g/cm ³)	3,74	2,22	2,64

5.4 Curva de saturação do aditivo

O resultado das curvas de saturação para concentração e dosagem dos aditivos obtidas combinando o cimento com as adições minerais é apresentado na Figura 18. Observa-se um comportamento similar e valores de ponto saturação distintos. As adições minerais apresentaram boa compatibilidade com o superplastificante, significando que a adsorção do aditivo foi eficiente para dispersar as partículas (Carvalho, et al., 2019).

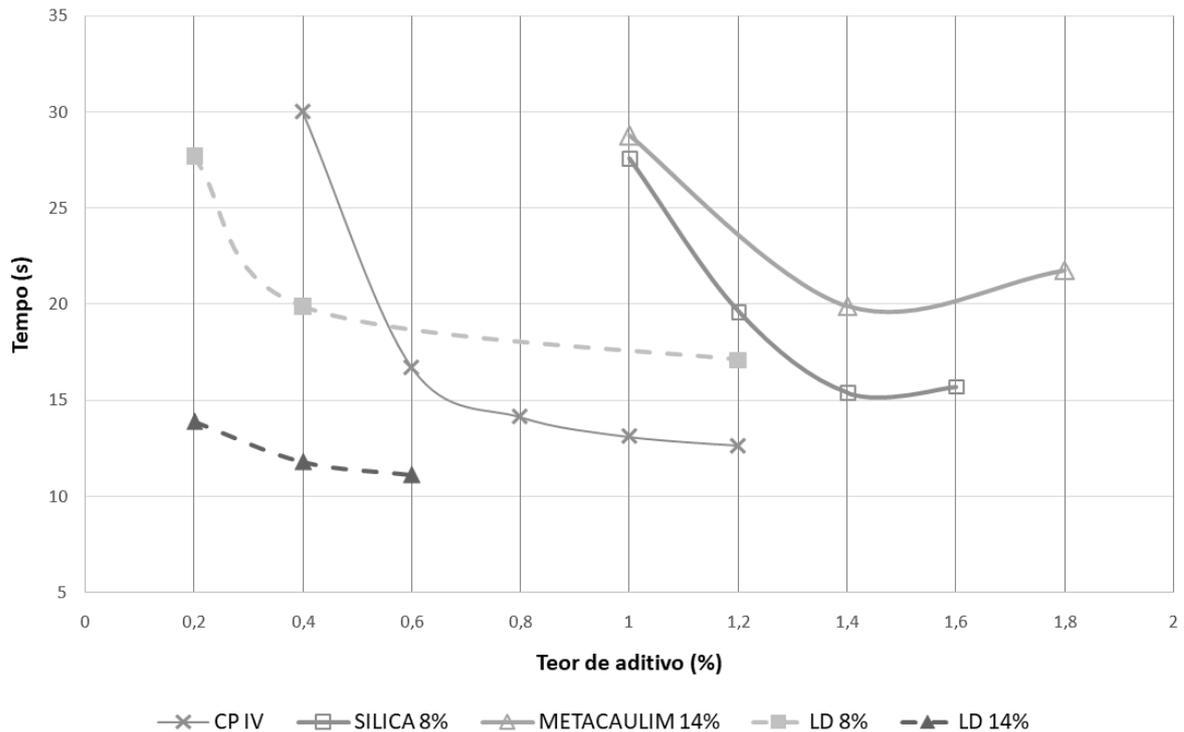


Figura 18 - Curvas de saturação do aditivo PowerFlow 1180

As pastas com cimento e adição de powder LD apresentaram um ponto de saturação inferior ao do cimento. Essa combinação apresentou o melhor resultado, como já observado por Carvalho *et al* (2019). De modo geral, os aditivos utilizados nesse experimento demandam uma certa energia de ativação para funcionarem adequadamente e modificarem a reologia da matriz. Acredita-se que o menor ponto de saturação do powder LD pode estar associado à maior massa específica desse material que poderia ter influenciado na energia de ativação para o aditivo. Além disso, a menor dimensão dos grãos de powder LD e a morfologia cúbica das partículas contribuíram para essa reologia.

A sílica ativa e o metacaulim apresentaram pontos de saturação com cerca de 7% de diferença. Visto que a massa específica e a granulometria dessas adições são similares, indica-se que a morfologia da partícula influenciou na reologia da pasta, afetando a demanda por aditivo. A sílica ativa, que apresentou o menor ponto de saturação, possui partículas perfeitamente esféricas enquanto a morfologia do metacaulim é caracterizada majoritariamente como angular. Além disso, o material fino aglomerado no em torno do metacaulim também influencia na reologia da matriz.

A Figura 19 correlaciona o D90 dos materiais e seus respectivos pontos de saturação. As pastas com powder LD tiveram resultado mais próximo a pasta de cimento puro, provavelmente relacionado à granulometria similar. Comparando a sílica ativa e o metacaulim

ao powder LD e o cimento CP IV percebe-se uma acentuada queda no ponto de saturação para teores de aditivos inferiores a 1%. Esse resultado está provavelmente relacionado à queda no D90. Percebe-se que a proporção da adição também influencia no ponto de saturação, existindo uma redução de um terço entre a mistura com menor e maior concentração de powder LD. Isso indica que as partículas do powder LD amplificam o efeito do aditivo devido a maior energia envolvida na mistura proporcionada pela sua maior massa específica. Quanto ao ponto de saturação da sílica ativa e do metacaulim, os valores são considerados aproximadamente iguais, assim como seu D90.

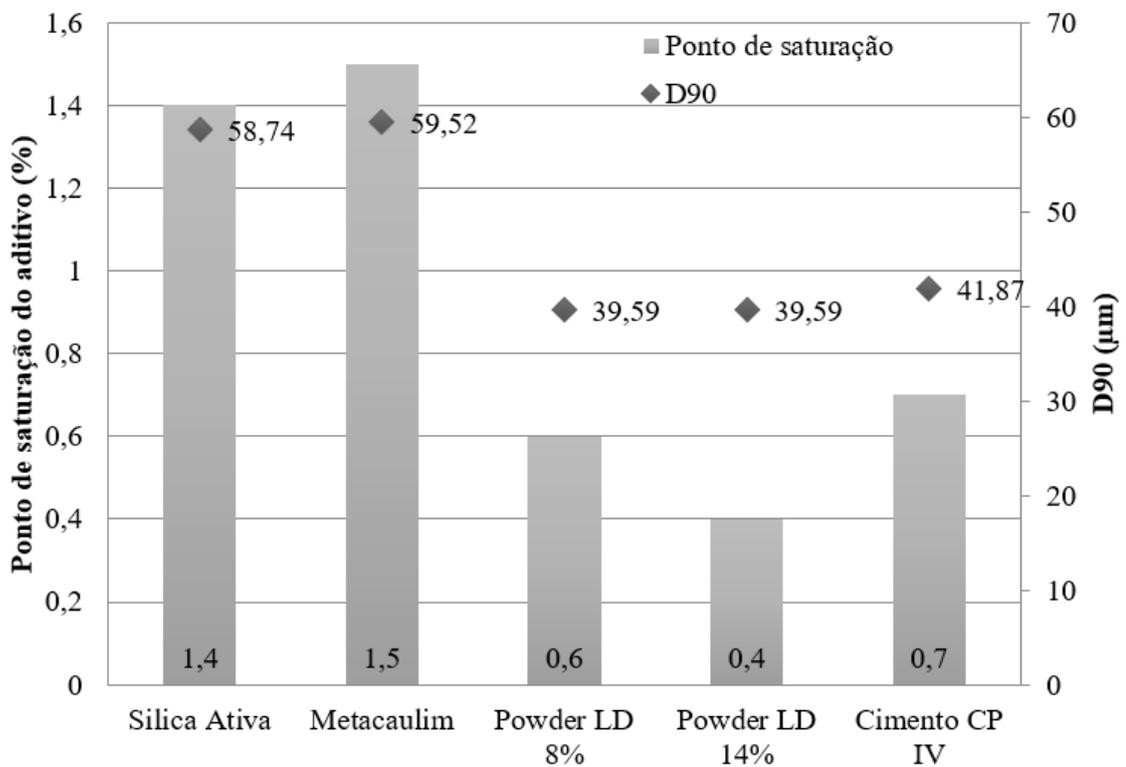


Figura 19 - Correlação entre o D90 das partículas e seus respectivos pontos de saturação

5.5 Caracterização do concreto no estado fresco

A Figura 20 apresenta a relação entre os abatimentos encontrados nos concretos produzidos relacionado com os teores de aditivos. Nos valores de abatimento foi observado uma variação máxima de 20 mm, utilizada como referência para o modelo experimental devido à dificuldade em adequar a consistência de todos os compósitos a tolerância estabelecida pela NBR 7212 (2012).

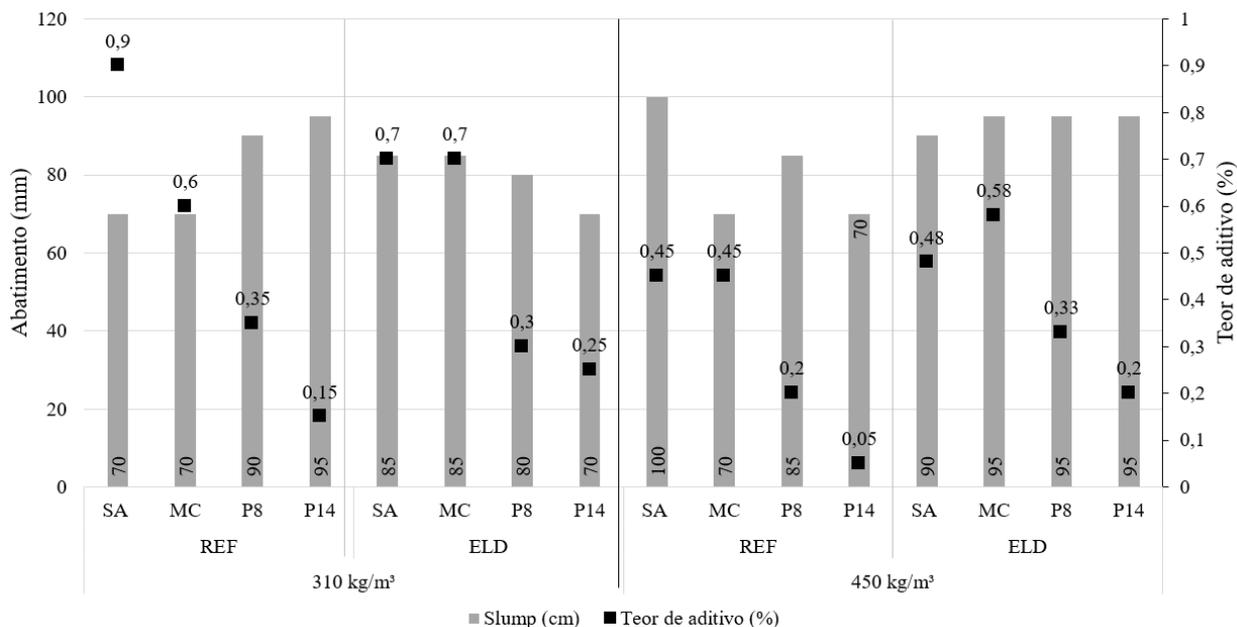


Figura 20 - Relação entre abatimento e o teor de aditivo utilizado

Não foi observado segregação ou ausência de argamassa nos concretos, o que indica boa coesão. De forma geral, os concretos com powder LD apresentaram maiores abatimentos com menor teor de aditivo. Esse fenômeno pode ser atribuído à maior massa específica do powder LD, associado a maior disponibilidade de água contribuindo para o aumento da energia da mistura do concreto e ativando de forma mais efetiva o aditivo. Além disso, a morfologia cúbica dessas partículas influencia positivamente na reologia da mistura. Essa tendência também pode ser observada nos concretos produzidos com agregados de escória

A Figura 21 mostra o concreto com agregado de referência, 14% de adição de powder LD, e com 310 kg/m³ de cimento. O concreto apresenta um teor de argamassa adequado e não é observada exsudação.



Figura 21 - Teste slump do concreto de REF-P14-310

5.6 Caracterização do concreto no estado endurecido

5.6.1 Índice de Vazios e Absorção de água por Imersão

A Figura 22 apresenta os resultados obtidos para índice de vazios e absorção de água por imersão para matrizes com idade de 42 dias.

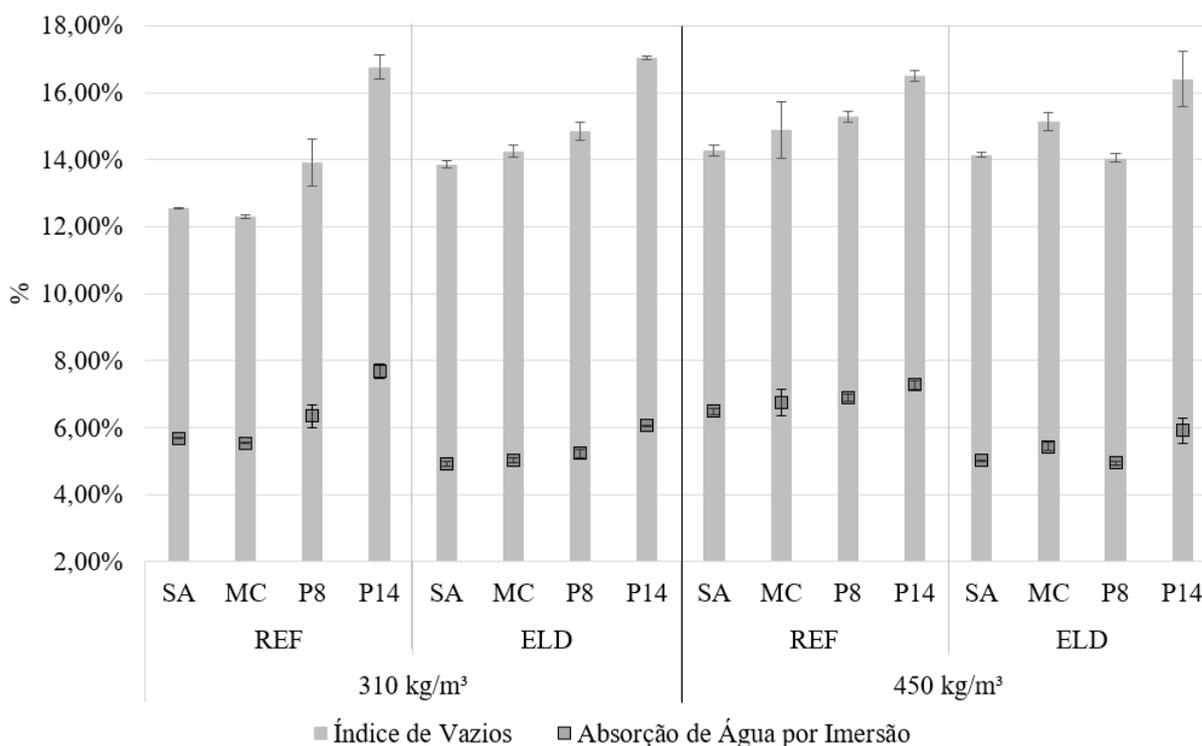


Figura 22 - Índice de Vazios e Absorção de Água por Imersão dos concretos produzidos

Observa-se que para o consumo de cimento de 310 kg/m³ os concretos fabricados com agregado de escória de aciaria possuem em média 8,61% mais vazios do que os com agregado de referência. Já para os concretos com agregado de escória de aciaria e consumo de cimento de 450 kg/m³, o índice de vazios foi 1,97% menor do que os de referência. Com relação à absorção de água por imersão, para ambos os consumos os concretos com agregado de escória apresentaram resultados inferiores quando comparados aos convencionais, sendo 15,33% menor para 310 kg/m³ e 22,25% para 450 kg/m³.

Em todos os concretos, REF e ELD com consumo 310 kg/m³ e 450 kg/m³, nota-se um comportamento semelhante com relação as adições. O tratamento SA possui os menores resultados de índice de vazios e o tratamento P14 os maiores, enquanto que matrizes com adições de MC e P8 apresentam resultados intermediários. Na dosagem foram utilizadas as adições medidas em volume, para que se observasse seus efeitos de forma equivalente, dadas

as diferenças físicas (massa específica). No entanto, para produção das matrizes considerou-se fator água/aglomerantes em massa. Dessa forma, todos os compósitos possuíam o mesmo volume de finos, mas com massa diferente; essa opção resultou em um maior consumo de água nos concretos com adições minerais de maior massa específica, como o powder LD. A maior disponibilidade de água nas composições com powders LD poderia ter influenciado o volume de vazios dessas matrizes.

A Figura 23 correlaciona os índices de vazios com os consumos de água por tonelada de concreto. Observe que as tendências dos resultados para índice de vazios e consumo de água, apresentam comportamento parecido para todos os tratamentos.

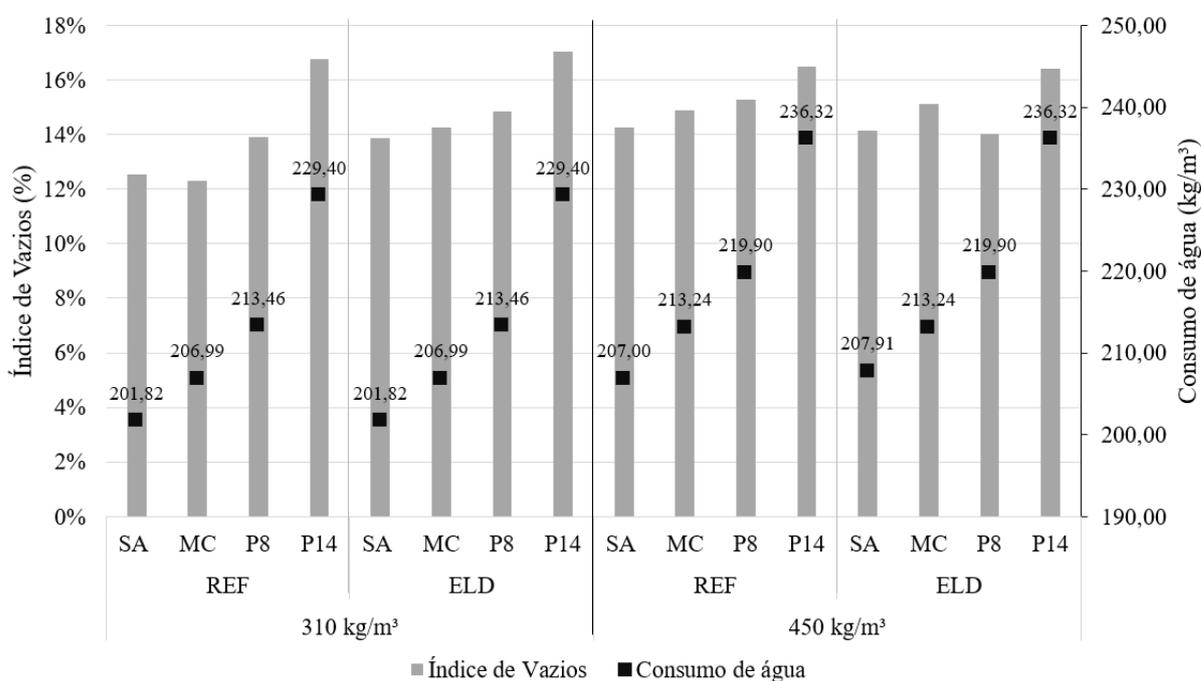


Figura 23 - Relação entre o índice de vazios e o consumo de água por tonelada de concreto

Matrizes REF com consumo de cimento 450kg/m³ apresentam índices de vazios com valores superiores aqueles encontrados para matrizes REF com consumo de cimento 310kg/m³. Considerando que o índice de vazios está relacionado à proporção de água na matriz, e que as matrizes com consumo de cimento de 450kg/m³ possuem um fator água/aglomerantes inferior ao de 310kg/m³, esperava-se que o índice de vazios também fosse inferior. Uma possível razão para esse desempenho atípico poderia ser o fato de que a proporção água/aglomerantes determinada para a matriz com consumo de cimento 450kg/m³ tenha sido insuficiente para hidratar todo o cimento, assim o maior volume de poros poderia estar relacionado à menor formação de produtos de hidratação.

Uma análise termogravimétrica (Shimadzu DTG-60H, atmosfera de N₂, 10°C/min) foi realizada em amostras das matrizes com consumo de cimento 310kg/m³ e 450kg/m³, conforme apresentado na Figura 24.

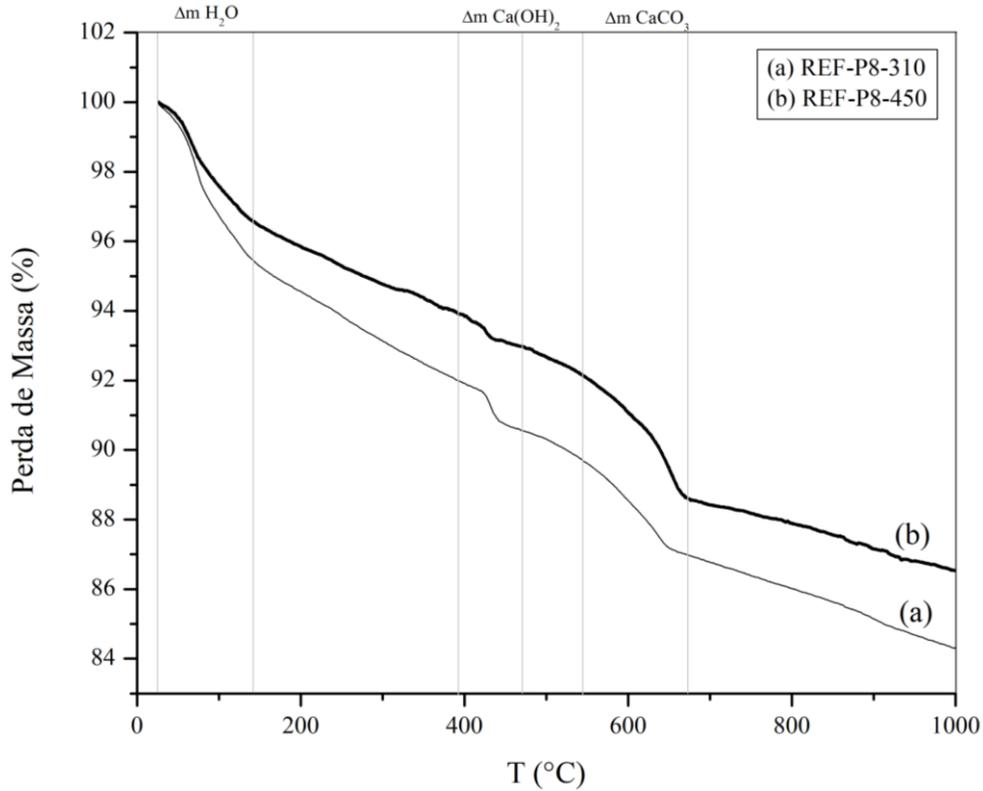


Figura 24 -TG das matrizes com consumo de cimento 310kg/m³ e 450kg/m³.

As amostras foram extraídas de corpos de prova REF-P8 e cominuídas em almofariz de porcelana para que se obtivessem partículas com diâmetro inferior a 0,075 mm. O objetivo dessa análise foi identificar a possível dosagem insuficiente de água para as matrizes com consumo de cimento 450kg/m³ através da formação dos produtos de hidratação. O parâmetro utilizado nessa investigação foi a quantidade de Ca(OH)₂. Por isso, optou-se por analisar uma matriz REF-P8, dado que na literatura, adições de powders de escória são consideradas como materiais cimentantes, não se observando portanto, atividade pozolânica relevante. Dessa forma, a quantidade de Ca(OH)₂ disponível seria próxima aos percentuais presentes nas matrizes de cimento (Wang, et al., 2013; Zhao, et al., 2016)

A determinação da quantidade de Ca(OH)₂ foi realizada de acordo com El-Jazairi e Illston (1980), considerando o pico de de-hidroxilação do Ca(OH)₂ (400°C – 500°C) e decarbonatação do CaCO₃ (540°C – 690°C). As curvas de perda de massa obtidas são

apresentadas na Figura 24. Observou-se que as matrizes com consumo de cimento 310kg/m^3 e 450kg/m^3 possuíam, respectivamente, 12,31% e 11,38% de hidróxido de cálcio.

Considerando que as matrizes com consumo de cimento 450kg/m^3 possuem massa de cimento 45% superior às aquelas com consumo de 310kg/m^3 , e que a geração dos hidróxidos de cálcio tem relação direta com a hidratação do cimento Portland, é razoável sugerir que a água dimensionada pelo fator água/aglomerantes para matrizes com consumo de cimento 450kg/m^3 foi insuficiente para hidratação de toda massa de cimento.

5.6.2 Velocidade de Pulso Ultrassônico

A Figura 25 apresenta os resultados de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) para os concretos.

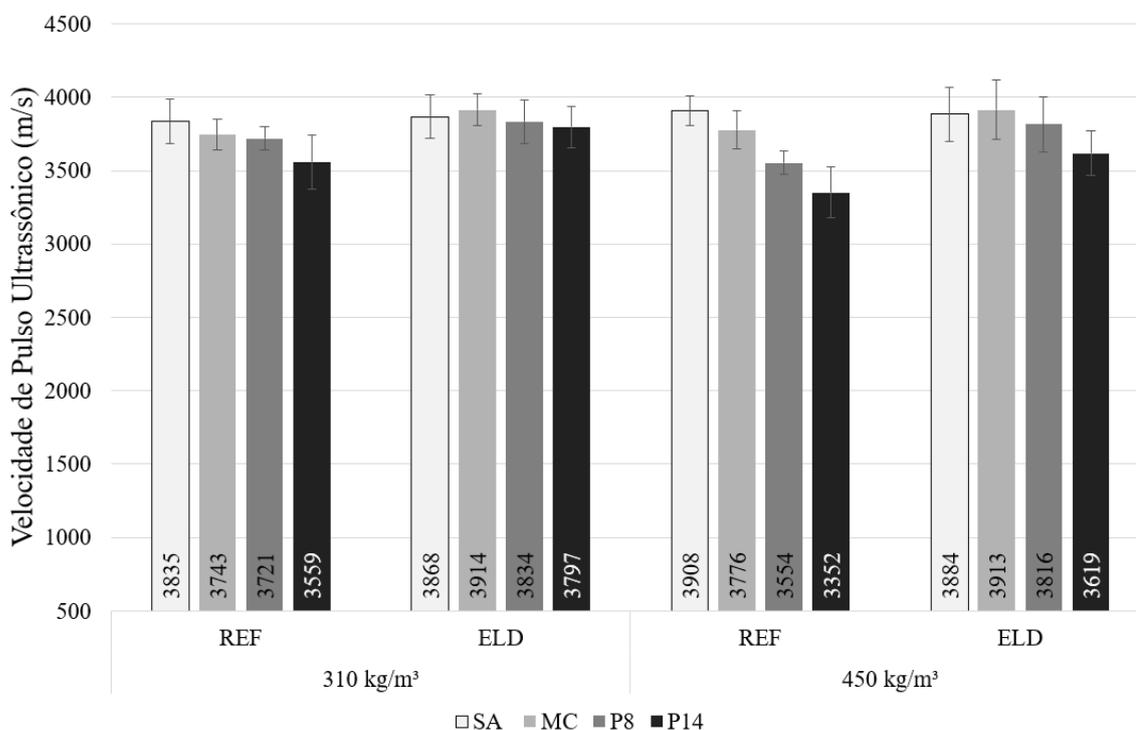


Figura 25 - Velocidade de Pulso Ultrassônico dos concretos fabricados

Ressalta-se que o VPU está relacionada principalmente a estrutura de poros do concreto, quanto mais poroso, menor será a velocidade de propagação do pulso das ondas pela matriz (Popovics, et al., 1990). Assim, quanto mais alta a velocidade de pulso ultrassônico mais homogêneo e sem imperfeições se encontra o concreto.

Os valores obtidos para VPU confirmam os resultados de índice de vazios. Adicionalmente ainda é possível classificar as matrizes, em função dos valores obtidos para VPU, como sendo matrizes de boa qualidade ($3500\text{m/s} < \text{VPU} < 4500\text{m/s}$).

5.6.3 Massa Específica do Concreto

A Figura 26 apresenta os resultados de massa específica dos concretos fabricados.

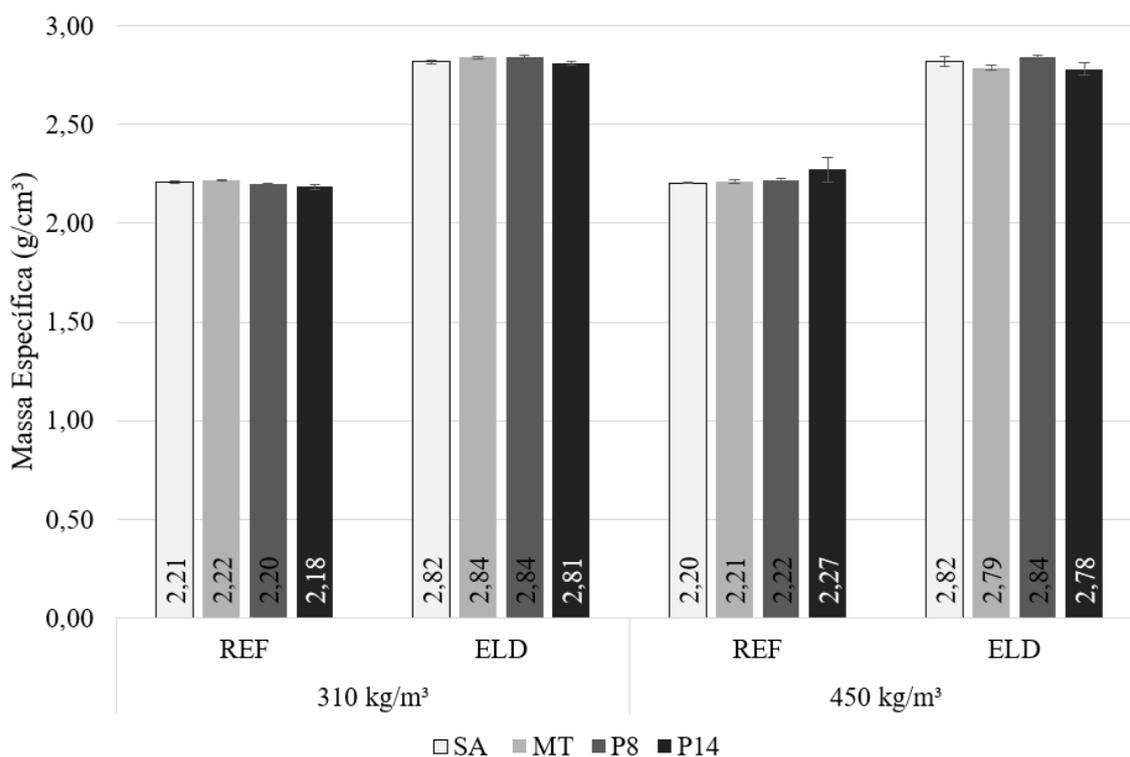


Figura 26 - Massa Específica dos concretos fabricados

De acordo com Mehta e Monteiro (2006) todas as matrizes podem ser classificadas como de densidade normal. Nota-se que o consumo de cimento não interferiu de forma significativa nos valores da massa específica do concreto, assim como no consumo de água e índices de vazios.

Os concretos fabricados com agregado de referência apresentaram massa específica média ($2,21\text{ g/cm}^3$) inferior àquelas matrizes com agregado de escória de aciaria ($2,82\text{ g/cm}^3$). Os valores 27,6% superiores para os concretos ELD já eram esperados visto que a massa específica dos agregados de escória é cerca de 38% superior ao convencional. Santamaria *et al* (2018) e Manso *et al* (2006) produziram concretos com consumo de cimento em torno de 300 kg/m^3 com substituição total do agregado graúdo e parcial de agregado miúdo (64%) por agregado de escória de aciaria produzindo concretos com a massa específica de $2,6\text{ g/cm}^3$, cerca

de 12% maior do que os convencionais. Andrade (2018) fabricou concretos apenas com agregados de escória de aciaria e consumo de cimento em torno de 450 kg/m³, obtendo massa específica em torno de 3,2 g/cm³, superior aos convencionais em 25%.

5.6.4 Porosidade na seção

A Figura 27 mostra o percentual de poros nas seções dos corpos de prova.

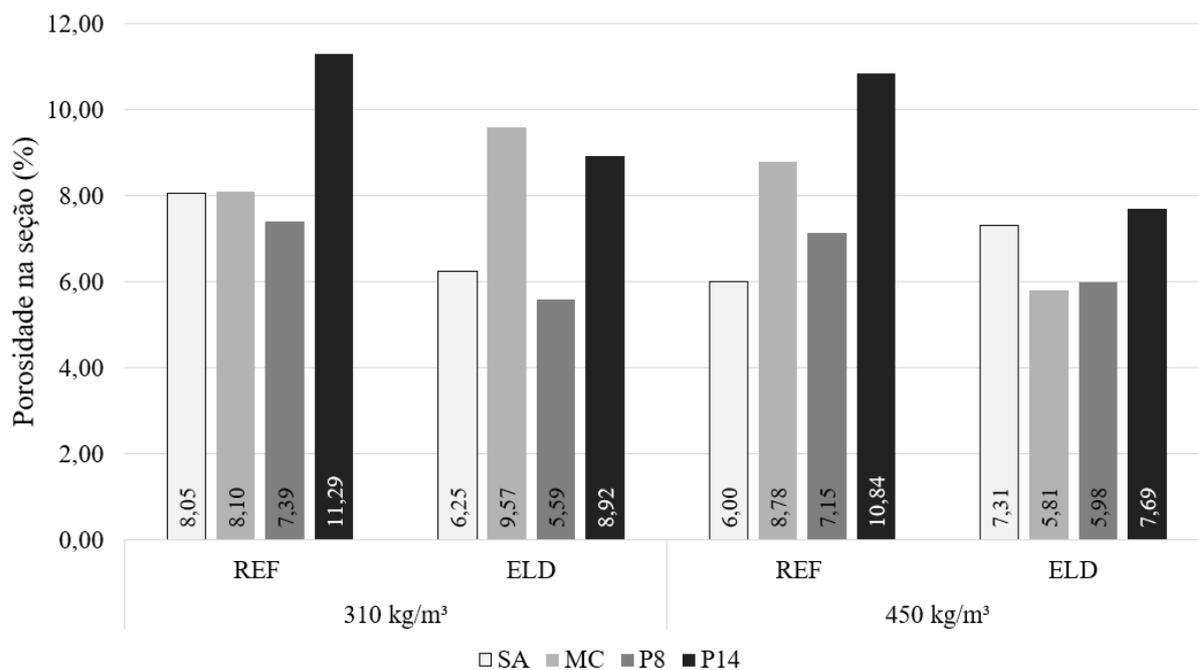


Figura 27 - Percentual de poros nas seções dos corpos de prova de concreto

Observa-se que, de modo geral, os concretos com agregado de escória de aciaria possuem menor porosidade na seção comparado aos de agregado convencional. Provavelmente isso ocorre devido aos agregados convencionais utilizados serem mais lamelares do que os de escória de aciaria. Dessa forma, ao produzir concretos com agregados naturais pode-se obter maior incorporação de bolhas de ar, função da morfologia desses agregados. As matrizes REF-P14 apresentam as maiores porosidades na seção, provavelmente ocasionado pelo maior consumo de água na dosagem desses concretos.

Pode-se observar que os concretos com maior consumo de cimento (450 kg/m³), apresentaram reduções de cerca de 6% no teor de poros na seção para agregado convencionais e 7% para agregados de escória. A redução na porosidade provavelmente está relacionada com a maior formação de produtos de hidratação promovida pelo acréscimo de cimento.

Ressalta-se que os agregados de escória de aciaria podem apresentar poros internos, isso de certa forma pode afetar o resultado final de porosidade na seção. Na Figura 28 é apresentado uma seção de um corpo de prova de concreto com agregado de escória de aciaria. Notam-se agregados que possuem poros internos, marcados de vermelho. Esses poros são contabilizados no ensaio, mas não necessariamente apresentam prejuízos para o concreto, visto que são poros fechados.



Figura 28 - Seção de um corpo de prova de concreto produzido com agregado de escória de aciaria

O comportamento dos resultados desse ensaio não possui uma boa correlação com os outros resultados apresentados anteriormente que também dependem da estrutura de poros, como índice de vazios e velocidade de pulso ultrassônico. O ensaio de porosidade na seção possui a limitação de não conseguir medir o sistema de poros longitudinalmente, então não se sabe como esses poros na seção se conectam ao longo de toda a altura. Ressalta-se que esses ensaios se correlacionam com a porosidade do concreto, mas nenhum deles de fato consegue medi-la.

5.6.5 Resistência à Compressão

Os resultados de resistência à compressão dos concretos são apresentados na Figura 29.

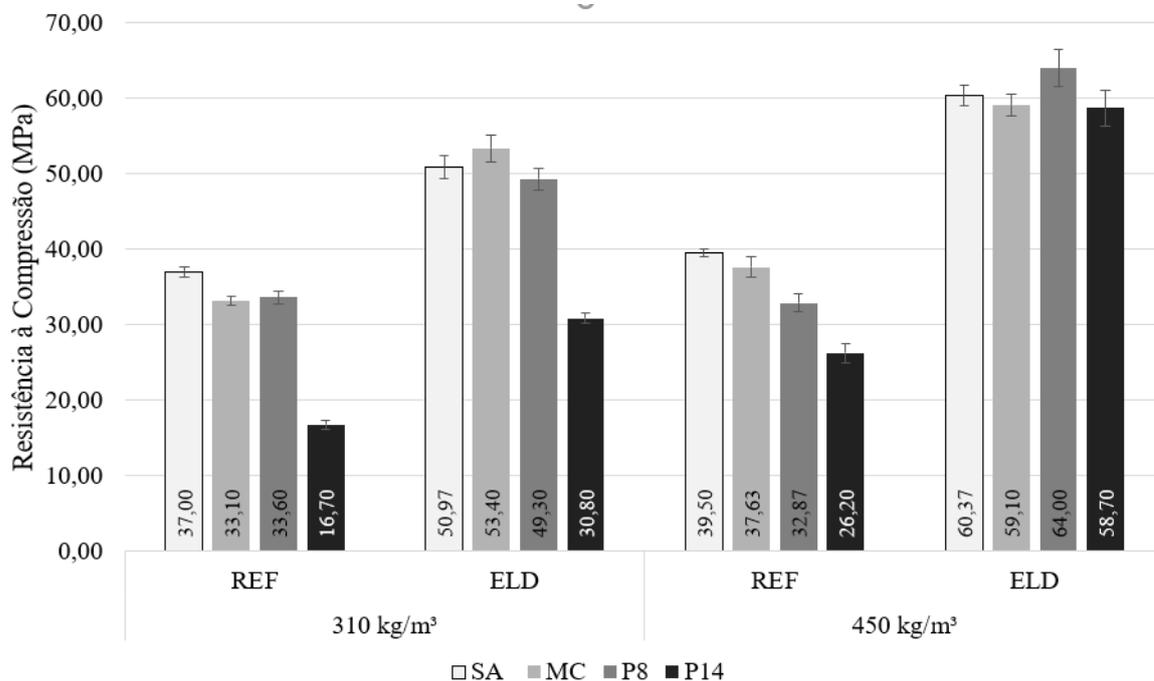


Figura 29 - Resistência à compressão dos concretos produzidos.

O aumento no consumo de cimento influencia positivamente na resistência mecânica. Os concretos com 450 kg/m³ de cimento são cerca de 18,79% e 37,38% mais resistentes do que os de 310 kg/m³ para os agregados de referência e escória de aciaria, respectivamente. Isso está relacionado à maior presença de cimento na mistura (45% a mais) que permite a maior formação de produtos de hidratação (como C-S-H) e conseqüentemente gera a maior resistência. Como visto anteriormente, acredita-se que o fator água/aglomerantes para as misturas de 450 kg/m³ foi insuficiente para hidratar todo o cimento adicionado. Ajustando esse parâmetro, possivelmente as resistências à compressão seriam ainda maiores.

Os concretos produzidos com agregado de escória de aciaria apresentam maiores resistências à compressão quando comparados aos de referência. Para o consumo de cimento de 310 kg/m³, os concretos ELD são, em média, 57,56% mais resistentes do que os REF. Com relação aos de 450 kg/m³ o ganho de resistência média proporcionado pelo uso dos agregados de escória é de 82,15%. Biskri *et al* (2017) produziu concretos com consumo de cimento de 470 kg/m³, fator *a/c* 0,3, com adição de 10% de sílica ativa em massa de cimento e substituição dos agregados graúdos por escória de aciaria atingindo aos 28 dias resistências à compressão cerca de 34% superior aos convencionais. Da mesma forma, com substituição parcial do

agregado miúdo e total do agregado graúdo por escória de aciaria, San-José *et al* (2014) e Pellegrino e Gaddo (2009) produziram concretos mais resistentes que os convencionais em 35% e 30%, respectivamente.

O ganho de resistência nos concretos promovido pela utilização de agregados de escória de aciaria se deve a diversos fatores, como a maior resistência do agregado em si. De acordo com a caracterização dos materiais apresentada, os agregados de escória de aciaria foram 38% mais resistentes ao esmagamento do que o convencional (gnaisse). Sabe-se que o agregado é determinante no desempenho mecânico de matrizes cimentícias, sejam elas com classe de resistência normais ou especiais. Então, a utilização de agregados mais resistentes necessariamente aumenta a resistência à compressão do concreto.

Além da maior resistência dos agregados de escória comparado aos convencionais, a sua morfologia corrobora também com o melhor desempenho mecânico dos concretos. Os agregados de escória de aciaria possuem uma superfície rugosa com poros abertos, o que cria uma zona de transição interfacial entre agregado e pasta de cimento menor e menos porosa. A zona de transição interfacial (ZTI) é uma das regiões mais vulneráveis do concreto. Durante a hidratação do cimento é formado uma película de água em torno do agregado e posteriormente nessa região são produzidos grandes cristais de etringita e hidróxido de cálcio (Mehta & Monteiro, 2006; Taylor, 1997). Esses cristais criam uma rede porosa que dificultam a formação de C-S-H, por isso a ZTI é uma região porosa e frágil.

No caso dos agregados de escória de aciaria, provavelmente a sua superfície rugosa acumula água nas reentrâncias, onde posteriormente é formado C-S-H, diminuindo assim a porosidade dessa região. Brand e Roesler (2018) estudaram a ZTI de concretos produzidos com agregado de escória de aciaria, observando que a pequenas distâncias da face do agregado ($1\mu\text{m}$) o teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nos concretos com escória de aciaria era cerca de 8% inferior ao convencional. Para distâncias maiores de 5-100 μm a diferença é de 2%. Além disso, outros estudos avaliaram concretos produzidos com agregado de escória de aciaria e observaram que a ZTI desses era menor do que os convencionais (Andrade, 2018; Pang, et al., 2015). A Figura 30 mostra a superfície do agregado graúdo de escória de aciaria e convencional.

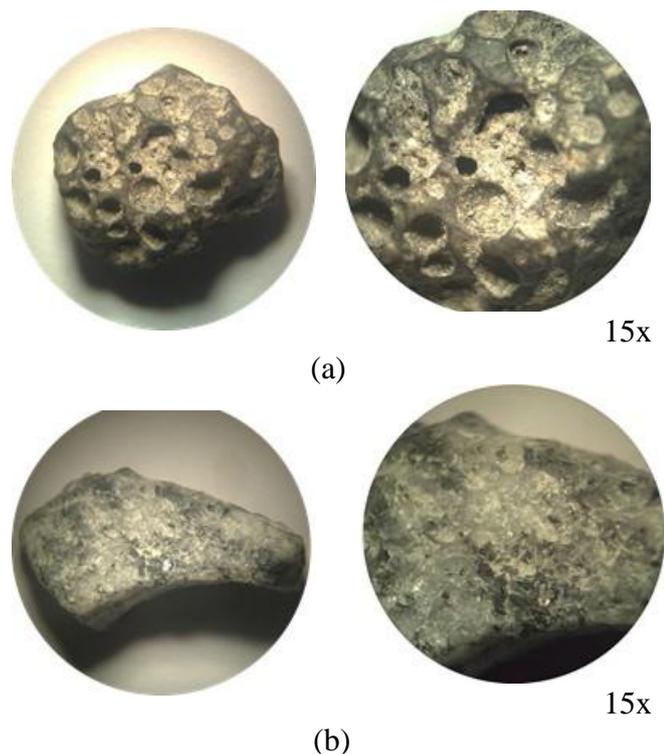


Figura 30 – (a) Agregado de escória de aciaria (b) Agregado convencional de gnaissse

Destaca-se, ainda, que na composição da escória de aciaria há um teor significativo de hidróxido de cálcio, componente que as pozolanas utilizam para produzir C-S-H. Assim, a combinação desses materiais pode aumentar a resistência à compressão dos concretos, principalmente em maiores idades. Nesse estudo, os concretos produzidos com agregado de escória de aciaria e sílica ativa apresentavam, no geral, as maiores resistências à compressão.

Matrizes produzidas com powders LD (P8 e P14) apresentaram bom desempenho quando comparado com as adições minerais comerciais. Esse resultado concorda com o estudo de Carvalho *et al* (2019), onde concretos produzidos com substituições de 10-40% em volume de cimento por powder de escória de aciaria apresentaram resistências a compressão cerca de 10% superiores aos de referência. Roslan *et al* (2016) produziu concretos com fator água/aglomerantes de 0,58 e substituição em massa de cimento por powder de escória de aciaria em 10% obtendo concretos 5% mais resistentes a compressão aos 28 dias. Por outro lado, Wang *et al* (2013), Liu e Wang (2017) e Wang, Yang e Yan (2013) utilizando substituições variadas de 15-25% em massa de powder de escória de aciaria observaram decréscimo na resistência aos 28 dias de 10-5%.

Em média, os concretos com tratamento P8 possuem resistências 3,42% inferior aos com metacaulim. Como o ensaio de resistência à compressão foi realizado na idade de 42 dias

acredita-se que a ação pozolânica/cimentante das adições incorporadas a matriz tenham contribuído com esse resultado. No entanto, percebe-se a necessidade da produção de concretos sem adição mineral para poder avaliar o real desempenho do powder LD.

Importante ressaltar que os concretos com metacaulim e sílica ativa possuem um menor consumo de água do que os com powder LD. Essa diferença entre os volumes de água provocou diferentes índices de vazios que se correlacionam bem com os resultados de resistência a compressão, como apresentado na Figura 31.

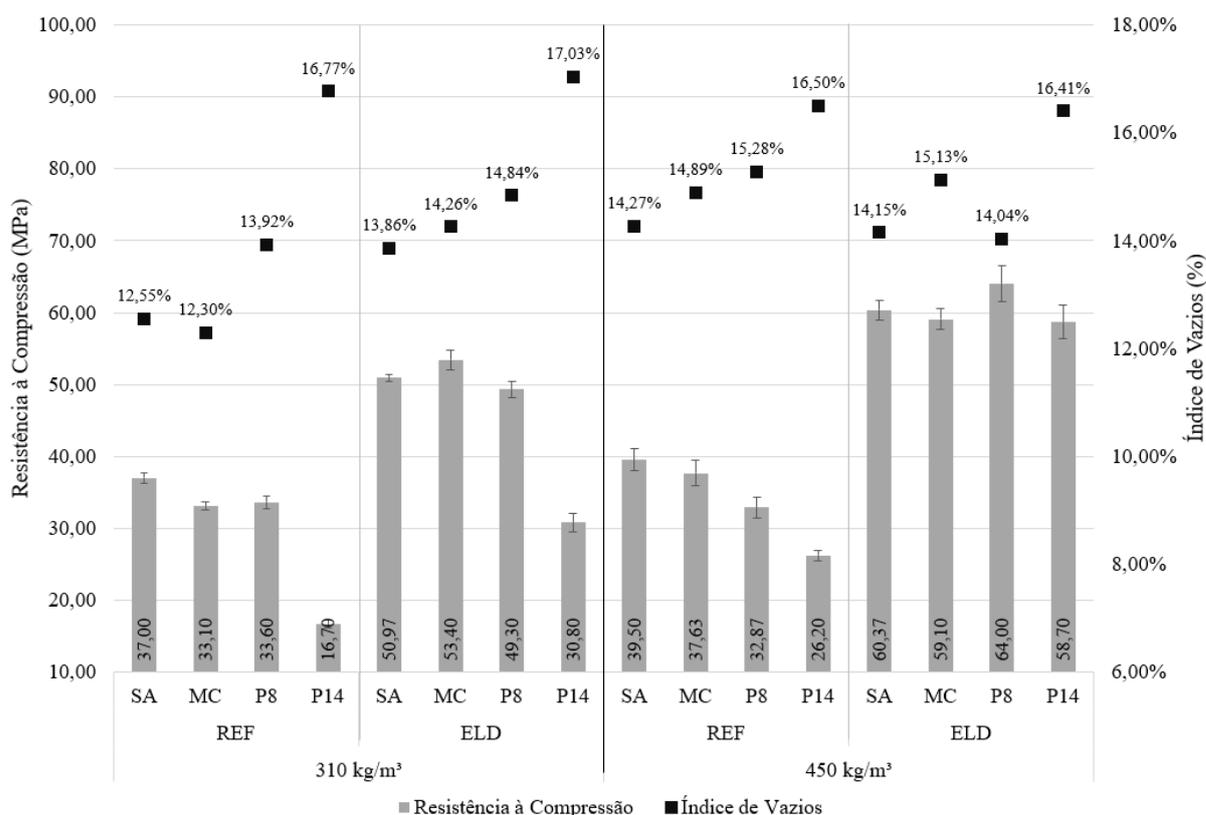


Figura 31 - Resultados de resistência à compressão dos concretos combinado aos índices de vazios

Provavelmente corrigindo esse parâmetro a resistência dos concretos com powder LD será mais próxima (ou superior) das adições comerciais. Ao considerar os diferentes consumos de água, o acréscimo de resistência promovido pelo uso do agregado de escória é mais perceptível nos concretos com adição de 14% de powder LD. No caso o concreto REF-P14-310 apresentava metade da resistência dos outros traços, 16,7 MPa. A substituição total de agregado de referência por agregado de escória de aciaria promoveu um aumento de 84,43% na resistência desse concreto, que compensou em parte o índice de vazios elevado.

5.6.6 Resistência à Tração

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos são apresentados na Figura 32.

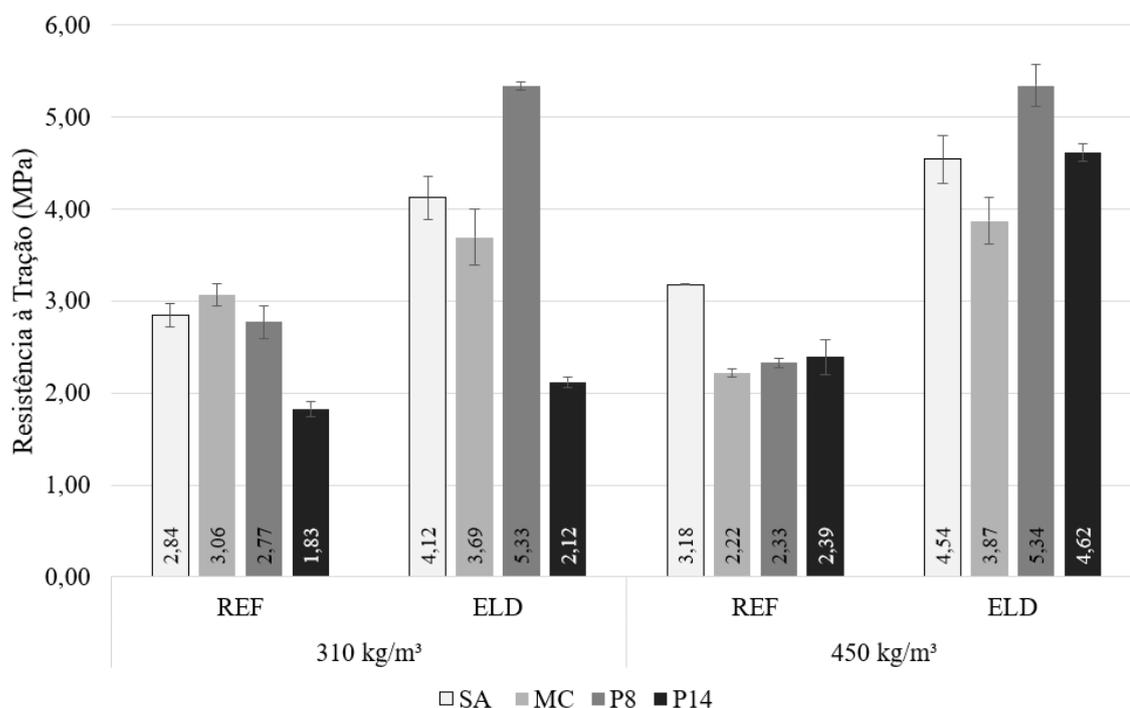


Figura 32 - Resistência à Tração dos concretos

Observa-se que aqueles produzidos com agregado de escória de aciaria possuem maior resistência comparado aos convencionais. Esse resultado está relacionado a maior resistência do agregado e menor ZTI formada com a sua utilização, como explicado anteriormente.

Além disso, nota-se que o consumo de cimento não teve grande influência no desempenho mecânico dos concretos. Para a maioria dos traços, os resultados são similares para os dois teores de cimento utilizados. Nos concretos ELD-P14 é possível observar o maior acréscimo de resistência relacionado ao aumento do consumo de cimento, cerca 117%. Em nenhum outro traço ocorre comportamento similar.

Não é possível estabelecer uma relação clara do efeito do tipo de adição mineral no desempenho mecânico à tração dos concretos. Os concretos com agregado de referência e consumo de cimento de 310 kg/m³ possuem comportamentos semelhantes aos observados anteriormente nos resultados de índice de vazios e resistência à compressão. Para os outros agregados e consumos de cimento, observa-se que tratamento P8 combinado a agregado de escória conseguiu produzir as melhores resistências à tração. Ressalta-se que nos traços com

agregado de escória e consumo de cimento de 450 kg/m^3 , a resistência à tração dos concretos com 14% de powder LD foi praticamente a mesma dos com sílica ativa, contrariando todos os resultados anteriores.

A resistência à tração por compressão diametral depende significativamente da estrutura de poros do concreto. Nesse ensaio, o esforço de tração é gerado pela distribuição da força de compressão na seção transversal do corpo de prova. Por isso, a resistência à tração por compressão diametral se relaciona bem com os resultados de porcentagem de poros na seção. A junção desses dados é apresentada na Figura 33. Observe que os concretos ELD-P8 possuem os menores percentuais de poros na seção, isso provavelmente explica as maiores resistências à tração.

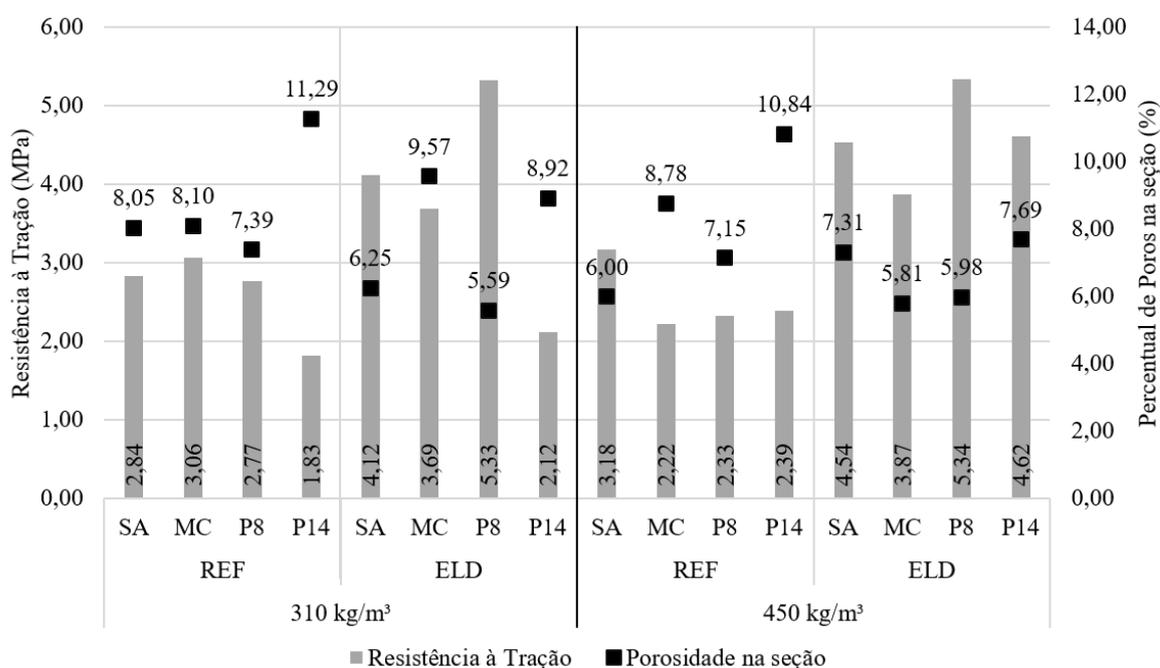


Figura 33 - Resultados de resistência à tração e percentual de poros na seção

5.7 Análise de Durabilidade no Concreto

A análise da durabilidade se inicia com a avaliação da penetração de cloretos no corpo de prova, seguida do estudo da influência das adições minerais na capacidade de formar cloretos combinados e na relação da penetração de cloretos com o ensaio de velocidade de pulso ultrassônico.

5.7.1 .Penetração de íons cloreto no concreto

A Figura 34 apresenta os resultados relativos à penetração de cloretos no concreto após o período de 35 e 55 dias de imersão, mensurado pela profundidade penetrada por cloretos e a

relação entre a área atacada e área total da seção do corpo de prova (A_A/A_T). Nas duas metodologias os traços apresentaram o mesmo comportamento, mostrando que ambos são eficientes para mensurar a penetração de íons cloreto por difusão. Em ambos os períodos de imersão, 35 e 55 dias, a influência do consumo de cimento e do tipo de agregado e adição mineral foi o mesmo.

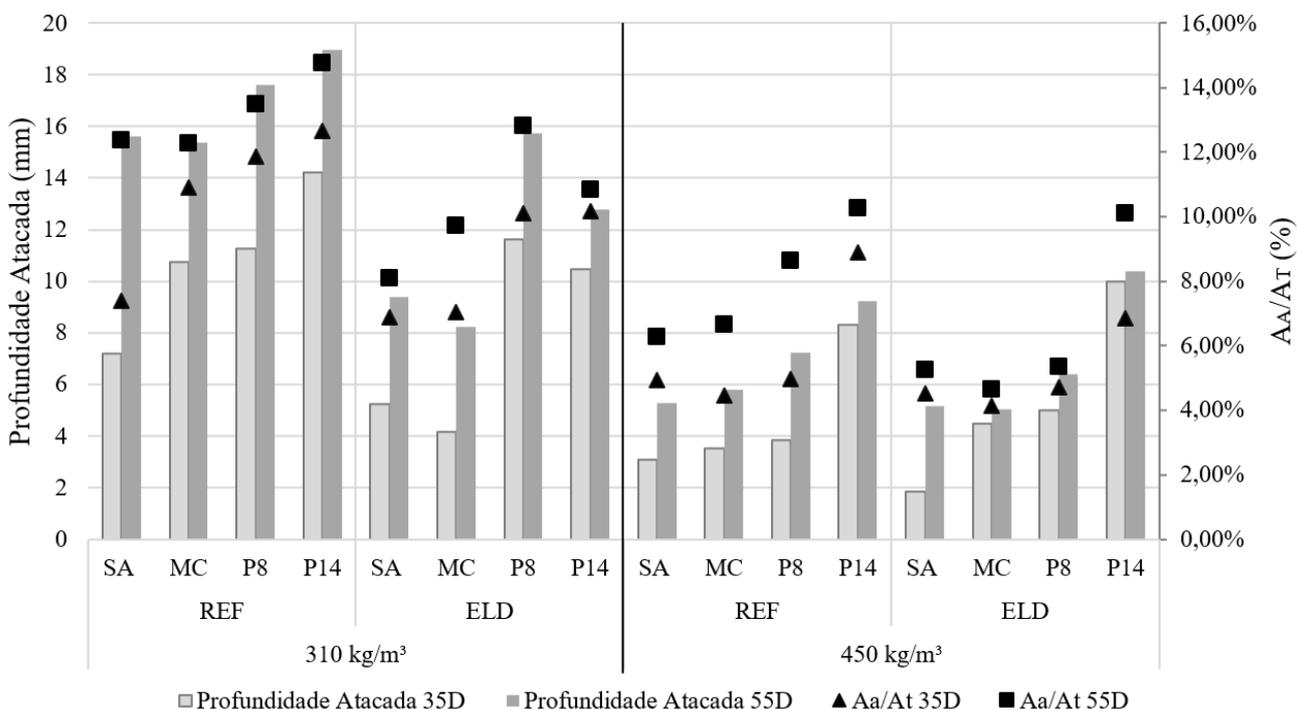


Figura 34 - Gráfico com a profundidade e a área atacada por cloretos, nas idades de 35 e 55 dias

O aumento no consumo de cimento na mistura levou a diminuição da penetração de cloretos. Nos concretos com 450 kg/m³ de cimento a relação A_A/A_T aos 35 dias de imersão é inferior aos de 310 kg/m³ cerca de 45% para os concretos REF e em média 41% para os ELD. Esse resultado se correlaciona com o percentual de poros na seção, onde o aumento do consumo de cimento levou ao decréscimo na ordem de 5% do teor de poros.

Observa-se que os concretos fabricados com agregado de escória de aciaria apresentaram melhor desempenho frente a penetração de cloretos. O ensaio de teor de poros na seção já havia indicado uma menor porosidade nesses concretos (cerca de 12% inferior), o que implica diretamente em uma menor penetração de íons cloreto. Por exemplo, para os concretos com 310 kg/m³ de consumo de cimento, a profundidade atacada em 35 dias de imersão reduziu em média 26% com a utilização do agregado de escória de aciaria. Esse resultado é coerente com os encontrados por Santamaria *et al* (2018), que produziu concretos com 300 kg/m³ de

consumo de cimento e substituição total dos agregados graúdos por escória de aciaria, obtendo após 5 anos de exposição dos corpos de prova em ambiente marítimo, profundidades de penetração cerca de 50% menores quando comparado aos concretos convencionais.

A respeito dos tipos de adição mineral, observando os resultados de profundidade atacada, é possível notar um comportamento análogo ao apresentado no índice de vazios, onde a sílica ativa possui o melhor desempenho, seguida do metacaulim e do powder LD com 8% e 14% de adição. A melhor performance dos concretos com sílica ativa está provavelmente relacionada a uma maior ação pozolânica, que refinou a estrutura de poros do concreto dificultando a difusão de íons cloreto. Tadayon, Shekarchi e Tadayon (2016) observaram que concretos com sílica ativa apresentavam um teor de cloretos totais (cloretos livres mais cloretos combinados) 21% menor do que aqueles produzidos com metacaulim para um período de exposição de 50 meses em zona de flutuação de maré. Para ensaios de laboratório os resultados foram similares.

Destaca-se que assim como nos resultados de resistência à compressão, o desempenho dos concretos com powder LD 8% foi bastante similar ao daqueles com adição de metacaulim. Em média os concretos com 8% de powder LD apresentaram profundidade de penetração 8% superior ao com metacaulim, no período de 35 dias. A exceção para esse comportamento é o traço ELD-P8-310 que obteve o triplo da profundidade de penetração de cloretos comparado ao tratamento com metacaulim. Este fato provavelmente está relacionado a alguma anomalia na preparação desses corpos de prova, principalmente considerando o pequeno espaço amostral, apenas 2 corpos de prova. O desempenho observado nas matrizes com 8% de powder LD contradiz a literatura, onde concretos fabricados com essa adição apresentaram maior permeabilidade à íons cloretos (Liu & Wang, 2017; Wang, et al., 2013; Wang, et al., 2013).

Além disso, considerando as recomendações da NBR 6118 (2013) para ambientes de máxima agressividade (respingos de maré – Classe IV) o cobrimento mínimo exigido é 50 mm. Aos 55 dias de exposição em solução agressiva todos os concretos apresentaram resultados de profundidade atacada menores que 20 mm, indicando um coeficiente de segurança de 50%. Inclusive, os concretos de 450 kg/m³ de cimento apresentaram profundidade atacada menor que 12,5 mm, o que está de acordo para cobrimento mínimo de 25 mm exigido em ambiente de agressividade mínima (rural – Classe I).

A fim de analisar o efeito do tempo na durabilidade dos concretos, a Tabela 11 apresenta as taxas de penetração de cloretos por dia para os períodos de exposição de 35 e 55 dias.

Tabela 11 – Comparação das taxas de deterioração por dia (%/dia e mm/dia) nos períodos de exposição de 35 e 55 dias

Traço			A _A /A _T (%/dia)		Profundidade (mm/dia)	
			35 dias	55 dias	35 dias	55 dias
310 kg/m ³	REFERÊNCIA	SA	0,211	0,206	2,050	2,601
		MT	0,312	0,205	3,067	2,559
		P8	0,339	0,225	3,214	2,938
		P14	0,362	0,246	4,060	3,160
	ESCÓRIA	SA	0,197	0,135	1,500	1,567
		MT	0,201	0,162	1,183	1,374
		P8	0,288	0,214	3,319	2,619
		P14	0,290	0,181	2,988	2,128
450 kg/m ³	REFERÊNCIA	SA	0,141	0,104	0,881	0,881
		MT	0,127	0,111	1,005	0,964
		P8	0,142	0,144	1,102	1,203
		P14	0,255	0,171	2,376	1,539
	ESCÓRIA	SA	0,121	0,087	0,526	0,863
		MT	0,118	0,078	1,281	0,842
		P8	0,134	0,089	1,423	1,063
		P14	0,195	0,168	2,848	1,734

Nota-se que para ambos os métodos existe a tendência das taxas de penetração serem menores para os corpos de prova expostos a solução por 55 dias. Analisando, por exemplo, o concreto REF-P8-310 a sua taxa de penetração A_A/A_T para 35 dias de imersão foi de 0,339%/dia, enquanto que para 55 dias foi reduzida a 0,225%/dia. Assim, considerando a porcentagem total atacada nesse traço e conservando a taxa de 0,339%/dia até os 35 dias de exposição, a real taxa de penetração desse concreto dos 35 aos 55 dias seria de 0,02%. Isso indica que a penetração de cloretos segue uma tendência de uma curva logarítmica, se estabilizando após um período de exposição.

Isso provavelmente se deve a um refinamento dos poros que reduz o coeficiente de difusividade desses concretos, fenômeno já estudado por Sun, Liang e Chang (2012) e Pack *et al* (2010). No caso dos concretos produzidos nessa pesquisa, a redução pode ser ocasionada pela formação de cloretos combinados (como sal de Friedel) ou pela geração de C-S-H através da atividade pozolânica do cimento utilizado ou das adições minerais empregadas. Na metodologia de profundidade atacada por cloreto essa variação da taxa é menor, devido a menor precisão desse método.

Com relação ao desempenho, observa-se que as taxas de penetração para os concretos com 450 kg/m³ de cimento são cerca de 50% menores quando comparado aos de 310 kg/m³. Além disso, nota-se que os concretos com powder LD 8% são mais próximos aos de sílica ativa e metacaulim, indicando novamente que o excesso de água prejudicou o desempenho dos concretos com 14% powder LD.

5.7.2 Capacidade de formar cloretos combinados

A Figura 35 apresenta os resultados obtidos na análise termogravimétrica para avaliação da formação de cloretos combinados em matrizes com sílica ativa, metacaulim e 8% de powder LD.

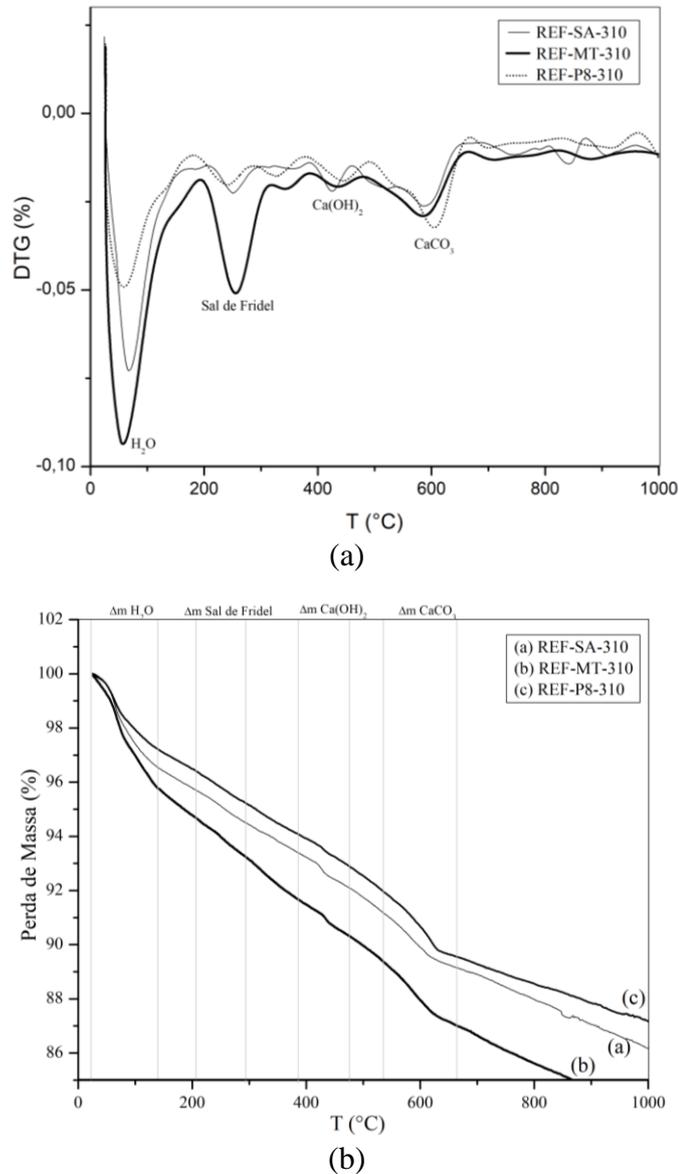


Figura 35 – Resultado da análise termogravimétrica dos concretos (a) Curva DTG (b) Curvas de Perda de Massa

Na curva de DTG (Figura 35a) é possível observar que as três amostras apresentaram nitidamente o pico de sal de Friedel (250°C), indicando que houve formação desse composto nos três concretos. Na Figura 35b observa-se que as amostras de concreto com sílica ativa, metacaulim e 8% de powder LD possuíam, respectivamente, 1,20%, 1,45% e 1,19% de sal de Friedel em relação à massa da amostra. Os valores são coerentes com a literatura. Shi *et al* (2017) observou em análises de DTG teores de sal de Friedel em torno de 1% para argamassas com diversos teores de metacaulim e sílica ativa.

O sal de Friedel pode ser formado a partir do C₃A, fornecido pelo cimento, ou de alumina reativa, advindo de adições minerais (Talero, et al., 2011). Por isso, esperava-se maiores formações de sal de Friedel nos concretos com metacaulim, visto que o material possui cerca de 29% de alumina reativa (Talero, et al., 2011; Trusilewicz, et al., 2012). Os teores de sal de Friedel para os concretos com sílica ativa e powder de escória foram similares, pois ambos possuem teores baixos de alumina (respectivamente 0% e 3,7%), e provavelmente não possuem alumina reativa. Dessa forma, a possível formação de sal de Friedel observada se deve às características da dosagem do concreto como fator água/aglomerantes, porosidade e consumo dos cimentos, visto que as três amostras analisadas advêm de concretos fisicamente semelhantes.

Como a amostragem desse ensaio foi retirado de fragmentos da argamassa de concretos expostos a solução de NaCl, possivelmente os teores de areia podem ter prejudicado em partes a acurácia dos resultados. A fim de completar essas análises, recomenda-se a realização de ensaios suplementares que também contabilizem o sal de Friedel, como DRX e ensaios titulométricos.

5.7.3 Velocidade de Pulso Ultrassônico

A Tabela 12 apresenta a variação da velocidade de pulso de ultrassônico (VPU) após a exposição dos corpos de prova em solução de NaCl, por 35 e 55 dias.

Tabela 12 – Variação da VPU após 35 e 55 dias de exposição em solução de NaCl

	310 kg/m ³				450 kg/m ³			
	REFERÊNCIA		ESCÓRIA		REFERÊNCIA		ESCÓRIA	
	35 dias	55 dias	35 dias	55 dias	35 dias	55 dias	35 dias	55 dias
SA	-0,48%	0,03%	-1,93%	0,13%	3,05%	-0,58%	-9,04%	-5,62%
MT	0,94%	9,09%	-5,37%	-0,03%	-3,06%	-2,94%	3,11%	0,56%
P8	0,62%	-0,60%	-2,76%	2,57%	0,64%	-3,20%	-2,87%	1,40%
P14	0,32%	1,13%	1,13%	2,78%	2,65%	6,08%	-8,03%	-7,95%

De modo geral, não é observado um padrão nos valores de VPU que se relacione com as demais propriedades dos concretos. Esperava-se que as velocidades de pulso aumentassem devido a formação de sal de Friedel que contribui com o refinamento dos poros, como estudado por Liu *et al* (2017). No entanto, como a formação desse sal é pequena (pela análise de TG cerca de 1,2%), e as matrizes analisadas são muito heterogêneas, acredita-se que a variação provocada na estrutura de poros do concreto foi baixa. Não foi possível observar a influência desse parâmetro no VPU.

Além disso, a umidade nos corpos de prova interfere significativamente nos resultados de VPU. Nos corpos de prova analisados, a perda de massa média foi de 0,19% e 0,22% ao fim do período de 35 dias e 55 dias, respectivamente. Segundo Guneyli *et al* (2017), uma diminuição no teor de umidade de 1% pode levar a uma redução de 3% na velocidade de pulso ultrassônico. Então, possivelmente esse fator também pode ter influenciado no resultado desse ensaio.

6 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos nota-se que a utilização da escória de aciaria como agregado e adição mineral produz matrizes com desempenho mecânico equivalente ou superior aos concretos convencionais.

Com relação a utilização da escória de aciaria como agregado, observa-se um aumento significativo da resistência à compressão e à tração dos concretos, relacionado à morfologia e à maior resistência do agregado em si. Apesar das matrizes terem apresentado maiores índices de vazios e absorção de água, esse resultado não afetou seu desempenho mecânico e sua durabilidade. Os concretos com agregado de escória de aciaria apresentaram profundidades de penetração por cloretos inferiores aos convencionais. Além disso, baseado na avaliação do teor de poros na seção e da velocidade de pulso ultrassônico, acredita-se que as matrizes produzidas com agregado de escória de aciaria apresentam estrutura semelhante aos convencionais.

Sobre a incorporação da escória de aciaria como adição mineral, observa-se que a dosagem de 8% indicou que a sua adição não gera nenhum prejuízo ao concreto. As matrizes apresentaram características mecânicas semelhantes aos concretos com adição comercial, principalmente ao metacaulim. Apesar de não ter sido avaliada diretamente a ação cimentante do powder LD, pelos seus resultados similares aos concretos com adição mineral comercial entende-se que esse material não é inerte, ele contribui de certa forma com o desempenho e a estrutura do concreto.

Com relação a durabilidade, o desempenho do powder LD 8% também foi semelhante aos convencionais. Analisando a formação de sal de Friedel, apenas a adição de metacaulim aparenta influenciar diretamente na formação de cloretos de combinados. No entanto, para fazer essa afirmação seria necessário avaliar um concreto fisicamente similar sem adição. Apesar da sílica ativa, do powder LD 8% e do metacaulim produzirem resultados semelhantes, o desempenho mecânico e a resistência a cloretos das matrizes com sílica ativa aparentam ser superiores, o que pode estar relacionado com sua melhor ação pozolânica.

Com relação a maior dosagem de powder LD (14%), foram apresentados resultados inferiores aos outros traços, isso se deve principalmente ao maior consumo de água nesses concretos. Entende-se que era necessário trabalhar com o fator água/aglomerantes em volume, assim como as adições, devido as diferentes massas específicas. Os teores de superplastificante para os concretos com powder LD 14% foram insignificantes perto dos outros traços (inclusive

powder LD 8%), o que era um indicativo do excesso de água nesses concretos. Apesar do comportamento inferior desse concreto quando comparado aos outros traços, de modo geral ele obteve bons resultados quanto a durabilidade e ao desempenho mecânico.

Por fim, o trabalho demonstrou que a incorporação de um resíduo, escória de aciaria, em concretos pode produzir matrizes mais eficientes que as tradicionais tanto no estado fresco quanto endurecido. A aplicação dos rejeitos de escória de aciaria com uma finalidade nobre, como adição mineral e agregados para concretos, apresenta uma vantagem para o setor siderúrgico e a construção civil que será capaz de produzir concretos mais competentes mecanicamente e mais duráveis.

REFERÊNCIAS

AASHTO, 1980. *T259: Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO, 2015. *T277: Rapid Chloride Permeability Test*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.

ABNT, 1987. *NBR 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2003. *NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2003. *NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2005. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2006. *NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2009. *NBR 7211: Agregado para concreto - Especificação*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2009. *NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2011. *NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2012. *NBR 7212: Execução de concreto dosado em central — Procedimento*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

- ABNT, 2013. *NBR 15575: Edificações habitacionais — Desempenho*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT, 2013. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT, 2013. *NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT, 2015. *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT, 2018. *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Aitcin, P., 2000. *High performance concrete*. São Paulo: Pini.
- Alexander, M. & Mindness, S., 2005. *Aggregates in Concrete*. New York: CRC Press.
- Anastasiou, E., Filikas, K. & Stefani, M., 2014. Utilization of fine recycled aggregates in concrete with fly ash and steel slag. *Construction and Building Materials*, Volume 50, pp. 154-161.
- Andrade, H. D., 2018. *Carbonatação em Concretos de Escória de Aciaria*. Ouro Preto: Diss. Mestrado.
- ANEPAC, 2015. *Relatório: O Mercado de agregado no Brasil*. São Paulo: Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção.
- Arribas, I., Vegas, I., San-José, J. & Manso, J., 2014. Durability studies on steelmaking slag concretes. *Materials and Design*, Volume 63, pp. 168-176.
- ASTM, 2005. *C1202: Electrical Indication of Chloride's Ability to Resist Chloride*. Philadelphia: ASTM Standards.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P. & Polder, R. P., 2004. *Corrosion of Steel in Concrete*. Weinheim: Wiley.
- Biskri, Y., Achoura, D., Chelghoum, N. & Mouret, M., 2017. Mechanical and durability characteristics of High Performance Concrete containing steel slag and crystalized slag as aggregates. *Construction and Building Materials*, Volume 150, pp. 167-178.

- Brand, A. & Roesler, J., 2018. Interfacial transition zone of cement composites with steel furnace slag aggregates. *Cement and Concrete Composites*, Volume 86, pp. 117-129.
- Broomfield, J. P., 2007. *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, investigation and repair*. New York: Taylor and Francis.
- Cartuxo, F. et al., 2015. Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer. *Construction and Building Materials*, Volume 89, pp. 36-47.
- Carvalho, J. C. L. et al., 2017. Study of mechanical behavior of block for structural masonry produced with steel slag in substitution of natural aggregates. *Masonry International*, Volume 30, pp. 31-60.
- Carvalho, J. et al., 2019. More eco-efficient concrete: an approach on optimization and use of waste-based supplementary cementing materials. *Construction and Building Materials*, Volume 206, pp. 397-409.
- Castro, P. & Huber, M. E., 2003. *Marine Biology*. s.l.:McGraw–Hill.
- Chatterji, S., 1994. Transportation of ions through cement based materials. Part 3: Experimental evidence for the basic equations and some important deductions. *Cement and Concrete Research*, Volume 7, pp. 1229-1236.
- Diamond, S., 2006. The patch microstructure in concrete: The effect of superplasticizer. *Cement and Concrete Research*, Volume 36, pp. 776 - 779.
- Diniz, D., Carvalho, J., Mendes, J. & Peixoto, R., 2017. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical Soil Stabilizer for Use in Roads. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 29.
- Dyer, T., 2014. *Concrete Durability*. Boca Raton: CRC Press.
- El-Jazairi, B. & Illston, J., 1980. The hydration of cement paste using the semi-isothermal method of derivative thermogravimetry. *Cement and Concrete Research*, Volume 10, pp. 361-366.
- Geng, C., Xu, Y., Weng, D. & Wu, X., 2010. A time-saving method to determine the chloride threshold level for depassivation of steel in concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 24, pp. 903-909.

- Gjørsv, O. E., 2009. *Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments*. New York: Taylor & Francis.
- Glass, G. K. & Buenfeld, N. R., 1997. The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science*, Volume 39, pp. 1001-1013.
- Guneyli, H., Karahan, S., Guneyli, A. & Yaptct, N., 2017. Water content and Temperature Effect on Ultrasonic Pulse Velocity of Concrete. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Volume 53, pp. 159-166.
- Hausmann, D. A., 1967. Steel corrosion in concrete - How does it occur?. *Materials Protection*, Volume 6, pp. 19-23.
- Hussain, S. E., Rasheeduzzafar, A., Al-Musallam, A. & Al-Gahtani, A., 1995. Factor affecting threshold chloride for reinforced corrosion in concrete. *Cement and Concrete Research*, Volume 25, pp. 1543-1555.
- IABR, 2018. *Relatório de Sustentabilidade 2016-2017*, Rio de Janeiro: Instituto Aço.
- Koch, G., Brongers, M. & Thompson, N., 2002. *Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States*. Houston: NACE International.
- Lamond, J. F. & Pielert, J. H., 2006. *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. Bridgeport: ASTM International.
- Liu, J. et al., 2017. Understanding the interacted mechanism between carbonation and chloride aerosol attack in ordinary Portland cement concrete. *Cement and Concrete Research*, Volume 95, pp. 217-225.
- Liu, J. & Wang, D., 2017. Influence of steel slag-silica fume composite mineral admixture on the properties of concrete. *properties of concrete*, Volume 320, p. 230-238.
- Liu, W. et al., 2016. Carbonation of concrete made with dredged marine sand and its effect on chloride binding. *Construction and Building Materials*, Volume 120, pp. 1-9.
- Machado, A., 2000. *Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciarias*. São Paulo: Tese de Doutorado.
- Manso, J., Polanco, J., Losanez, M. & González, J., 2006. Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. *Cement Concrete Composites*, Volume 28, pp. 528-534.

- Mays, G., 1997. *Durability of concrete structures : investigation, repair, protection*. London: CRC Press.
- McGrath, P. & Hooton, R., 1999. Re-evaluation of the AASHTO T259 90-day salt ponding test. *Cement and Concrete Research*, Volume 29, p. 1239–1248.
- Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M., 2006. *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. New York: McGraw-Hill.
- Mendes, J., 2018. *Thermal Properties of Cement-based composites*. Ouro Preto: Qualificação de Doutorado.
- Mendes, J. et al., 2017. Mechanical, rheological and morphological analysis of cement-based composites with a new LAS-based air entraining agent. *Construction and Building Materials*, Volume 145, pp. 648-661.
- Monosi, S., Ruello, M. & Sani, D., 2016. Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production. *Cement and Concrete Composites*, Volume 66, pp. 66-72.
- Neville, A. M., 2011. *Properties of concrete*. Harlow: Pearson Education .
- Nordtest, 1995. *NT Build 443: Concrete Hardened - Accelerated Chloride Penetration*. Espoo: Nordtest Methods.
- Ogirigbo, O. & Black, L., 2017. Chloride binding and diffusion in slag blends: Influence of slag composition and temperature. *Construction and Building Materials*, Volume 187, pp. 816-825.
- Oliveira, F. U., 2006. *Avaliação de três métodos de ensaio para determinação do potencial de expansão de escória de aciaria para uso em pavimentação*. Vitória: Dissertação de Mestrado.
- Pack, S. et al., 2010. Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment. *Cement and Concrete Research*, Volume 40, pp. 302-312.
- Page, C. L. & Page, M. M., 2007. *Durability of concrete and cement composites*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Pang, B., Zhou, Z. & Xu, H., 2015. Utilization of carbonated and granulated steel slag aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 84, p. 454–467.
- Pellegrino, C. & Gaddo, V., 2009. Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregates. *Cement & Concrete Composites*, Volume 31, pp. 663-671.

- Popovics, S., Rose, J. & Popovics, J., 1990. The Behavior of Ultrasonic Pulses in Concrete. *Cement and Concrete Research*, Volume 20, pp. 259-270.
- Qiang, W. & Peiyu, Y., 2010. Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag. *Construction and Building Materials*, Volume 24, pp. 1134-1140.
- Rabbani, A., Jamshidi, S. & Salehi, S., 2014. An automated simple algorithm for realistic pore network extraction from micro-tomography images.. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 123, pp. 164-171.
- Roslan, N. et al., 2016. Performance of steel slag and steel sludge in concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 104, pp. 16-24.
- Saint-Pierre, F., Philibert, A., Giroux, B. & Rivard, P., 2016. Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity. *Construction and Building Materials*, Volume 125, pp. 1022-1027.
- San-José, J., Vegas, I., Arribas, I. & Marcos, I., 2014. The performance of steel-making slag concretes in the hardened state. *Materials and Design*, Volume 60, pp. 612-619.
- Santamaria, 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*, Volume 161, p. 94–111.
- Santos, D., 2015. *Determinação do Teor de Metálicos através do Cone Magnético*. Ouro Preto: RECICLOS: Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos.
- 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*, p. 126–137.
- Shi, Y., Chen, H., Wang, J. & Feng, Q., 2017. Preliminary investigation on the pozzolanic activity of superfine steel slag. *Construction and Building Materials*, Volume 82, pp. 227-234.
- Shi, Z. et al., 2017. riedel's salt profiles from thermogravimetric analysis and thermodynamic modelling of Portland cement-based mortars exposed to sodium chloride solution. *Cement and Concrete Composites*, Volume 78, pp. 73-83.
- Silva, M. et al., 2016. Feasibility Study of Steel Slag Aggregates in Precast Concrete Pavers. *ACI MATERIALS JOURNAL*, Volume 113, pp. 439-446.

- Skalny, J., Marchand, J. & Odler, I., 2011. *Sulfate attack on concrete*. New York: CRC Press.
- Souza, B. d., 2015. *ADERÊNCIA DE BARRAS DE AÇO TIPO CA EM CONCRETO SUSTENTÁVEL*. Ouro Preto: Dissertação de Mestrado.
- Stanish, K. D., Hooton, R. D. & Thomas, M. D. A., 1997. *Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review*, Toronto: Department of Civil Engineering - University of Toronto.
- Sun, Y., Liang, M. & Chang, T., 2012. Time/depth dependent diffusion and chemical reaction model of chloride transportation in concrete. *Applied Mathematical Modelling*, Volume 36, pp. 1114-1122.
- Tadayon, M., Shekarchi, M. & Tadayon, M., 2016. Long-term field study of chloride ingress in concretes containing pozzolans exposed to severe marine tidal zone. *Construction and Building Materials*, Volume 123, p. 611–616.
- Talero, R. et al., 2011. Comparative and semi-quantitative XRD analysis of Friedel's salt originating from pozzolan and Portland cement. *Construction and Building Materials*, Volume 25, p. 2370–2380.
- Taylor, H. F. W., 1997. *Cement Chemistry*. s.l.:Thomas Telford Publishing.
- Toffolo, R., 2015. *PAVIMENTOS SUSTENTÁVEIS*. Ouro Preto: Dissertação de Mestrado.
- Torgal, F. P. & Jalali, S., 2010. *A sustentabilidade dos materiais de construção*. Barbudo: TecMinho.
- Trusilewicz, L., Fernandez-Martinez, F., Rahhal, V. & Talero, R., 2012. TEM and SAED Characterization of Metakaolin. Pozzolanic Activity. *Journal of the American Ceramic Society*, p. 2989–2996.
- Wahid, P. & Kamalam, N., 1993. Reductive dissolution of crystalline and amorphous Fe(III) oxides by microorganisms in submerged soil. *Biology and Fertility of Soils*, Volume 15, pp. 144-148.
- Wang, Q., Peiyu, Y., Jianwei, Y. & Bo, Z., 2013. Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 47, p. 1414–1420.

- Wang, Q., Yang, J. & Yan, P., 2013. Cementitious properties of super-fine steel slag. *Powder Technology*, Volume 245, pp. 35-39.
- Wang, Y., Nanukuttan, S., Bai, Y. & Bashe, P., 2017. Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes. *Construction and Building Materials*, Volume 140, p. 173–183.
- Wang, Y. et al., 2018. Prediction model of long-term chloride diffusion into plain concrete considering the effect of the heterogeneity of materials exposed to marine tidal zone. *Construction and Building Materials*, Volume 159, pp. 297-315.
- Ye, H. et al., 2016. Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation. *Construction and Building Materials*, Volume 112, pp. 457-463.
- Young, J., Francis, A. & Mindess, S., 1998. *The science and technology of civil engineering materials*. New Jersey: Prentice Hall.
- Zhao, J. et al., 2016. Self-cementitious property of steel slag powder blended with gypsum. *Construction and Building Materials*, p. 835–842.
- Zhong, R., Xu, M., Netto, R. V. & Wille, K., 2016. Influence of pore tortuosity on hydraulic conductivity of pervious concrete: Characterization and modeling. *Construction and Building Materials*, Volume 125, pp. 1158-1168.
- Zhu, X., Zi, G., Cao, Z. & Cheng, X., 2016. Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 110, pp. 369-380.
- Zuquan, J., Xia, Z., Tiejun, Z. & Jianqing, L., 2018. Chloride ions transportation behavior and binding capacity of concrete exposed to different marine corrosion zones. *Construction and Building Materials*, Volume 177, pp. 170-183.