UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

SARA DE CARVALHO ZAGO

**Avaliação da durabilidade do concreto da construção civil com a utilização de
agregados de escória de aciaria LD**

Lorena
2019

SARA DE CARVALHO ZAGO

**Avaliação da durabilidade do concreto da construção civil com a utilização de
agregados de escória de aciaria LD**

Tese apresentada à Escola de Engenharia
de Lorena da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Doutor em
Ciências do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Materiais.

Orientador: Fernando Vernilli

Co-orientador: Oswaldo Cascudo

Versão corrigida

Lorena
2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Zago, Sara de Carvalho

Avaliação da durabilidade do concreto da construção civil com a utilização de agregado de escória de aciaria LD / Sara de Carvalho Zago; orientador Fernando Vernilli; co-orientador Oswaldo Cascudo - Versão Corrigida. - Lorena, 2019.
260 p.

Tese (Doutorado em Ciências - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais na Área de Materiais Convencionais e Avançados) - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. 2019

1. Escória de aciaria ld. 2. Expansão . 3. Agregado. 4. Durabilidade . 5. Concreto. I. Título. II. Vernilli, Fernando, orient. III. Cascudo, Oswaldo, co-orient.

AGRADECIMENTOS

Como sendo um dos mais difíceis momentos ao longo destes cinco anos, em função das inúmeras pessoas que apoiaram e de seus desdobramentos para concluir este projeto, tento aqui demonstrar a minha gratidão a todos pelo honrado trabalho desenvolvido envolvendo tantas parcerias.

Acima de tudo, agradeço a Deus por me guiar em um caminho de tamanha dificuldade, por colocar-me diante de pessoas comprometidas em realizar o melhor de cada uma delas. Agradeço a Deus por me reerguer após cada uma das quedas e me manter firme em meu propósito, não para a minha honra, mas para a honra Dele.

Agradeço ao meu marido, Diego, que diariamente me incentivou, acreditou em mim e não mediu esforços para que este projeto fosse concluído. Agradeço por se interessar e buscar aprender sobre o tema, por se orgulhar deste trabalho tanto quanto eu. Poucos conhecerão este projeto como você conheceu e poucos compreenderão que sem você tudo teria sido diferente.

Aos meus amados irmãos, Iara, Hugo e Décio, a minha querida mãe, Elisabete, aos meus avós Amador *'in memoriam'* e Marly que me ensinaram o verdadeiro valor da educação e que me ajudaram em tantos momentos a superar a ausência e a distância com amor, incentivo e orações.

À minha estimada família agregada, Olga Lucia, Claudinho, Jéssica e Gustavo, eu agradeço por me receberem em cada uma das minhas viagens e por as terem feito mais felizes e confortáveis para que o objetivo principal se cumprisse.

Manifesto aqui minha sincera gratidão ao professor Fernando Vernilli, por aceitar me orientar sob condições atípicas, demonstrando sua confiança e encorajamento para o meu crescimento pessoal e profissional, sendo em muitos momentos ao longo destes sete anos mais do que um orientador, um amigo. Não deixo de agradecer também ao professor Oswaldo Cascudo, que gentilmente me recebeu na UFG, me abriu além das portas físicas, as portas para o conhecimento. Desejo com sinceros votos de amizade, que se fortaleça essa rica parceria entre USP e UFG.

As parcerias findadas neste trabalho foram imprescindíveis para a sua conclusão. Por isso, meus respeitosos agradecimentos aos laboratoristas do Labitecc, Vitor, Antônio Carlos e Walter. À CSN pela doação e envio do material a UFG, em especial a Sidney, Tarciso Vieira (o que tem a Força!) e Marcel Demarco. Agradeço a Furnas por liberar a execução de inúmeros ensaios em suas instalações, aos engenheiros Anne Neiry, Alexandre de Castro e Flávio de Lima, aos colaboradores Renato Batista, Vander, Sílvio, Aloísio, Edson e Solanda que com muita dedicação me auxiliaram a realizar o programa experimental. Agradeço ainda aos membros do CRT/UFG, em especial à professora Cecília Maria Alves de Oliveira e a geóloga Flávia Gomes de Souza, aos membros do LabMIC, Tatiane Oliveira e Henrique Camargo que realiza seu trabalho com excelência.

Às queridas amigadas construídas com os alunos da UFG que amavelmente me receberam Mônica, Hanna, Ana Paula e em especial ao Paulo Martins, grande amigo e grande engenheiro que compartilhou conhecimentos e esteve ao meu lado na execução e nas longas discussões. Assim também sou grata às amigadas de longa data de Marcos Vinicius, Diego Pinzon, Bruno e todo grupo de pesquisa de Materiais Cerâmicos da EEL.

À todas as mãos que mesmo não mencionadas neste texto contribuíram de forma significativa para o doce encerramento desta etapa de minha vida, muito obrigada.

RESUMO

ZAGO, S. C. **Avaliação da durabilidade do concreto da construção civil com a utilização de agregados de escória de aciaria LD.** 2019. 260 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2019.

A escória de aciaria LD, principal coproduto da conversão do ferro gusa em aço, se utilizada como agregado na produção de concreto, pode reduzir custos com a estocagem de resíduos e reduzir a extração predatória de agregados naturais. Para tal, este estudo utilizou a escória de aciaria LD em substituição ao agregado miúdo do concreto, a areia, em teores de 0, 25, 50 e 75 %, em massa. O desempenho mecânico do concreto se mostrou próximo ao de referência, com exceção do módulo de elasticidade, que foi significativamente reduzido. A durabilidade dos concretos foi avaliada quanto à resistividade elétrica superficial, absorção de água, índice de vazios permeáveis, resistência à carbonatação acelerada, resistência à migração de cloretos, envelhecimento acelerado e natural. Quanto à durabilidade, apesar de verificada a redução da resistividade do concretos com escória, a substituição parcial da areia não promoveu o aumento da migração de cloretos, o que se atribui a fixação de clores pela formação de sal de Friedel; no entanto, a instabilidade volumétrica da escória se mostrou um fenômeno que gera graves patologias ao material, de modo que os corpos de prova com maior teor de substituição, após 70 dias de envelhecimento acelerado, romperam por expansão.

Palavras-chave: Escória de aciaria LD. Expansão. Agregado. Durabilidade. Concreto.

ABSTRACT

ZAGO, S. C. The evaluation of the durability of the civil construction concrete with BOF slag aggregate. 2019. 260 p. Thesis (Doctoral of Science) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2019.

The basic oxygen furnace (BOF) slag, the main co-product of the process pig iron conversion to steel, if used as an aggregate in the concrete production, can reduce costs with the waste storage and reduce the predatory extraction of natural aggregates. For this, in this study the BOF slag was used in substitution to the small aggregate of the concrete, the sand, in contents of 0, 25, 50 and 75% by mass. The mechanical performance of the concrete was similar to that of reference, with the exception of the elasticity modulus, which was significantly reduced. The durability properties of the concretes were evaluated for surface electrical resistivity, water absorption, permeable voids index, resistance to accelerated carbonation, resistance to chloride migration, accelerated and natural aging. Regarding the durability, despite the reduction of the resistivity of slag concrete, the partial replacement of the sand did not promote the increase of chloride migration, which is attributed to the fixation of chlorides by Friedel Salt formation. However, the volumetric instability of the slag was a phenomenon that causes serious pathologies to the material, so that the specimens with higher substitution content, after 70 days of accelerated aging, ruptured by expansion.

Keywords: BOF slag. Expansion. Aggregate. Durability. Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração de coprodutos e resíduos em kg/t aço bruto produzido.	23
Figura 2 - Descrição esquemática da estrutura porosa do concreto.....	30
Figura 3 - Classes granulométricas obtidas por peneiramento após cominuição.....	32
Figura 4 - Representação esquemática simplificada da estrutura do concreto endurecido.	37
Figura 5 - Distribuição dimensional de sólidos e na pasta de cimento hidratada.....	38
Figura 6 - Influência do tempo de hidratação na estrutura de poros do concreto.	39
Figura 7 - Influência da relação a/c na estrutura de poros do concreto com 28 dias de cura.	40
Figura 8 - Gota de mercúrio em contato com um sólido poroso.	41
Figura 9 - Percursos de condução elétrica no concreto: (A) através dos agregados e da pasta, (B) através agregados, (C) através da pasta.....	43
Figura 10 - Efeito da variação do teor de agregado na resistividade do concreto.....	44
Figura 11 - Método Wenner de medida de resistividade elétrica.....	45
Figura 12 - Transmissão direta do pulso ultrassônico entre transdutores.....	46
Figura 13 - Mecanismo de carbonatação da portlandita.	48
Figura 14 - Relação entre resistência à compressão do concreto e a profundidade de carbonatação, sob diferentes teores de CO ₂	49
Figura 15 - Obtenção do aço e geração de escória siderúrgicas.	51

Figura 16 - Pilhas de envelhecimento da escória de aciaria LD.	55
Figura 17 - Agregado de escória de aciaria LD: à esquerda, antes do processo de intemperismo; à direita, após formação de película fina de calcita por processo de intemperização.....	55
Figura 18 - Diagrama de fases normalizado de CaO (MgO) -SiO ₂ (Na ₂ O, K ₂ O) -Al ₂ O ₃ (Fe ₂ O ₃) de escórias siderúrgicas. *Acrônimos: Escórias: (BFS) de alto forno; (BOFS) aciaria LD; (EAFOS) oxidante de aciaria elétrica; (EAFRS) redutora de aciaria elétrica; (LFS) do forno de panela; (PS) de fósforo; (AODS) de descarbonatação por argônio.	56
Figura 19 - À esquerda, escória de aciaria LD e à direita, impurezas metálicas retidas por peneiramento.....	58
Figura 20 - Partícula de escoria de aciaria LD com cal aprisionada.	60
Figura 21 - Agregados de escória de aciaria LD superficialmente hidratados e colapsados devido a hidratação.....	62
Figura 22 - Constituintes das escórias de aciaria associados às suas propriedades relevantes a utilização em engenharia civil.	62
Figura 23 - Micrografia da morfologia da escória de aciaria LD.	64
Figura 24 - Micrografia da morfologia da escória de aciaria LD.	64
Figura 25 - Micrografia de escória de aciaria LD resfriada lentamente.	65
Figura 26 - Morfologia da escória após 90 dias de cura a 20° C (em atmosfera húmida saturada): (a) C-S-H, (b) portlandita (c) calcita e (d) epídoto.....	65
Figura 27 - Partículas não reagidas de CaO envoltas por silicatos.	66
Figura 28 - Estrutura cristalina do periclásio (à esquerda) e da brucita (à direita).	69

Figura 29 - Pavimento expandido devido à presença de escória na mistura do revestimento.....	71
Figura 30 - Micrografias da escória de aciaria sob resfriamento (a) industrial, (b) lento e (c) rápido.....	77
Figura 31 - Micrografias de pastas endurecidas de escória de aciaria LD: (a) Fração fina (D50 = 1.43 μm) curada por 3 dias e (d) por 28 dias; (b) fração média (D50 = 5.74 μm) curada por 3 dias e (e) por 28 dias; (c) fração grossa (D50 = 15.17 μm) curada por 3 dias e (f) por 28 dias.....	79
Figura 32 - Difratoograma da escória de aciaria hidratada o após 360 dias de cura.	80
Figura 33 - Micrografias de produtos de hidratação de fases cimentícias com elevado tamanho de partícula na escória de aciaria.....	81
Figura 34 - Principais substituições realizadas na produção de aglomerantes com EALD.	83
Figura 35 - Escória de aciaria LD (à esquerda) e cascalho de granito natural (à direita). .	85
Figura 36 - Agregado de escória com o a presença de filme de calcita.....	91
Figura 37 - Seção transversal dos concretos evidenciando a profundidade da penetração de íons cloreto pela aspersão de nitrato de prata.....	99
Figura 38 - Profundidade de carbonatação de concretos com a substituição de cimento por escória de aciaria LD.....	100
Figura 39 - Pipocamento na superfície de concreto devido à pressão interna em razão do congelamento da água absorvida pelo agregado.....	101
Figura 40 - Variações de comprimento após testes de RAA.....	104

Figura 41 - Partícula do Ca(OH)_2 , oriundo da hidratação de CaO livre, analisado por MEV (EDS).	105
Figura 42 - Resultado do teste de expansão após 4 dias de cura a 90°C	107
Figura 43 - Expansão volumétrica dos agregados de escória de aciaria LD no concreto.	107
Figura 44 - A deterioração do concreto com agregado natural (à direita) e com agregado de escória de aciaria LD, após 120 dias de cura em meio ácido.	108
Figura 45 - Ensaio de expansão de barras de argamassa após 24 h, à direta, e 120 h de cura, à esquerda.	109
Figura 46 - (A) Resultado da expansão após 48 h e (b) após 240 h de cura.	109
Figura 47 - Danos causados a superfície do concreto asfáltico devido a hidratação da escória de aciaria LD.	110
Figura 48 - Fluxograma do plano experimental resumido.	112
Figura 49 - À esquerda, escória amostrada e subsequente separação de partículas superiores a 4,75 mm e a britagem dos agregados.	114
Figura 50 - (A) Escória com dimensões características de agregado miúdo; (B) quarteamento da escória e (C) escórias acondicionadas e prontas para uso.	114
Figura 51 - Reômetro utilizado tipo planetário.	122
Figura 52 - Pré-condicionamento dos concretos em câmara de carbonatação (à esquerda) e corpos de prova selados com tinta (à direita).	125
Figura 53 - Esquema ilustrativo do procedimento de corte da carbonatação do concreto.	126

Figura 54 - Rompimento do concreto atacado, à esquerda, e medida da espessura da frente de avanço dos cloretos.	127
Figura 55 - Distribuição granulométrica (A) da escória e (B) das composições de escória e areia.	132
Figura 56 - Micrografia dos agregados de escoria de aciaria LD.	137
Figura 57 - Análise de fases da escória de aciaria LD por microsonda eletrônica: 1-FeO, 2-Ca ₂ FeO, 3-MgFe ₂ O ₄ , 4-MgAl ₂ O ₄ , 5-Ca ₂ SiO ₄ , 6-FeO, 7- Ca ₂ AlFeO ₅	139
Figura 58 - Grãos de escória observados em lupa estereoscópica.....	142
Figura 59 - Evolução da expansão média das misturas contendo escória com e sem adição de sílica ativa.....	143
Figura 60 - Aspecto visual do concreto logo após a dosagem.....	150
Figura 61 - Resultado obtido pelo abatimento do tronco de cone dos concretos.....	151
Figura 62 - Imagens dos agregados obtidas em lupa estereoscópica da areia e da escória de aciaria LD.....	152
Figura 63 - Valores obtidos dos ensaios de reometria realizados nos diferentes concretos.	153
Figura 64 - Médias de resistência à compressão dos concretos, com intervalo de confiança de 95%.....	155
Figura 65 - Médias de resistência à tração dos concretos, com intervalo de confiança de 95%.....	158
Figura 66 - Médias do módulo de elasticidade dos concretos, com intervalo de confiança de 95%.....	160

Figura 67 - Relação entre módulo de elasticidade e índice esclerométrico dos concretos aos 91 dias.....	161
Figura 68 - Médias de massa específica real dos concretos.	164
Figura 69 - Correlação entre absorção capilar e índice de vazios, com 95% de confiança.	165
Figura 70 - Médias de absorção de água dos concretos, nas idades de 28 e 91 dias.....	165
Figura 71 - Médias de resistividade elétrica dos concretos, nas idades de 7, 14, 28 e 91 dias.	169
Figura 72 - Médias da velocidade de pulso ultrassônico dos concretos.....	171
Figura 73 - Correlação entre absorção de água e velocidade de pulso ultrassônico dos concretos.....	173
Figura 74 - Medida da profundidade de carbonatação aos 7 dias.	173
Figura 75 - Medida da profundidade de carbonatação aos 14 dias.	174
Figura 76 - Medida da profundidade de carbonatação aos 28 dias.	175
Figura 77 - Médias da profundidade de carbonatação concretos, nas idades de 14 e 28 dias.	176
Figura 78 - Estimativa de vida útil dos concretos estudados.	177
Figura 79 - Valores de pH, à esquerda, e de condutividade elétrica da solução do poro, à direita, para os concretos com e sem carbonatação.	179
Figura 80 - Médias do coeficiente de migração de cloretos.	181

Figura 81 - Difratoograma comparativo dos concretos, com foco no intervalo angular da hidocalumita.	184
Figura 82 - Micrografias obtida do concreto CR, com evidência do composto precipitado indicativo de sal de Friedel, segundo composição química por EDS.	185
Figura 83 - Micrografias obtida do concreto CE25, com evidência de compostos precipitados indicativos de sal de Friedel, segundo composição química por EDS.	186
Figura 84 - Micrografias obtida do concreto CE50, com evidência de compostos precipitados indicativos de sal de Friedel, segundo composição química por EDS.	186
Figura 85 - Alterações do pH ao longo das semanas do ensaio de envelhecimento por imersão.	188
Figura 86 - Imagens que demonstram a deterioração das barras de argamassa entre 1 e 3 semanas. (a) e (b) eflorescência branca na superfície das argamassas CE50 e (c) CE25, observadas nas duas primeiras semanas; destacamento da argamassa nas amostras (d) CE50 e CE25 (e) e (f).....	189
Figura 87 - Imagens da deterioração das barras de argamassa entre 3 e 7 semanas. (a), (b) (c), (d) e (e) destacamento da argamassa CE50 e CE25; (f) detalhes da formação de calcita; (g) novos pontos de expansão e (h) visão geral das barras após oito semanas de ensaio.	190
Figura 88 - Imagens da deterioração das barras de argamassa entre 9 e 13 semanas. (a) e (b) aumento da propagação das fissuras; (c) e (d) rompimento de duas barras CE50; (e) rompimento de todas as barras CE50; (f) visão geral das barras após onze semanas de ensaio, com rompimento de uma barra CE25; (g) detalhes da formação de calcita e (h) visão geral das barras após 13 semanas.	191
Figura 89 - Expansão linear das barras de argamassa.	192

Figura 90 - Imagens da deterioração das barras de argamassa CE50 entre 2 e 6 semanas. (a), (b) e (c) destacamento superficial da argamassa; (d) destacamento de argamassa e propagação de fissuras na aresta da barra; (e) e (f) visão geral das barras após seis semanas de ensaio, com destacamento de argamassa em diversas posições dos corpos de prova; (g) segregação da extremidade de uma das barra.....194

Figura 91 - Imagens da deterioração das barras de argamassa entre 7 e 10 semanas. (a), (b) e (c) destacamento de argamassa e segregação de massa sólida na aresta da barra; (d) mesmos efeitos evidenciados pela primeira vez para as argamassas CE25 (e) visão geral das barras após dez semanas de ensaio, prontas para o ensaio de tração.195

Figura 92 - Alterações do pH ao longo das semanas de ensaio de ciclagem e temperatura da solução.....195

Figura 93 - Médias de resistência à tração das argamassas de concreto, com intervalo de confiança de 95%.196

Figura 94 - Médias de resistência à compressão das argamassas de concreto, com intervalo de confiança de 95%.198

Figura 95 - Temperatura e umidade do ar medidos ao longo dos 180 dia de ensaio.199

Figura 96 - Médias de resistência à tração das argamassas de concreto, com intervalo de confiança de 95%.201

Figura 97 - Médias de resistência à tração das argamassas de concreto, com intervalo de confiança de 95%.202

Figura 98 - Curvas de perda de massa das argamassas, à esquerda, e de DTG, à direita, após ensaio de imersão.....205

Figura 99 - Curvas de perda de massa das argamassas, à esquerda, e de DTG, à direita após ciclagem.....209

Figura 100 - Curvas de perda de massa das argamassas, à esquerda, e de DTG, à direita, após envelhecimento natural.	211
Figura 101 - Teor de portlandita nas argamassas obtido pelo método Rietveld.	213
Figura 102 - Teor de calcita nas argamassas obtido pelo método Rietveld.	214
Figura 103 - Representação do mecanismo de expansão oriundo da hidratação da cal livre.	216

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios de avaliação do concreto com base na velocidade de onda ultrassônica	46
Tabela 2 - Tipos e quantidades de escórias siderúrgicas geradas.	51
Tabela 3 - Composição química do ferro gusa.	52
Tabela 4 - Composição química em porcentagem da escória de aciaria LD.....	57
Tabela 5 - Composição química da escória de aciaria elétrica.	59
Tabela 6 - Fases minerais da escória de aciaria LD.	60
Tabela 7 - Características e aplicações gerais de escórias siderúrgicas.	70
Tabela 8 - Reatividade, basicidade e composição mineral de escórias siderúrgicas.	73
Tabela 9 - Resultados obtidos pela alteração do processo de resfriamento de escórias siderúrgicas, segundo a literatura.....	75
Tabela 10 - Efeito da utilização da EALD na produção de cimentos e argamassas, segundo a literatura.....	82
Tabela 11 - Comparação de propriedades da escória de aciaria LD de agregados naturais.	86
Tabela 12 - Características das escórias utilizadas.....	105
Tabela 13 - Características do aditivo plastificante.	115
Tabela 14 - Parâmetros de dosagem dos concretos.	117
Tabela 15 - Resumo de ensaios mecânicos, idades e corpos-de-prova dos concretos CR, CE25, CE50 e CE75.....	120
Tabela 16 - Resumo de ensaios de durabilidade, idades e corpos-de-prova dos concretos CR, CE25 e CE50.....	120
Tabela 17 - Composição química da escória de aciaria.....	133

Tabela 18 - Composição mineral da escória de aciaria LD, em comparação ao encontrado na literatura.	134
Tabela 19 - Caracterização física do agregado miúdo de areia natural e escória.	140
Tabela 20 - Caracterização da porosidade por adsorção de nitrogênio.	142
Tabela 21 - Caracterização do cimento CP IV-32 utilizado no ensaio de mitigação.....	145
Tabela 22 - Caracterização do agregado graúdo.	147
Tabela 23 - Caracterização físico-química do cimento CP V ARI.	148
Tabela 24 - Resultados da análise de variância realizada com os dados individuais da resistência à compressão.....	154
Tabela 25 - Resultados da análise de variância para os dados individuais da resistência à tração.	157
Tabela 26 - Resultados da análise de variância para os dados individuais do módulo de elasticidade nas duas idades.....	159
Tabela 27 - Avaliação comparativa do desempenho dos concretos de escória.....	162
Tabela 28 - Resultados da análise de variância da massa específica real.	163
Tabela 29 - Resultados da análise de variância para os dados individuais da absorção de água por imersão.	164
Tabela 30 - Resultados da análise de variância realizada com os dados individuais da resistividade elétrica.....	167
Tabela 31 - Resultados da análise de variância para os dados individuais da velocidade de pulso ultrassônico.	171
Tabela 32 - Resultados da análise de variância realizada com os dados individuais de profundidade de carbonatação.	175
Tabela 33 - Valores do pH e da condutividade elétrica da solução do poro dos concretos com e sem carbonatação.	178
Tabela 34 - Concentração dos íons presentes na solução.	180

Tabela 35 - Resultados da análise de variância para os dados individuais do coeficiente de migração de cloretos.....	181
Tabela 36 - Resultados da análise de variância para os valores individuais da resistência à tração das argamassas de concreto.....	196
Tabela 37 - Resultados da análise de variância realizada com os valores individuais da resistência à compressão das argamassas de concreto.....	198
Tabela 38 - Resultados da análise de variância realizada com os valores individuais da resistência à tração das argamassas de concreto.....	200
Tabela 39 - Resultados da análise de variância para os valores individuais da resistência à compressão das argamassas de concreto.....	201
Tabela 40 - Composição química das argamassas após envelhecimento acelerado.....	203
Tabela 41 - Fases minerais cristalinas identificadas nas argamassas após ensaio de imersão.....	204
Tabela 42 - Valores relativos ao teor C-S-H e aluminatos, hidróxido de cálcio e de carbonatos após ensaio de imersão.....	206
Tabela 43 - Composição química das argamassas após ciclagem.....	207
Tabela 44 - Fases minerais cristalinas identificadas nas argamassas após ciclagem.....	208

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
2	OBJETIVOS	26
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1	CONCRETO	27
3.1.1	Agregados	30
3.1.1.1	Origem do agregado	31
3.1.1.2	Classificação por tamanho	32
3.1.2	A durabilidade dos concretos	35
3.1.2.1	A estrutura porosa do concreto	36
3.1.2.2	Resistividade elétrica e velocidade de pulso ultrassônico	41
3.1.2.3	Fenômenos indutores de corrosão: carbonatação e penetração de cloretos	47
3.2	ESCÓRIAS SIDERÚRGICAS	50
3.2.1	Escória de aciaria LD	52
3.2.2	Características químicas	56
3.2.3	Características mineralógicas	60
3.2.4	Características morfológicas	63
3.2.5	As reações de CaO e MgO nas escórias de aciaria	66
3.2.6	Aplicações das escórias	69
3.2.7	Utilização geral	70
3.2.8	Utilização na produção de aglomerantes	72
3.3	A INFLUÊNCIA DA ESCÓRIA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO	84
3.3.1	O emprego de escória na produção de concreto	84
3.3.2	A influência da escória nas propriedades mecânicas	94
3.3.3	A influência da escória na durabilidade	97
4	MATERIAIS E MÉTODOS	112
4.1	VARIÁVEIS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	112
4.1.1	Variável independente	112
4.1.2	Condições fixas	113
4.2	MATERIAIS CONSTITUINTES E CONCRETO	113
4.2.1	Escória de aciaria LD	113
4.2.2	Agregados naturais	115
4.2.3	Cimento Portland	115

4.2.4 Aditivo plastificante	115
4.2.5 Concreto	116
4.3 MÉTODOS EMPREGADOS	118
4.3.1 Caracterização da escória de aciaria LD	118
4.3.1.1 Análise química	118
4.3.1.2 Análise de fases mineralógicas.....	118
4.3.1.3 Análise morfológica	118
4.3.2 Caracterização da escória como agregado miúdo	119
4.3.3 Caracterização do Concreto	120
4.3.3.1 Determinação da consistência	121
4.3.3.2 Caracterização reológica do concreto fresco	121
4.3.3.3 Resistência mecânica	122
4.3.3.4 Resistividade elétrica superficial	123
4.3.3.5 Determinação da absorção de água por imersão	123
4.3.3.6 Velocidade de propagação da onda ultrassônica.....	124
4.3.3.7 Carbonatação acelerada.....	124
4.3.3.8 Análise da solução do poro	126
4.3.3.9 Migração de cloretos em regime não estacionário.....	127
4.3.3.10 Envelhecimento de argamassas de concreto	128
4.3.3.11 Análise estatística.....	130
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	132
5.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD	132
5.1.1 Distribuição granulométrica da escória	132
5.1.2 Análise química	133
5.1.3 Óxido de cálcio livre total	134
5.1.4 Análise mineralógica	134
5.1.5 Análise morfológica	135
5.2 RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMO CONSTITUINTES DO CONCRETO	140
5.2.1 Agregado miúdo: escória e areia natural	140
5.2.2 Reatividade álcali-agregado	143
5.2.3 Agregado graúdo	147
5.2.4 Cimento Portland CPV ARI	147
5.3 RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	149

5.3.1 Resultados dos ensaios de consistência e resistência mecânica dos concretos	149
5.3.1.1 Consistência e reologia do concreto no estado fresco	149
5.3.1.2 Resistência mecânica	154
5.3.2 Resultados da caracterização da durabilidade dos concretos	163
5.3.2.1 Massa específica	163
5.3.2.2 Absorção de água e índice de vazios	164
5.3.2.3 Resistividade elétrica superficial	167
5.3.2.4 Velocidade de propagação de onda ultrassônica	170
5.3.2.5 Carbonatação acelerada	173
5.3.2.6 Análise da solução do poro	178
5.3.2.7 Migração de cloretos no estado não estacionário	181
5.3.2.8 Avaliação da microestrutura e composição mineralógica de fases após ataque por cloretos por MEV e DRX	183
5.3.3 Ensaios de envelhecimento	187
5.3.3.1 Envelhecimento por imersão	187
5.3.3.2 Envelhecimento cíclico	193
5.3.3.3 Envelhecimento natural	199
5.3.3.4 Avaliação da composição química, mineralógica e análise térmica das argamassas após ensaios de envelhecimento	203
5.3.3.5 Análise comparativa dos teores de Ca(OH)_2 e CaCO_3	212
5.3.3.6 Considerações sobre o mecanismo de expansão da escória	215
6 CONCLUSÃO	218
7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	220
REFERÊNCIAS	221
APÊNDICES	231
ANEXO	260

1. INTRODUÇÃO

A economia mundial tem se baseado nos princípios de extração, produção, consumo e eliminação durante séculos. Tal conduta, promovida pelo desenvolvimento industrial, provoca a escassez dos recursos naturais, o elevado consumo de energia e, principalmente, uma descontrolada geração de resíduos, o que leva à poluição do meio ambiente, à degradação e à intoxicação de ecossistemas e de pessoas (FRANKLIN-JOHNSON et al., 2016).

A problemática ambiental cria o desafio de se aliar desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental, fusão dentro da qual a economia circular apresenta um novo paradigma para impulsionar a sustentabilidade econômica, incitando a reutilização e a recuperação de materiais, diminuindo, assim, a quantidade de material armazenado ou descartado como resíduo no meio ambiente. Bem como, ações que permitem o desenvolvimento de novas tecnologias, a eliminação de desperdícios e a criação de processos mais competitivos e rentáveis (SINGH; ORDONEZ, 2016; LIU; JIANG; LIU, 2016).

Neste panorama, a indústria siderúrgica brasileira tem alcançado grandes avanços na reciclagem do aço, a partir da produção de cerca de 30% do aço nacional provenientes de reciclagem, com materiais oriundos de automóveis, geladeiras, vergalhões e demais produtos à base de aço. No entanto, a complexidade do processo de produção do aço imprime a necessidade de se criar destinos e aplicações para uma série de coprodutos gerados, como os agregados de aciaria e de alto-forno (IAB, 2016).

A produção brasileira de aço bruto pode alcançar mensalmente cerca de 3 milhões de toneladas e estima-se que são gerados 607 kg de coprodutos e resíduos por tonelada de aço bruto produzido, o que corresponde a 1,8 milhão de toneladas de coprodutos e resíduos em um mês (IAB, 2018). Apesar de se verificar a redução da geração de resíduos ao longo dos anos, como pode-se observar na Figura 1, nas diversas etapas do processo produtivo, é inalcançável a possibilidade de eliminação total dos mesmos.

Neste contexto, é de grande relevância o desenvolvimento de soluções e aplicações para o aproveitamento dos resíduos siderúrgicos em segmentos como o da construção civil. Responsável pelo consumo de quase 40% da produção nacional de aço, a indústria da construção civil apresenta potencial para consumir também outros componentes siderúrgicos como as escórias, reduzindo os descartes em aterros (IAB, 2018).

Figura 1 - Geração de coprodutos e resíduos em kg/t aço bruto produzido.

Fonte: Autoria própria.

A construção civil consome de 40 a 75% dos recursos naturais do planeta, além de ser responsável pelos elevados níveis de emissão de CO₂, atribuídos principalmente à produção e ao manuseio de materiais cimentícios (OLIVEIRA, 2015). Acompanhando o crescimento da população mundial e o desenvolvimento de países emergentes, pode-se observar um aumento na projeção de consumo de materiais cimentícios ao longo dos anos, tal conjuntura indica que o desenvolvimento da indústria de construção civil deve ser realizado de maneira mais sustentável, de modo a se reconsiderar a eficiência energética dos processos e das condições de obtenção do clínquer, os níveis de emissão de CO₂ e a utilização de resíduos nas diversas áreas deste segmento.

As cimenteiras brasileiras apresentam um parque industrial bastante moderno e se mostram preocupadas com a eficiência energética. Elas operam, atualmente, com 99% da produção do clínquer sendo realizada em fornos via seca, com baixo consumo energético e consequente menor liberação de CO₂ (ABCP, 2014). Além do desenvolvimento de tecnologias de processamento, da troca da matriz energética, tais como pela utilização de pneus, óleos usados, plásticos, casca de arroz ou bagaço de cana que emitem menor quantidade de CO₂ que os combustíveis tradicionais utilizados, permite reduzir o uso de combustíveis não renováveis, como o coque e o carvão mineral.

Outra ação relevante é a substituição parcial do clínquer por adições minerais, tais como as pozolanas, o calcário e as escórias de alto-forno, realizadas no Brasil há mais de 50 anos. As escórias de alto-forno, um dos principais resíduos siderúrgicos, apresentam excelente desempenho aglomerante, de modo que 99% são destinadas à produção de

cimento, em especial na produção do cimento CPIII (IAB, 2016). Os benefícios deste uso são direcionados tanto às siderúrgicas, quanto às cimenteiras e vão desde a obtenção de cimentos com propriedades diferenciadas, até a redução de áreas degradadas pela estocagem e a redução da quantidade de CO₂ emitida, uma vez que não é necessária a descarbonatação destes materiais, como ocorre com o calcário na produção do clínquer, que chega a ser responsável por 70% da emissão do gás carbônico na clínquerização (NONAT, 2014).

No âmbito da mitigação do impacto da construção civil no meio ambiente, deve-se considerar também a aquisição de agregados naturais na produção de argamassas e concretos, visto que o consumo é excessivamente elevado. Conforme apresentado por Ferreira e Fonseca Junior (2012), no Brasil, para uma habitação popular de 50 m² são consumidas 68 t de agregados; na manutenção de vias municipais, se consome cerca de 100 t de agregados por quilômetro restaurado, enquanto as estradas demandam cerca de 3000t/km e em uma obra-padrão de 1120 m² para a construção de uma escola são consumidos 1675 t de agregados. Da mesma forma, em obras norte-americanas, uma casa comum exige mais de 100 t de agregados para a construção da fundação, do porão, da garagem e da calçada, enquanto a construção de um quilômetro de rodovia interestadual necessita de 38000 t de agregados, o que demonstra que a preocupação com o elevado consumo é global (OWEN, 2017).

A crescente demanda por agregados, concomitante à produção de cimento, leva à extração predatória de agregados em jazidas naturais, ao esgotamento e ao desenvolvimento de processos de erosão ambiental (GHOULEH et al., 2017). A extração de agregados, como a de areia, modifica a estrutura hidrológica de rios, causando um aumento da vazão de água e da erosão de suas margens. No caso de materiais como a brita, a extração de formações rochosas acidentadas e montanhosas altera a paisagem e a estabilidade das áreas, bem como gera um elevado teor de resíduos a partir da fragmentação das rochas. Quando removidos sem controle, mesmo os recursos abundantes, a longo prazo podem ser esgotados.

Assim, deve-se obter fontes alternativas mais sustentáveis, tais como os resíduos siderúrgicos, reduzindo os problemas relacionados à preservação geológica, a partir da substituição dos agregados naturais por agregados siderúrgicos (CABRAL et al., 2009; GHOULEH et al., 2017). Para isso, o desempenho mecânico dos agregados alternativos

deve se assemelhar ao dos convencionais. Os agregados siderúrgicos, dessa forma, podem se encaixar neste cenário. As escórias de aciaria LD (Linz-Donawitz), geradas nos conversores a oxigênio, têm sido vistas como possíveis alternativas para produção do concreto tanto como agregado graúdo, quanto miúdo.

Atualmente, há um grande empenho na concepção de alternativas para o uso e a agregação de valor das escórias de aciaria LD, devido ao elevado volume produzido, haja vista que são gerados, em média, 110 kg de escória LD por tonelada de aço (NSA, 2016). Uma importante ação para o desenvolvimento de condições adequadas para a utilização das escórias de aciaria LD está na compreensão de suas características físicas, químicas, do seu desempenho quanto às solicitações desejadas e, conseqüentemente, às suas limitações.

Para contribuir nesta área de conhecimento e no desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis, este estudo analisa o efeito da utilização da escória de aciaria LD como agregado miúdo, por meio dos resultados obtidos mediante a avaliação do desempenho mecânico e da durabilidade do concreto endurecido.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar a potencialidade da substituição do agregado miúdo do concreto por agregados de escória de aciaria LD. O plano experimental objetivou utilizar a escória de aciaria LD na produção de concreto, em substituição parcial da areia natural, nos seguintes níveis de substituição: 0%, 25%; 50% e 75%, em massa.

Para tanto, foram avaliados especificamente:

- a) A reologia do concreto fresco após a incorporação dos agregados de escória de aciaria LD;
- b) O melhor teor de substituição do agregado miúdo, em função do desempenho do concreto, em virtude das propriedades mecânicas após a substituição;
- c) A durabilidade do concreto frente às reações expansivas de origem endógena do tipo reação álcali-agregado;
- d) Problemas de durabilidade quanto à instabilidade volumétrica da escória;
- e) A durabilidade do concreto frente a ambientes quimicamente agressivos, pela exposição a íons cloreto e à carbonatação acelerada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresentada neste trabalho está estruturada de modo a fornecer uma breve exposição de conceitos relacionados ao concreto e seus constituintes: matriz cimentícia, agregados e zona de transição. Ademais, foi realizada uma revisão dos principais aspectos pertinentes à escória de aciaria LD, quanto à sua geração, às características físico-químicas, ao histórico e às aplicações do material na produção de ligantes e de concretos. Como o desempenho do concreto neste estudo foi avaliado sob aspectos de resistência mecânica e durabilidade foram abordados conceitos com ênfase na influência do uso de escória de aciaria nas propriedades do concreto, quanto à trabalhabilidade do concreto e seu comportamento no estado fresco, à resistividade elétrica do concreto, sua resistência à penetração de íons cloretos, e ao desenvolvimento de reações álcali-agregado.

3.1 CONCRETO

O concreto é o material sintético mais utilizado no mundo, e sua produção global é estimada em 10 bilhões de toneladas por ano. Corresponde a um material compósito formado por um meio ligante, no qual partículas de diferentes naturezas formam um aglomerado contínuo, geralmente constituído de 10-20% de cimento Portland, 70-80% de agregados e 5-10% de água, em volume (MEHTA; MONTEIRO, 2006; GHOLEH et al., 2017).

O meio aglomerante é obtido pelas reações que ocorrem entre o cimento e a água; os agregados são materiais granulares, como a areia, o pedregulho, a rocha britada, a escória de alto-forno e resíduos de construção e de demolição; os aditivos e adições são componentes minoritários que podem ou não ser adicionados ao concreto em seu estado fresco, conferindo propriedades diferenciadas. Desta composição, obtém-se uma massa de elevada dureza e compacidade, com desempenho intimamente ligado à presença e a qualidade de cada um de seus constituintes (GHOLEH et al., 2017).

A importância do concreto na indústria civil é indiscutível, constituindo-se, indiretamente, como uma referência do desenvolvimento socioeconômico da sociedade. Em obras residenciais, por exemplo, 54% da massa de um edifício é constituída de concreto, e, se somados todos os materiais cimentícios e os agregados a eles atrelados,

eles representam aproximadamente 85% da massa de um edifício convencional (OLIVEIRA, 2015).

Tal consumo se deve, não apenas à ampla gama de aplicações que o concreto oferece, mas também à sua resistência, acessibilidade, durabilidade e versatilidade de aplicação. Para tal, é imprescindível que o concreto apresente desempenho satisfatório quanto à trabalhabilidade, à coesão de seus constituintes e principalmente, à resistência mecânica, uma vez que diversas outras propriedades estão relacionadas a ela, tais como a permeabilidade, a resistência a sulfatos e a cloretos (AVINASH et al., 2014; NEVILLE; BROOKS, 2010).

É notório que as propriedades de um material são intimamente ligadas à sua microestrutura, e a do concreto, por sua vez, é altamente heterogênea e complexa. Microestruturalmente, o concreto é constituído de uma matriz de pasta de cimento, que se caracteriza pela presença de produtos hidratados e grãos anidros de cimento; pelos agregados graúdo e miúdo distribuídos na pasta; além de apresentar uma região de interface entre pasta de cimento e partículas de agregado graúdo, denominada zona de transição, e elevada porosidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A pasta de cimento do concreto é obtida pela hidratação do cimento Portland, em suas diversas classificações (CPI, CPII, CPIII, CPV ARI), o que se caracteriza como a principal propriedade do ligante hidráulico: reagir quimicamente com a água, hidratando os grãos anidros, proporcionando a aglomeração dos produtos de hidratação, para produzir um sólido com resistência mecânica satisfatória e resistente à ação da água. Caracterizam os compostos hidratados da pasta de cimento (NONAT, 2014; MEHTA; MONTEIRO, 2006):

a) a portlandita (Ca(OH)_2), bem cristalizada sob a forma de cristais hexagonais, encontra-se presente na pasta de cimento, nos poros e na interface pasta/agregado; sua presença mantém o pH da solução intersticial elevado ($\text{pH} > 12$) como um importante aliado na prevenção da corrosão em concretos armados, sendo denominada como reserva alcalina do concreto, corresponde a um material com elevada solubilidade em água (22 mmol/L a 25°C) conferindo-lhe baixa resistência química;

b) os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) caracterizam-se como um sólido poroso e pouco cristalino constituídos de partículas nanométricas fortemente atraídas

umas às outras, por forças de van der Waals, responsáveis pela coesão do cimento e pelo desenvolvimento de resistência mecânica da matriz;

c) os aluminatos de cálcio hidratados podem ser verificados sob a forma de cristais hexagonais (C_2AH_8 , C_4AH_{13}) e cúbicos (C_3AH_6); são formados a partir da hidratação do $3CaO \cdot Al_2O_3$ (C_3A), em uma reação rápida e altamente exotérmica, desacelerada pela adição de gipsita. Desempenham um importante papel quanto ao enrijecimento da pasta de cimento hidratada;

d) o monossulfoaluminato de cálcio hidratado (monossulfato) e o trissulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita), em função da concentração de aluminatos cálcicos e de íons sulfato, podem ser gerados o monossulfato ou a etringita. A etringita é produzida quando a solução apresenta elevada concentração de íons sulfato e dá origem a um material cristalino acicular. No entanto, quando o teor de sulfato é reduzido na solução, a etringita é convertida a monossulfato, sob a forma de placas hexagonais delgadas. É comum verificar, na microestrutura do concreto endurecido, a presença de ambos.

Na interface entre agregado e pasta de cimento é possível verificar uma região que dispõe de características específicas, que diferem da matriz cimentícia, com grandes cristais orientados de $Ca(OH)_2$ e maior relação água/aglomerante (a/agl). Nesta região, denominada zona de transição, a estrutura da pasta não é homogênea, pois apresenta porosidade elevada e menor resistência quando comparada a matriz cimentícia, na qual fissuras são facilmente formadas. Considerada como a fase limitante da resistência do concreto, as suas características serão mais expressivas de acordo com o aumento da dimensão do agregado, pois, assim, maior será o filme de água acumulado em torno do agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2006; OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

Deve-se ressaltar ainda que o concreto é um material de elevada porosidade, que, de acordo com Ollivier e Torrenti (2014), corresponde a cerca de 15%, aos 28 dias para concretos convencionais, e de 10 a 12%, para concretos de alto desempenho na mesma idade.

A estrutura porosa do concreto pode ser formada por vazios capilares, isto é, espaços não preenchidos pelos produtos de hidratação inicialmente ocupados pela água que podem variar entre 10 a 50 nm, e podem ser conectados ou não com o exterior

(conforme ilustrado na Figura 2); e por vazios de produtos hidratados, formados no interior de produtos hidratados, como o C-S-H, da ordem de 5-25 Å, gerando pouca influência na permeabilidade da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2006; OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

Figura 2 - Descrição esquemática da estrutura porosa do concreto.

Fonte: Ollivier e Torrenti (2014).

3.1.1. Agregados

Os agregados da construção civil são matérias-primas minerais fundamentais na constituição do concreto pois compõem o concreto hidráulico em cerca de 80% e o concreto asfáltico em cerca de 90% do seu volume, auxiliam na obtenção de grandes volumes de concreto e na redução do custo dos empreendimentos mediante a substituição do cimento em proporções que garantam o alcance das propriedades desejadas do concreto fresco e endurecido (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Segundo Mehta e Monteiro (2006), “A fase agregado é a principal responsável pela massa unitária, pelo módulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional do concreto”, propriedades influenciadas principalmente pelas características físicas do agregado. As reações químicas entre os minerais do cimento e a água resultam na solidificação da pasta e na aglomeração dos agregados ao longo do tempo, e, apesar destas reações conferirem o desenvolvimento da resistência mecânica, a pasta de cimento sofre grandes variações volumétricas e uma elevada geração de calor de hidratação, além de ser mais propensa ao ataque por agentes químicos e também mais onerosa, o que torna imperativa a utilização de agregados adequados na formulação dos concretos (NEVILLE; BROOKS, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

3.1.1.1. Origem do agregado

Os agregados podem ser classificados como naturais ou artificiais, de acordo com a forma como são obtidos. Os naturais são formados por processos de intemperismo e abrasão e podem ser utilizados como extraídos da natureza, como o pedregulho, o cascalho, a areia de rio e seixos. Enquanto os agregados artificiais são materiais obtidos por processos industriais ou que necessitam ser modificados para obedecer às condições necessárias à sua aplicação, envolvendo alterações mineralógica, química ou físico-química, tais como britas, argilas expandidas, escória granulada de alto forno e vermiculita (ALVES, 1993; ABNT NBR 9935, 2011; NEVILLE, 2016).

Os agregados apresentam características de formação e de composição mineralógica comuns que podem ser atribuídas a determinados grupos de rochas, fato que permite avaliar a natureza, as propriedades das rochas, os minerais constituintes e identificar a presença de impurezas e constituintes indesejáveis.

Sob o ponto de vista petrográfico, os agregados de origem natural podem ser classificados como agregados ígneos, sedimentares e metamórficos, de acordo com a rocha de origem. Os granitos, dioritos e basaltos são rochas ígneas comumente utilizadas como agregados no Brasil. Enquanto dentre as rochas sedimentares destacam-se os calcários, os dolomitos e a areia; das rochas metamórficas têm-se o gnaiss e o quartzito como agregados de boa qualidade (BERTOLINO; PALERMO; BERTOLINO, 2012).

Os minerais mais comuns e importantes presentes nos agregados são: minerais de sílica (quartzo, sílica, opalina, calcedônia, tridita, cristobalita), feldspatos, minerais micáceos, minerais carbonáticos, sulfáticos, minerais de sulfeto de ferro, zeólitos, minerais de óxidos de ferro e argilosos (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Materiais inadequados para serem utilizados como agregados podem estar presentes nos diversos grupos, como os constituídos por rochas xistosas, por produzirem agregados lamelares, com acentuadas propriedades direcionais, e de alta reatividade com álcalis. Alguns grupos costumam gerar agregados com melhor desempenho para a produção do concreto (granito, gnaiss), assim, certas características petrográficas são muito importantes para qualificação dos agregados (COUTINHO, 1999).

Para tal, deve-se evitar a presença de minerais deletérios, pois que podem reagir com substâncias presentes no concreto, como ocorre com cristais de quartzo submetidos

a esforços ou intensivamente fraturados, que reagem com os álcalis do cimento gerando expansão e tensões internas na pasta de cimento endurecida. Assim como também há de se evitar o estado de alteração dos minerais (caulinização e carbonatação) por influenciar na durabilidade e nas propriedades físicas e mecânicas do agregado (DNPM, 2015).

A presença de óxidos de ferro e sulfetos, de gesso, de minerais argilosos, de sílica na forma de opala, trimidita, cristobalita, feldspatos potássicos e sódicos é igualmente considerada deletéria. Contudo, a presença de outros minerais pode apresentar efeitos benéficos, tais como a calcita, o calcário, a dolomita e certos minerais silicosos, por originarem aderência à pasta de cimento devido à reatividade de sua superfície e dos componentes hidratados do cimento (COUTINHO, 1999).

3.1.1.2. Classificação por tamanho

A estrutura do concreto é formada por partículas de tamanhos diversos, desde os pequenos grãos de cimento aos grandes de brita. A distribuição destes grãos deve ser tal que garanta a melhor ocupação entre os grãos dispersos no compósito, otimizando as quantidades e os tamanhos de grãos intermediários. Com isso, a interação entre aglomerante e agregados será elevada, e assim, a porosidade do concreto será reduzida, pois com a distribuição contínua da dimensão das partículas é possível alcançar uma elevada compacidade do concreto e altas resistências (HEWLETT, 1998; OLLIVIER; TORRENTI, 2014; KOSMATKA; PANARESE; KERKHOFF, 2003).

Para este efeito, os agregados são classificados quanto ao seu tamanho de partícula como miúdo e graúdo, devendo ser constituídos de uma mistura otimizada destas frações, como exposto na Figura 3.

Figura 3 - Classes granulométricas obtidas por peneiramento após cominuição.

Fonte: Ghouleh et al. (2017).

O agregado miúdo possui grãos com tamanho variável entre 150 μm - 4,75 mm, o que corresponde à areia natural quartzosa ou ao pó de pedra resultante do fraturamento de rochas. O agregado graúdo possui grãos que se distribuem na faixa granulométrica entre 4,75 - 75 mm, que corresponde ao pedregulho natural, à brita proveniente da fragmentação de rochas estáveis e às escórias (ABNT NBR 7211, 2005).

Além da porosidade, a distribuição granulométrica dos agregados interfere em importantes características do concreto, tais como o consumo de água e a trabalhabilidade. Para um dado consumo de cimento e consistência, o concreto contendo agregado de partículas maiores requer um teor de água de amassamento inferior ao que contém agregados menores, posto que agregados com tamanho de partícula reduzida apresentam elevada área superficial, exigindo uma quantidade de água superior para envolver e lubrificar todas as partículas sólidas. Assim, agregados com partículas menores devem compor a mistura de concreto em quantidade suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores e evitar a segregação das partículas, a fim de alcançar uma máxima trabalhabilidade (NEVILLE; BROOKS, 2010; NEVILLE, 2016, CASTRO, 2007).

Em contrapartida, agregados maiores tendem a formar uma zona de transição na interface entre pasta de cimento e agregado graúdo, de menor resistência, com relação a/lig superior e, conseqüentemente, com porosidade elevada (KOSMATKA; PANARESE; KERKHOFF, 2003).

Tratando-se dos principais agregados empregados na indústria de construção civil, para as diferentes faixas granulométricas, estes são classificados como:

a) Agregado miúdo: a areia natural corresponde a um material granular de composição silicática, constituída predominantemente por quartzo, que compreende, além dos materiais naturais, os coprodutos da britagem de rochas, a areia artificial ou a areia de brita são finos de rochas silicáticas (DNPM, 2015). Sendo empregada como agregado para concreto, argamassa, blocos e pavimentação (FERREIRA; FONSECA JUNIOR, 2012; DNPM, 2015).

A areia natural é um recurso abundante originada de processos intempéricos, e que pode ser encontrada em depósitos naturais de arenitos inconsolidados, aluviões, solos de alteração, dunas, praias, desertos, em locais de intemperismo de rochas ricas em quartzo

e leito de rios. No entanto, para o emprego na construção civil, alguns destes materiais não apresentam qualidade satisfatória devido às suas características morfológicas ou à presença de elementos indesejáveis como silte, conchas, gesso, sais marinhos e compostos orgânicos (FERREIRA; FONSECA JUNIOR, 2012; DNPM, 2015; OWEN, 2017).

No Brasil, 90% da areia tem origem da extração de leito de rios, e o restante é oriundo de várzeas, terraços aluviais, dentre outros (FERREIRA; FONSECA JUNIOR, 2012; DNPM, 2015). A extração em rios e ambientes de sedimentação geram consequências ambientais relevantes, no que se referem à retirada da cobertura vegetal das áreas exploradas, no revolvimento e desagregação do minério nos leitos d'água, contribuindo, dessa forma, para a eliminação de barramentos naturais e a formação de bancos de sedimentos resultando na mudança do curso das correntes e na velocidade do fluxo d'água (ALMEIDA, 2003).

Em alguns países, é comum o uso de areia marinha, obtida a partir da dragagem nos oceanos. A areia marinha pode ser empregada na produção de concreto, desde que sejam removidos os sais marinhos, fragmentos de conchas, argilas, e outros materiais indesejáveis. No entanto, além de ser consideravelmente caro, este tipo de extração provoca sérios danos ao habitat marinho, matando organismos, destruindo recifes de corais e alterando os padrões de circulação da água (OWEN, 2017), fatos que intensificaram a fiscalização e a restrição da extração pelos órgãos responsáveis de fiscalização. Ademais, áreas próximas aos grandes mercados consumidores são cada vez mais escassas, o que resulta no deslocamento dos mineradores para locais mais distantes dos centros urbanos, onera o preço da areia natural, aumentando o custo do frete e o preço do produto final, o que para obras convencionais se torna economicamente inviável (ALMEIDA, 2003; OWEN, 2017).

De acordo com a granulometria, a areia pode ser classificada como areia grossa, média e fina. A faixa grossa compreende os grãos entre 2,0 – 4,8 mm; a faixa média compreende os grãos entre 0,42 – 2,0 mm, e a faixa fina é formada por grãos de 0,05 – 0,42 mm, conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003).

b) Agregado graúdo: na indústria da construção, a brita e o cascalho são os materiais granulares mais importantes. A brita corresponde aos fragmentos de rochas

duras originados de grandes blocos; enquanto o cascalho, às lascas de rochas desgastadas pela ação natural de rios. Ambos os materiais são produzidos pela indústria extrativa mineral, obtidos da exploração de jazidas de rochas de diversos tipos, principalmente de rochas granitoides (granito, gnaiss e outras), mas também de rochas basálticas (basalto e diabásio), rochas calcárias (calcário e dolomito) ou quartzito e cascalho (FERREIRA; FONSECA JUNIOR, 2012; DNPM, 2015).

Na produção de concreto, a função do agregado graúdo vai além da redução do consumo de cimento, interferindo significativamente na resistência, durabilidade e trabalhabilidade dos concretos, em suas várias especificações. A importância destes materiais é tamanha que representa, em média, 2% do custo global de uma edificação e em obras de pavimentação, sua participação no custo da obra chega a 30% (FERREIRA; FONSECA JUNIOR, 2012; DNPM, 2015).

3.1.2. A durabilidade dos concretos

O concreto é um material projetado para resistir solicitações física e mecânicas, quando submetido à carregamentos, bem como a agressões químicas, quando exposto a ambientes diversos ao longo do tempo. Para tal, o concreto deve ser durável em ambientes agressivos a fim de evitar a sua deterioração prematura e satisfazer exigências essenciais para uma função desejada. Deste modo, a durabilidade do concreto é definida como a sua capacidade de resistir à ação de intempéries, ataque químico, abrasão, instabilidade volumétrica, reação álcali-sílica, dentre outros (MEHTA; MONTEIRO, 2006; ROUGEAU; GUIRAUD, 2014).

Fisicamente a deterioração do concreto pode ser causada pelo desgaste superficial ou perda de massa devido à abrasão, o desgaste oriundo do atrito seco; erosão, o desgaste oriundo da ação abrasiva de fluidos, e cavitação, relacionado a formação de bolhas de vapor; ou pela fissuração advinda de gradientes normais de temperatura e umidade, da cristalização de sais nos poros e da exposição a temperaturas extremas, como congelamento ou fogo (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Do ponto de vista químico, a deterioração do concreto costuma ocorrer em consequência de interações químicas entre os agentes agressivos do ambiente e os constituintes da pasta de cimento, e se dão por hidrólise de produtos que contêm cálcio

da pasta de cimento por água, principalmente do hidróxido de cálcio que apresenta maior suscetibilidade à hidrólise devido a sua alta solubilidade na água pura; reações de troca catiônica entre fluidos agressivos e a pasta de cimento, que levam a formação de sais solúveis de cálcio (por ataque químico de soluções contendo sais de magnésio, ou por reações de troca com cloreto de amônio, CaCl_2 , *e.g.*); e reações químicas levando a formação de produtos expansivos, tais como ataque por sulfato, reação álcali-agregado e corrosão da armadura. No entanto, fatores físicos e químicos estão comumente associados, uma vez que a deterioração física abre meios para a ação da deterioração química (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

A durabilidade do concreto está, majoritariamente, associada a capacidade dos concretos em resistir à penetração de agentes agressivos presentes no meio externo à sua rede de poros e para tal obter uma alta compacidade será sempre uma das condições necessárias a se evitar a deterioração do mesmo. Embora esta afirmação seja legítima, a presença de uma estrutura porosa é intrínseca ao concreto (CASCUDO, 1997; OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

Para avaliar o desempenho do concreto frente a exposição a meios agressivos são comumente estudadas algumas propriedades, tais como a porosidade, a absorção e a resistividade elétrica do concreto, bem como algumas manifestações patológicas, tais como a carbonatação e a penetração de íons cloreto. A seguir são apresentados os principais conceitos relacionados a estas propriedades do concreto, visto que estas foram foco de estudo desta pesquisa.

3.1.2.1. A estrutura porosa do concreto

Como apresentado anteriormente, a estrutura porosa do concreto, conforme exibido na Figura 4, pode ser formada por vazios capilares, remanescentes dos espaços intergranulares da pasta inicialmente preenchidos por água, que podem ser conectados ou não com o exterior; e por vazios de produtos hidratados, também chamados de poros de gel, formados no interior de produtos hidratados, que representam, invariavelmente, uma porosidade de 28% em um volume de C-S-H. Uma relação importante entre ambos se dá a medida que a hidratação evolui, pois a formação de produtos de hidratação preenche gradualmente a porosidade capilar, levando a segmentação da rede de

capilares, o que permite a diminuição da porosidade interconectada e a comunicação do concreto com o meio externo (MEHTA; MONTEIRO, 2006; OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

Sabe-se ainda que a estrutura de poros é composta por poros de ar aprisionado, decorrentes do processo de adensamento do concreto e por poros de ar incorporado, quando há o emprego de aditivo incorporador de ar na produção do concreto (CASCUDO, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Figura 4 - Representação esquemática simplificada da estrutura do concreto endurecido.

Fonte: Atahan et al. (2009)

Mais importante do que a porosidade total apresentada pelo concreto deve-se considerar a distribuição do tamanho dos poros, altamente influenciada pela relação água/aglomerante e pelo grau de hidratação do cimento. De acordo com Mehta e Monteiro (2006), conforme exibido na Figura 5, os macroporos correspondem a vazios capilares com diâmetro superior a 50 nm e exercem grande influência na resistência mecânica e na permeabilidade do concreto, enquanto mesoporos possuem diâmetro entre 2 - 50 nm; vazios inferiores a 2 nm são os chamados microporos e desempenham um papel importante na retração por secagem e fluência.

Assim, verifica-se que o efeito da porosidade nas propriedades do concreto é concernente à dimensão dos poros presentes. Neste sentido, a durabilidade é, determinantemente, influenciada pelos poros capilares (meso/macroporos) e pela conectividade apresentada por eles, dado que a dimensão dos poros capilares, por ser muito superior, faz com que estes governem os mecanismos de transporte de substâncias

nocivas do meio externo para o interior do concreto (OLLIVIER; TORRENTI, 2014; CASCUDO, 1997).

Figura 5 - Distribuição dimensional de sólidos e na pasta de cimento hidratada.

Fonte: Mehta e Monteiro (2006).

Devido à grande variedade de tamanho de poros, da forma como estão dispostos e conectados, a microestrutura da matriz de cimento torna-se muito complexa, bem como, a compreensão das propriedades de transporte no concreto, regidas pela permeabilidade. Algumas das principais características do material que explicam as suas propriedades de permeabilidade são o diâmetro médio dos poros, a relação água/aglomerante e o tempo de hidratação (ATAHAN et al., 2009; CHEN; WU, 2013; OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

Quanto ao tempo de hidratação, claramente sabe-se que a porosidade diminuiu com o aumento do período de hidratação para todas as relações água/aglomerante, tal qual supracitado, à medida que a hidratação se desenvolve, a porosidade é reduzida como resultado da formação dos produtos de hidratação no espaço. Conforme exibido na Figura 6, pode-se verificar que há a redução da porosidade interconectada ao longo do período de cura e que pouca evolução da estrutura porosa, quanto ao diâmetro dos poros, pode ser observada após 90 dias de cura (ATAHAN et al., 2009; CHEN; WU, 2013; OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

Figura 6 - Influência do tempo de hidratação na estrutura de poros do concreto.

Fonte: Mehta e Monteiro (2006).

Em razão do aumento da relação a/lig do concreto, a porosidade total é elevada (Figura 7). Eleva-se também o grau de hidratação, ao longo do tempo de cura, pois a hidratação da matriz cimentícia será interrompida quando toda água for consumida ou quando todo cimento for hidratado. De modo que de acordo com as exigências do projeto, a dosagem deve almejar satisfazê-las com a menor relação a/lig possível, dado que para quantidades superiores de água, a matriz de cimento completamente hidratada apresentará porosidade capilar; ou para teores de água insuficientes, o cimento poderá não ser completamente hidratado (ATAHAN et al., 2009; CHEN; WU, 2013; OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

Dentre uma extensa variedade de metodologias para a avaliação da complexa estrutura de poros do concreto, o método mais utilizado é a porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM). A técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio permite obter uma descrição quantitativa da distribuição dos tamanhos dos poros e do volume cumulativo dos poros, devido ao comportamento do mercúrio líquido quando em contato com sólidos (WEBB; ORR, 1997).

Figura 7 - Influência da relação a/c na estrutura de poros do concreto com 28 dias de cura.

Fonte: Mehta e Monteiro (2006).

Dentre uma extensa variedade de metodologias para a avaliação da complexa estrutura de poros do concreto, o método mais utilizado é a porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM). A técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio permite obter uma descrição quantitativa da distribuição dos tamanhos dos poros e do volume cumulativo dos poros, devido ao comportamento do mercúrio líquido quando em contato com sólidos (WEBB; ORR, 1997). O fato se devido ao comportamento do mercúrio líquido quando em contato com sólidos, dada a sua baixa molhabilidade, estabelecendo ângulo de contato elevado, entre 110 - 140° (Figura 8); apresenta elevada tensão superficial e baixa reatividade química a temperatura ambiente (WEBB; ORR, 1997; OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

Quando o mercúrio está em contato com a abertura de um poro de seção transversal circular, sua tensão superficial atua ao longo do círculo de contato. Então, se uma força externa for fornecida, pode-se superar a tensão superficial do mercúrio e o ângulo de contato entre o líquido e o material poroso de modo que o mercúrio líquido penetre nos poros da amostra (WEBB; ORR, 1997).

Figura 8 - Gota de mercúrio em contato com um sólido poroso.

Fonte: Adaptada de Webb e Orr (1997).

A força externa aplicada, que atua sobre a área do círculo de contato, é expressa matematicamente por $\pi D^2 P/4$, em que D é o diâmetro do poro e P é a pressão aplicada. A força com a qual o mercúrio resiste em entrar no poro é igual a $-\pi D \gamma \cos \theta$, em que, γ é a tensão superficial e θ é o ângulo de contato; o sinal negativo corresponde ao ângulo ser superior a 90° . No equilíbrio, estas forças opostas se igualam e então uma relação entre o tamanho do poro e a pressão necessária para a penetração do mercúrio é obtida pela equação 1 (WEBB; ORR, 1997):

$$D = -4 \gamma \cos \theta / P \quad (1)$$

Assim, quando uma amostra de concreto é submetida a penetração do mercúrio com o progressivo aumento da pressão e consequentemente o acesso aos poros do material, obtém-se uma relação entre a pressão de injeção do mercúrio e o raio dos poros preenchidos, sendo possível quantificar o tamanho dos poros, expresso em termos do diâmetro, e o volume total de intrusão, que determina o volume de poros abertos da amostra do material.

3.1.2.2. Resistividade elétrica e velocidade de pulso ultrassônico

Algumas propriedades do concreto exprimem com grande relevância o comportamento de suas estruturas quanto a solicitações mecânicas e à resistência a exposição a ambientes diversos, aliados a capacidade do emprego de ensaios não destrutivos para obter tais informações, a caracterização e o monitoramento do concreto podem ser realizados de maneira simplificada e com baixo custo. Dentre estas

propriedades a resistividade elétrica e a velocidade de pulso ultrassônico permitem avaliar a qualidade do concreto e relacionar os seus resultados a outras importantes informações, tais como a porosidade do concreto e a resistência à compressão.

A medida de resistividade elétrica do concreto evidencia a sua habilidade em resistir à passagem de corrente elétrica, dado que por meio do fluxo de íons dissolvidos na solução intersticial da rede de poros interconectados e em microfissuras da matriz, transcorre o fluxo de corrente elétrica no concreto. Em vista disso, a medição da resistividade elétrica vem sendo empregada como uma alternativa rápida e econômica para avaliar a resistência do concreto à penetração de agentes agressivos (HOU et al, 2017; BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

De tal modo, características microestruturais do concreto, tais como o volume de poros, sua distribuição do tamanho, a interconexão entre os poros da matriz são fatores decisivos na resistividade elétrica do concreto. Por conseguinte, para uma dada umidade e temperatura, quanto mais poroso for o concreto, menor será a sua resistividade, de maneira análoga, a condução da corrente será dificultada quanto mais densa for a matriz e quanto maior for o volume de poros não conectados e de menor diâmetro (SANTOS, 2006; BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

Além da porosidade, a resistividade elétrica é influenciada pelo teor de água do concreto e pela condutividade da solução intersticial, determinada pela composição dos sais que a constituem. O grau de saturação na rede de poros em função das condições ambientais determina o teor de umidade do concreto e a mobilidade dos íons, de maneira que quanto maior for o grau de saturação do concreto maior será o fluxo de corrente através dele (SANTOS, 2006; BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

De modo análogo, a alteração na condutividade da solução intersticial dos poros é um fator de alta relevância pois ao aumentar a concentração iônica da solução intersticial, eleva-se a sua condutividade e, assim, a resistividade elétrica do concreto é reduzida, dado que a corrente elétrica é conduzida pelos íons da solução intersticial. Fato que torna a análise da solução do poro do concreto primordial tanto para compreender questões ligadas ao processo de hidratação, quanto de durabilidade do concreto (SANTOS, 2006; BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

Ao direcionar a discussão para o interesse desta pesquisa, verifica-se que quando comparados, a resistividade elétrica da matriz cimentícia é muito menor que a dos

agregados, pois agregados apresentam baixa condutividade, devido à menor porosidade presente (AZARSA, GUPTA, 2017; HOU et al., 2017).

Segundo Hou et al. (2017), a pasta de cimento, as argamassas e o concreto são eletricamente condutíveis e quando verificada a influência dos agregados na pasta de cimento, verifica-se que a presença de agregados resulta em três caminhos de condução elétrica: (A) através dos agregados e da pasta de cimento, (B) através dos agregados graúdos em contato, e (C) através da própria pasta, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Percursos de condução elétrica no concreto: (A) através dos agregados e da pasta, (B) através agregados, (C) através da pasta.

Fonte: Hou et al. (2017).

Por via de regra, a resistividade do concreto é governada predominantemente pela pasta de cimento, devido às características microestruturais apresentadas por ela, como volume e interconexão dos poros. Contudo, Hou et al. (2017) observaram que uma influência significativa na condutividade elétrica do concreto pode ser notada quando há o aumento do volume de agregados na mistura, Figura 10, devido à substituição da pasta de cimento endurecida porosa por agregados mais densos, ao efeito de diluição dos íons condutivos da solução dos poros, que tem origem da pasta de cimento, e da adsorção de álcalis na superfície dos agregados, como também apontado por outros autores (SANTOS, 2006; AZARSA, GUPTA, 2017).

Figura 10 - Efeito da variação do teor de agregado na resistividade do concreto.

Fonte: Hou et al. (2017).

Segundo Azarsa e Gupta (2017), estudos com a comparação do efeito de dois tamanhos diferentes de agregados (0 a 4 mm e 16 a 32 mm) na resistividade elétrica mostraram que o emprego de agregados de maior tamanho resulta em valores de resistividade elétrica mais elevados. Bem como, pela comparação entre diferentes tipos de agregados, para o qual foram utilizados o calcário britado e o cascalho, observou-se que o cascalho se caracterizava como agregados arredondados com superfície lisa, o que resultou em má ligação entre o cascalho e a pasta de cimento; enquanto para os agregados de calcário resultou em uma maior tortuosidade devido à textura da superfície rugosa e formato irregular da partícula, que, por sua vez, pode reduzir a taxa de fluxo elétrico e a resistividade. De maneira que os efeitos do tipo agregado não devem ser ignorados durante as medições de resistividade.

Para a medida de resistividade elétrica em concretos, o método mais empregado é denominado método dos quatro eletrodos, ou método de Wenner, com base na norma ASTM G57 – “Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method”.

Neste ensaio, uma corrente elétrica alternada é aplicada entre os quatro eletrodos, posicionados em linha reta e equidistantes nas faces paralelas da amostra de concreto, especificamente através dos dois eletrodos mais externos faz-se circular uma corrente. De

modo que a resistividade elétrica é medida a uma profundidade semelhante à distância entre os eletrodos e em áreas livres de armadura, conforme exibido na Figura 11.

Figura 11 - Método Wenner de medida de resistividade elétrica.

Fonte: Azarsa e Gupta (2017).

A medida da resistividade através deste método é simples e não destrutiva. De forma que a resistividade elétrica pode ser obtida segundo $\rho = K \cdot 2 \cdot \pi \cdot a \cdot V / i$, em que, ρ é a resistividade elétrica, a a distância entre eletrodos, V a diferença de potencial medida e i a corrente elétrica medida, e K é um parâmetro de correção, função da distância entre eletrodos e profundidade dos mesmos no concreto.

Quanto a velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU), a sua compreensão parte do princípio de que ondas ultrassônicas são propagadas, através de um meio, de um ponto para outro transmitindo energia sem que haja transporte de matéria. A propagação de ondas ultrassônicas (frequência > 20 kHz) em um sólido, a uma dada velocidade, dependerá das características do meio, como da densidade e das propriedades elásticas apresentadas pelo material (PANZERA et al., 2011; IRRIGARAY, 2012; HELAL; SOFI; MENDIS, 2015).

A avaliação da velocidade de pulsos ultrassônicos permite verificar a homogeneidade de uma estrutura de concreto, quanto a uniformidade da qualidade de sua produção (mistura, adensamento e lançamento), da hidratação do concreto e, consequentemente, obter uma estimativa da evolução de sua resistência mecânica. Assim, de modo comparativo, é possível avaliar aspectos da compactidade do concreto, podendo indicar tanto a ocorrência de fissuras internas, quanto de elevada porosidade, uma vez que a propagação da onda ocorre com maior velocidade na fração sólida do concreto do que no ar e água que preenchem os vazios da matriz cimentícia, sendo assim pode-se atribuir aos concretos com maiores velocidades de propagação da onda

ultrassônica a ocorrência de menos vazios e qualidade superior do que os demais (PANZERA et al., 2011; IRRIGARAY, 2012; HELAL; SOFI; MENDIS, 2015).

A fim de qualificar os concretos quanto aos valores característicos de velocidade de propagação de onda, a norma britânica BS EN 12504-4 (BS, 2004) realiza uma classificação quanto a qualidade do concreto, como exibido na Tabela 1.

Tabela 1 - Critérios de avaliação do concreto com base na velocidade de onda ultrassônica.

Velocidade da onda ultrassônica (m/s)	Qualidade do concreto
> 4500	Excelente
3500 a 4500	Bom
3000 a 3500	Regular
2000 a 3000	Ruim
< 2000	Péssimo

Fonte: BS (2004).

O método de caracterização da VPU consiste em medir o tempo despendido para a propagação de ondas longitudinais de pulso ultrassônico através do concreto, com frequências que variam de 20 kHz a 150 kHz. Na Figura 12 é esquematizada a transmissão direta, comumente empregada.

Figura 12 - Transmissão direta do pulso ultrassônico entre transdutores.

Fonte: ABNT (2013).

O transdutor-emissor é posicionado na face do elemento de concreto e capta-se esse pulso no ponto oposto do elemento pelo transdutor-receptor, de modo que conhecidas a distância percorrida e o tempo entre a emissão e a recepção do pulso, é possível obter a velocidade média da propagação da onda de pulso ultrassônico, conforme

preconizado norma brasileira NBR 8802 (ABNT, 2013; PANZERA et al., 2011; IRRIGARAY, 2012; HELAL; SOFI; MENDIS, 2015).

3.1.2.3. Fenômenos indutores de corrosão: carbonatação e penetração de cloretos

Os ensaios de carbonatação e da penetração de íons cloretos são amplamente realizados para avaliar a durabilidade dos concretos por razões óbvias, no que tange a corrosão de armaduras de aço, estes são os principais fomentadores deste tipo de deterioração, sendo também fortes indicadores de porosidade no concreto. É comum em meios urbanos ou industriais que estruturas de concreto estejam expostas a altos índices de CO_2 do ambiente, ou ainda que em ambientes expostos à maresia, respingos e névoa salinas de regiões marinhas, a efluentes industriais ou a sais de degelo estejam expostas a impregnação de íons cloreto, tornando as condições propícias para o desenvolvimento desta patologia (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

Referindo-se à carbonatação do concreto, essa se dá pela lenta penetração do dióxido de carbono do ar (CO_2) no concreto através da rede de poros ou por fissuras geradas em sua superfície. As reações de carbonatação se desenvolvem em presença de água, principalmente em função da presença da solução intersticial na porosidade do concreto, o que permite a dissolução do CO_2 gasoso atmosférico e a formação de íons CO_3^{2-} . Os íons carbonato reagem com o Ca^{2+} da portlandita - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ da pasta de cimento para a formação de carbonato de cálcio, fato que conseqüentemente reduz a reserva alcalina e o pH da solução intersticial do concreto, que passa de valores próximos a 12,5 para 9, conforme simplificada e ilustrada na Figura 13 (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

Apesar da portlandita ser o composto mais rapidamente carbonatado, outros produtos de hidratação como aluminatos e silicatos de cálcio são passíveis de carbonatação, bem como as fases C-S-H, KOH, NaOH (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

Figura 13 - Mecanismo de carbonatação da portlandita.

Fonte: Baroghel-bouny, Capra e Laurens (2014).

Sabe-se que quanto maior a porosidade do concreto maior será a facilidade de difusão do CO_2 e maior será a profundidade de carbonatação no concreto. Como ilustrado na Figura 14, a relação entre a resistência mecânica e a profundidade de carbonatação é um forte indicativo do efeito da porosidade do concreto no processo de carbonatação, dado que o principal mecanismo de transporte da carbonatação é a difusão, que é do mesmo modo governada pela interconexão dos capilares. Por conseguinte, verifica-se que quanto maior a resistência a compressão, menor será a frente de carbonatação do concreto mesmo para maiores teores de CO_2 no ar, devido a reduzida porosidade apresentada pelo material (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014; CASCUDO, 1997).

Outro fator de influência é a umidade relativa, pois será determinante na velocidade de progressão da frente de carbonatação, de modo que para que a carbonatação seja máxima esta deve-se encontrar na faixa de 65%, o que permite que a umidade relativa não seja muito baixa, restringindo a dissolução do gás; nem muito elevada, permitindo a rápida difusão do gás na estrutura porosa do concreto (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

Figura 14 - Relação entre resistência à compressão do concreto e a profundidade de carbonatação, sob diferentes teores de CO_2 .

Fonte: Baroghel-Bouny, Capra e Laurens (2014).

Quanto à penetração de íons cloreto no concreto, esta ocorre em presença de uma fase livre, seja em peças expostas a regiões de contato com cloretos, ou ainda por origem de fontes internas, tais como pelo uso da água do mar no concreto fresco, de agregados contaminados ou do uso de aditivos aceleradores de pega que contêm cloreto de cálcio. O transporte ocorre inicialmente por absorção capilar em camadas superficiais do concreto e migra para camadas mais profundas por difusão iônica, sendo, neste momento, o transporte regido pela diferença de concentração entre a superfície rica em íons cloreto e o interior isento (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014; CASCUDO, 1997).

No interior do concreto, o cloreto pode existir como íons cloreto livres, sob a forma iônica na solução intersticial; adsorvidos nas estruturas do C-S-H ou quimicamente ligados, também chamados de cloretos fixos, após reagirem com compostos como o aluminato de cálcio (C_3A) para dar origem a produtos que não participam do processo de corrosão, tais como os cloroaluminatos de cálcio ou sal de Friedel ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Apenas cloretos livres podem difundir-se e efetivamente atuar na despassivação e corrosão das armaduras de concreto. Entretanto, as três formas de existência dos cloretos sempre estarão presentes no concreto, de modo que quanto maior for o teor de fase ligada, menos vulnerável estará o concreto (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

Para ambos fenômenos a corrosão está relacionada a redução da reserva alcalina do concreto, a portlandita, pois há a redução do pH da solução intersticial do concreto o que leva a despassivação da armadura. No caso da carbonatação o mecanismo de corrosão é bastante compreendido e consolidado, sabendo-se que ocorre de maneira lenta e generalizada. Em presença de cloretos, os mecanismos físico-químicos não são claramente explicados, no entanto, sabe-se que ocorre com velocidade mais elevada sob a forma de pites. Compreende-se que, mesmo em concentrações muito baixas, da ordem de 0,01%, a presença de íons cloreto leva a dissolução pontual da camada de passivação da armadura, com a formação de íons complexos estáveis, que consomem os íons hidroxilas presentes. No entanto, no âmbito desta pesquisa, mais do que o estudo destes fenômenos quanto a corrosão, tem-se o interesse de compreendê-los dado que são fenômenos controlados principalmente pelas características da estrutura porosa do concreto bem como de sua solução intersticial.

3.2. ESCÓRIAS SIDERÚRGICAS

Durante o processo de obtenção do aço, diversos coprodutos e resíduos são gerados juntamente com o produto principal, dentre os quais os mais relevantes são as escórias de alto-forno e aciaria, pós e lamas oriundos de sistemas de controle atmosférico. Diante disso, a geração de agregado siderúrgico de alto-forno representou 42% do volume total em 2016 e 2017, e a de escória de aciaria, 27% (IAB, 2018).

As escórias siderúrgicas são nomeadas de acordo com os fornos em que são originadas, diferindo, assim, em sua composição química e propriedades físico-químicas. Os tipos predominantes de escórias gerados são: escória de alto forno, escória de aciaria LD e escória de forno elétrico a arco (FEA). A Figura 15 apresenta esquematicamente o processo de fabricação do aço e os tipos de escória gerados a partir de cada processo (YILDIRIM; PREZZI, 2011).

A escória gerada apresenta a função fundamental de controlar a composição química do aço. São originadas de impurezas contidas no minério de ferro, no carvão, no coque; e a partir das adições realizadas no processo de refino nas aciarias, para a remoção de impurezas e ajuste da composição, subprodutos inevitavelmente gerados através da obtenção de produtos siderúrgicos.

Figura 15 - Obtenção do aço e geração de escória siderúrgicas.

Fonte: Adaptada de Yildirim e Prezzi (2011).

Na Tabela 2, são apresentados os principais tipos e quantidades de escórias tipicamente geradas nas siderúrgicas. Outros processos, tais como a dessulfuração do aço, podem gerar quantidades significativas de escória, mas representam apenas uma pequena porção do total (PAN et al., 2016; YILDIRIM; PREZZI, 2011).

Tabela 2 - Tipos e quantidades de escórias siderúrgicas geradas.

Processo	Fonte de geração	Tipo de escória	Quantidade (kg/t de produto)
Produção do ferro gusa	Alto forno	Escória de alto forno	250 – 421
Produção do aço	Conversor LD	Escória de aciaria LD	50 – 200
	Conversor elétrico a arco	Escória de forno elétrico a arco	70 – 200

Fonte: Pan et al. (2016).

3.2.1. Escória de aciaria LD

A escória de aciaria LD é gerada no processo de transformação do ferro gusa em aço, que ocorre nos conversores a oxigênio. A sigla LD especifica que o material é oriundo dos conversores Linz-Donawitz, nome derivado das cidades austríacas onde foi desenvolvido, ou em inglês *Basic Oxygen Furnace*, no qual a palavra *basic* (básico) é usada para indicar o tipo de revestimento refratário utilizado para resistir à ação da escória rica em cal (GLOBALSLAG, 2011).

Os conversores LD são os grandes responsáveis pelo refino do ferro gusa, originando cerca de 70% do aço produzido mundialmente. O ferro-gusa ao sair do alto-forno exhibe aproximadamente a composição química apresentada na Tabela 3, obtendo-se nos conversores a redução dos teores de carbono de 4% para 0,05%, em massa.

Tabela 3 - Composição química do ferro gusa.

Elemento	C	Si	Mn	S	P	Fe
%	4 – 4,5	0,5 – 1,5	0,3 - 2	0,04	0,05 – 0,15	> 93

Fonte: Machado et al. (2003).

Quando o ferro gusa fundido deixa o alto-forno para ser convertido em aço, as principais tarefas são a remoção de carbono, silício e fósforo. Tipicamente, três processos são utilizados para conversão do aço, empregando diferentes fornos e procedimentos de refino, são eles: o forno elétrico a arco (FEA), o Simens-Martin (OH) e o já citado conversor a oxigênio LD (GLOBALSLAG, 2011; GUMIERI, 2002).

O conversor LD opera por meio da introdução de uma lança de oxigênio de elevada pureza e à alta pressão, através da abertura superior do conversor, incidindo o gás sobre o metal líquido presente no fundo do forno de modo a gerar uma movimentação energética do banho. O carbono dissolvido no ferro gusa é transformado em monóxido de carbono e eliminado sob a forma de gás, convertendo o ferro rico em carbono e em aço. As intensas reações de oxidação minimizam os níveis de impurezas que se combinam com a cal, formando a escória de aciaria LD (GUMIERI, 2002; YILDIRIM; PREZZI, 2011).

No conversor LD, a oxidação do carbono, silício e outros elementos de impureza fornece a energia necessária para sua operação sem que seja necessária a adição de uma fonte externa de calor, conferindo uma grande economia de combustível. Outra vantagem que garante ao processo LD o posto de mais empregado no mundo, está na rápida transformação do ferro gusa em aço, com sopros de oxigênio que duram em média 20 minutos, o que permite uma produção de 600 toneladas de aço por hora (GUMIERI, 2002; YILDIRIM; PREZZI, 2011).

No início do processo de refino do gusa, a carga adicionada ao forno de oxigênio consiste em aproximadamente 10 - 20% de sucata metálica utilizada como material refrigerante, 80 - 90% de gusa líquido em temperaturas entre 1300 – 1450 °C e cal virgem e/ou a dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) (YILDIRIM; PREZZI, 2011).

A cal é adicionada ao conversor com a finalidade de neutralizar os óxidos ácidos formados nas reações de oxidação, para evitar o ataque do revestimento refratário básico do forno pela escória, outra finalidade consiste em adequar o índice de basicidade binária, relevante quanto à obtenção de uma boa dessulfuração e desfosforação do gusa líquido. A dissolução da cal deve ser completa e rápida, de tal modo que mantenha a trajetória de composição da escória em regiões de alta basicidade, reduzindo o ataque ao revestimento refratário e evitando a precipitação da cal livre, gerada pela adição além do nível de saturação (MARTINI, 2015; ZAGO, 2015).

Entre as principais reações que se desenvolvem no conversor LD, estão presentes as que seguem abaixo (MACHADO et al., 2003):

I. Inicialmente, a oxidação do ferro, devido ao seu alto teor no banho metálico:

II. Seguida pela reação entre silício e FeO, devido à alta afinidade do silício com oxigênio, retornando o ferro para o banho.

III. O manganês se oxida de forma semelhante.

IV. Os silicatos que constituem a escória são formados pela combinação da sílica formada com o FeO, MnO e cal do fundente.

V.O carbono presente é oxidado e liberado como CO e CO₂.

Deste modo, ao final do processo, estão contidos no conversor o aço líquido, com a composição química desejada, e a escória de aciaria LD sobrenadante, separados devido às diferenças de densidade. O aço é vazado para a panela enquanto a escória permanece retida no conversor, em seguida a escória é vertida sobre o pote de escória e conduzida para o resfriamento ao ar. Verifica-se que a escória é um produto intrínseco da produção do aço, de extrema relevância pois cumpre funções concernentes a proteção dos refratários do forno, a absorção de produtos de desoxidação (SiO₂, Al₂O₃) e inclusões, a proteção do metal contra oxidação e ao isolamento do aço para minimizar a perda de calor (MARTINI, 2015).

O resfriamento lento ao ar é o principal processo utilizado para a escória de aciaria LD, no qual a escória líquida é vazada em pátios de resfriamento, para se solidificar na forma cristalina, sob a ação do ar ou de jatos de água, Figura 16. A escória ainda é submetida ao beneficiamento, no qual é britada e separada de acordo com diferentes faixas granulométricas, sendo em seguida estocadas em pilhas de envelhecimento ou cura (GUMIERI, 2002; MARTINI, 2015; FARIA, 2007).

O processo de cura permite que a escória obtenha maior estabilidade volumétrica, através da hidratação de seus óxidos expansivos sob ação do intemperismo, por um período mínimo de 6 meses (MARTINI, 2015).

Figura 16 - Pilhas de envelhecimento da escória de aciaria LD.

Fonte: Martini (2015).

No Brasil, após 6 meses de envelhecimento, a escória é analisada quanto à sua expansibilidade e de acordo com as exigências de aplicação, caso o resultado não seja satisfatório a escória será reanalisada após mais dois meses de cura. Entretanto, o período de cura deve ter duração suficiente para garantir a estabilidade volumétrica da escória, em função do teor de óxidos não reagidos e das características químicas e físicas da escória (GUMIERI, 2002).

Inicialmente, a maior transformação ocorre pela hidratação do CaO livre, principal reação expansiva da escória, reduzindo seu teor ao se transformar em Ca(OH)_2 . Subsequentemente, ocorre a formação do CaCO_3 , pela reação do hidróxido de cálcio com a CO_2 do ambiente, que também gera expansões. De modo que a superfície da escória é coberta por uma fina camada branca de CaCO_3 , conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Agregado de escória de aciaria LD: à esquerda, antes do processo de intemperismo; à direita, após formação de película fina de calcita por processo de intemperização.

Fonte: Palankar et al. (2015).

3.2.2. Características químicas

A escória de aciaria LD é um coproduto siderúrgico resultante da combinação da cal adicionada com os elementos removidos do ferro gusa, assim, a sua composição evolui à medida que se desenvolvem as reações de oxidação. A Figura 18 apresenta as regiões em que diferentes tipos de escória se encontram, uma vez que estas escórias são geradas a partir de várias fases do processo de obtenção de aço, são uma mistura de muitos compostos, apresentados em diferentes fases (YILDIRIM; PREZZI, 2011; GUMIERI, 2002; PAN et al., 2016).

Figura 18 - Diagrama de fases normalizado de CaO (MgO) - SiO_2 (Na_2O , K_2O) - Al_2O_3 (Fe_2O_3) de escórias siderúrgicas. *Acrônimos: Escórias: (BFS) de alto forno; (BOFS) aciaria LD; (EAFOS) oxidante de aciaria elétrica; (EAFRS) redutora de aciaria elétrica; (LFS) do forno de panela; (PS) de fósforo; (AODS) de descarbonatação por argônio.

Fonte: Pan et al. (2016).

Sendo assim, as reações químicas entre os escorificantes e os elementos de impureza removidos durante o refino do ferro gusa determinam a composição química da escória de aciaria LD podendo existir variações na composição da escória de acordo com as condições de operação e as especificações do aço produzido (YILDIRIM; PREZZI, 2011; GUMIERI, 2002).

Em concordância com os resultados obtidos por diferentes pesquisadores conforme exibido na Tabela 4. Os principais componentes químicos da escória de aciaria LD são CaO, FeO, e SiO₂, tal que podem exceder a 80% dos constituintes da escória.

Tabela 4 - Composição química em porcentagem da escória de aciaria LD.

Fontes	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]
CaO	40,1 -45	46,4	52,3	58,5	30-55	34,3- 41,9	39,4	46,7	43,4
SiO₂	8,6-13,1	11,1	15,3	10,7	8-20	13,6 - 17,3	11,9	14,8	13,5
Al₂O₃	1,7 – 2,1	1,2	1,3	1,71	1 - 6	3,4 - 6,9	2,16	5,5	3,3
MgO	4,5-7,5	8,3	1,1	4,3	5-15	2,7 - 7,1	9,7	6,3	5,8
Fe₂O₃	28,3 -32	23,2	16,2	15,3	14-22	20,1 - 36,2	30,2	18,4	28,6
SO₃	0,4 – 1,2	-	-	0,04	0,5 – 0,15	0,4 - 0,7	0,12	-	0,4
MnO	2 – 4,1	2,71	0,4	-	1-5	2,9 – 4	2,7	2,8	-
P₂O₅	1,4 – 2,4	2,1	3,1	-	0,2 - 2	1,1 - 1,9	1	1,7	1,5
NaO₂	-	0,09	-	-	-	0,13 – 0,15	0,25	-	-
K₂O	-	0,0	-	-	-	-	0,05	-	0,05
TiO₂	0,5-0,9	0,4	-	-	0,4-2	-	0,4	1,2	0,6

Nota: ^[1] Belhadj et al. (2012); ^[2] Li, Q. et al. (2016); ^[3] Reddy et al. (2006); ^[4] Ozkan; Saribiyink (2011); ^[5] Brand; Roesler (2015); ^[6] Wang et al. (2012); ^[7] Yildirim; Prezzi (2011); ^[8] Pang et al.(2015); ^[9] Yang et al.(2016).

Fonte: Autoria própria.

O silício oxidado, absorvido pela escória, confere um teor de sílica entre de 7 a 18%; os conteúdos de Al₂O₃ e MgO estão compreendidos nos intervalos de 1 a 17% e 0,7 a 15%, respectivamente. E em quantidades bastante inferiores são reportados os óxidos de sódio, potássio, manganês, titânio e o enxofre (DAS et al., 2007; YILDIRIM; PREZZI, 2011; WANG et al., 2012).

Elevados teores de CaO são encontrados nas escórias de aciaria, comumente acima de 30%, devido à adição da cal (ou dolomita) ao longo do processo de conversão. Durante a conversão, a cal pode não ser completamente dissolvida, de modo que o teor de cal livre pode ser superior a 12% (YILDIRIM; PREZZI, 2011; WANG et al., 2012).

Durante a conversão de ferro gusa, uma porcentagem do ferro pode não ser recuperada no aço produzido e é incorporada à escória, o que a torna consideravelmente rica em ferro, comumente encontrado próximo a 30%, na forma de wustita (FeO), além de poder apresentar partículas de ferro metálico (F^0), como exposto na Figura 19, que é de grande interesse para as indústrias siderúrgicas a recuperação da fração metálica.

Figura 19 - À esquerda, escória de aciaria LD e à direita, impurezas metálicas retidas por peneiramento.

Fonte: Ghoulé et al. (2017)

Em comparação com as escórias de aciaria elétrica (FEA) (Tabela 5), a composição química de ambas é similar, no entanto, os principais constituintes químicos de escórias elétricas podem variar amplamente. As escórias de aciaria LD possuem teores de CaO livre mais elevados, devido à velocidade com que se realizam as reações de refino, enquanto as escórias de aciaria elétrica têm maior teor de MgO livre, o que justifica o comportamento expansivo mais rápido das escórias LD, e lento no caso da escória de aciaria elétrica (GUMIERI, 2002; MARTINI, 2015; YILDIRIM; PREZZI, 2011). De acordo com Brand e Roesler (2015), o teor de CaO livre pode variar nas escórias de aciaria LD entre 1% a 10%, enquanto para aciaria elétrica entre 0% a 4%.

Tabela 5 - Composição química da escória de aciaria elétrica.

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Fe _{Tot}	SO ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅
[%]	0,4-52	0,8-19	1-14	0,4-10	24,2	15-30	0,2	1-15,6	0,3-0,6	0,5-1,2

Nota: Faixa de composição obtida da compilação de informações do autor.

Fonte: Mauthoor et al. (2016).

As aciarias brasileiras produzem escórias básicas, e, devido ao elevado teor de CaO, o índice de basicidade (CaO/SiO_2) é superior a um, habitualmente próximo de 3. As escórias de elevada basicidade apresentam menor capacidade de formação de estrutura vítrea, mesmo se submetidas aos resfriamentos rápidos; conforme realizado com escórias ácidas, como a escória de alto forno, que apresenta elevado teor de sílica, o que possibilita a formação de fase amorfa acima de 90%, quando submetida à granulação (REDDY et al.; 2006; GUMIERI, 2002).

Como verificado por diversos autores, o grau de amorficidade da escória de aciaria LD quando submetida à granulação em água, é consideravelmente inferior e variável. Os autores constataram a presença de estruturas cristalinas complexas semelhantes às obtidas pelo resfriamento lento, fato diretamente atrelado à composição química da escória e às taxas de resfriamento (ZAGO, 2015; REDDY et al., 2006; YILDIRIM; PREZZI, 2011).

Outro ponto importante consiste na relação entre o aumento da razão CaO/SiO_2 e o aumento do conteúdo de cal livre. Segundo Reddy et al. (2006), normalmente uma escória LD com basicidade entre 3,1 e 3,5 contém de 7 a 13% de CaO livre. E em condições habituais de cura lenta, a escória LD com basicidade de 3,4 contém cerca de 10% de cal livre, mas com aumento da razão CaO/SiO_2 de 3,5 para 4,5 gera-se um aumento significativo no teor de cal livre na escória, o que causa instabilidade volumétrica na hidratação através da formação de hidróxido de cálcio.

A cal livre pode ser gerada na escória de aciaria LD tanto pela dissolução incompleta da cal adicionada durante o refino, quanto pela decomposição do 3CaO.SiO_2 em 2CaO.SiO_2 + CaO livre, a uma temperatura próxima a 1200 °C, durante o resfriamento lento da escória fundida, podendo permanecer aprisionada no agregado, como mostra a Figura 20.

Figura 20 - Partícula de escória de aciaria LD com cal aprisionada.

Fonte: Yildirim; Prezzi (2011)

Deste modo, a composição química e o processo de resfriamento utilizados são fatores determinantes nas fases minerais presentes nas escórias (ZAGO, 2015; REDDY et al., 2006; YILDIRIM; PREZZI, 2011).

3.2.3. Características mineralógicas

Uma vez que são comuns pequenas variações no processo de refino do ferro gusa, são igualmente comuns pequenas variações quanto às fases minerais apresentadas pela escória de aciaria LD. Ademais, devido à complexidade da estrutura cristalina apresentada, a identificação das fases presentes se torna relativamente problemática, devido à sobreposição de picos quando avaliadas pela técnica de difratometria de raios X, principal método empregado para a análise mineralógica da escória (YILDIRIM; PREZZI, 2011; BELHADJ et al., 2012; PIATAK et al., 2015).

Na Tabela 6, são apresentadas as principais fases encontradas por diferentes autores. O aparecimento e o teor de algumas destas fases estão relacionados à idade da escória, ou seja, ao período de cura ao qual a escória foi mantida, bem como a velocidade de resfriamento.

As fases cristalinas majoritariamente encontradas são: silicato dicálcico - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ou C_2S (40–55%); ferrita dicálcica - $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ou C_2F (20–30%); wustita - FeO (10–13%), óxido de cálcio - CaO (1–7%), portlandita - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (1–8%), calcita - CaCO_3 (2–4%). A presença de periclásio (MgO) e brownmillerita ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{FeO}_3$ ou C_4AF) também costuma ser reportada, enquanto a do MnO ocorre com menor frequência (PIATAK, 2015).

Tabela 6 - Fases minerais da escória de aciaria LD.

Fonte	Fases minerais
Belhadj et al. (2014)	CaCO_3 , Ca(OH)_2 , 2CaO.SiO_2 , FeO , $2\text{CaO.Fe}_2\text{O}_3$
Reddy et al. (2006)	^[1] 2CaO.SiO_2 , $2\text{CaO.Fe}_2\text{O}_3$, 3CaO.SiO_2 , Fe_2O_3 e SS (Ca, Mg, Si, Fe)O ^[2] $2\text{CaO.Fe}_2\text{O}_3$, $3\text{CaO.P}_2\text{O}_5$, 2CaO.SiO_2 CaO
Ozkan; Saribyink (2011)	Fe, FeO, Fe_2O_3 , (Ca, Fe, Mg, Si)O, $2\text{CaO.Fe}_2\text{O}_3$, 2CaO.SiO_2
Belhadj et al. (2012)	CaCO_3 , CaO, Ca(OH)_2 , 2CaO.SiO_2 , FeO, $2\text{CaO.Fe}_2\text{O}_3$, SiO_2
Yildirim; Prezzi (2011)	Ca(OH)_2 , $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, $\text{Ca}_3\text{Mg(SiO}_4)_2$, Ca_2SiO_4 , CaCO_3 , CaO, $\text{Mg(CO}_3)_2$, CaSiO_3 , MgO, $\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, CaMgSiO_4 , Fe_2O_3 , MgCO_3
Wang et al. (2012)	3CaO.SiO_2 , 2CaO.SiO_2 , $2\text{CaO.Fe}_2\text{O}_3$, C_{12}A_7 , Fe_3O_4 , CaO, MgO, Ca(OH)_2 , (Ca, Al, Si)O
Brand; Roesler (2015)	3CaO.SiO_2 , 2CaO.SiO_2 , CaO, CaCO_3 , FeO, MgFe_2O_4 , $2\text{CaO.Fe}_2\text{O}_3$

Nota: ^[1] Escória LD granulada, ^[2] Escória LD resfriada lentamente.

Fonte: Autoria própria

As formas predominantes de óxido de ferro são a wustita e hematita; podendo a wustita constituir soluções sólidas com o CaO, MgO e MnO. A hematita pode ser formada durante o refino, combinando-se com CaO e Al_2O_3 , para produzir diferentes fases ferríticas; ou ser gerada pela oxidação do ferro metálico durante o envelhecimento da escória (GUMIERI, 2002). Comparada à escória de aciaria elétrica, a escória LD além de apresentar maior teor de CaO, possui quantidades superiores de silicatos hidráulicos, sendo assim mais amplamente investigada como material auxiliar para a produção de cimento portland (LUN et al., 2015).

A calcita (CaCO_3), formada durante a cura pela reação do Ca(OH)_2 com o CO_2 do ambiente, é um importante indicador da idade da escória. Pois no processo de envelhecimento, parte do CaO se converteu em Ca(OH)_2 , tornando-se disponível para a formação do Ca(CO)_3 . Assim, quanto maior o período de cura, maior será o conteúdo de calcita, o que reduz a reatividade da escória (BELHADJ et al., 2012), como pode-se observar na Figura 21.

Entre as fases comumente encontradas nas escórias de aciaria, a fase C_2S é considerada a principal, e se apresenta predominantemente pelo polimorfo $\beta\text{C}_2\text{S}$, chamado Iarnita. Durante o resfriamento sob temperaturas abaixo de 500°C a forma $\beta\text{C}_2\text{S}$ sofre a transformação polimórfica para a forma $\gamma\text{C}_2\text{S}$, o que provoca expansão volumétrica

e a perda de atividade hidráulica da escória. No entanto, esta transformação não costuma ocorrer na escória de aciaria LD, em razão da presença de FeO, que inibe a reação (BELHADJ et al., 2012; YILDIRIM; PREZZI, 2011).

Figura 21 - Agregados de escória de aciaria LD superficialmente hidratados e colapsados devido a hidratação.

Fonte: Martini (2015).

Na Figura 22, são apresentados os principais constituintes encontrados nas escórias de aciaria e suas propriedades relacionadas à utilização na engenharia civil.

Figura 22 - Constituintes das escórias de aciaria associados às suas propriedades relevantes a utilização em engenharia civil.

Fonte: Pan et al. (2016).

Com base nessa relação e considerando as principais fases encontradas segundo o levantamento realizado na literatura apresentado na Tabela 6, pode-se estimar que as principais características das escórias de aciaria correspondem a:

- Propriedades cimentícias, inferiores ao clínquer ($\uparrow C_2S$ e FeO , $\downarrow C_3S$);
- Potencial expansivo ($\uparrow CaO$ e MgO);
- Aumenta trabalhabilidade ($CaCO_3$);
- Elevada dureza e resistência ao desgaste (FeO).

3.2.4. Características morfológicas

Durante o resfriamento ao ar, a escória se solidifica lentamente na forma cristalina. E, depois de solidificada, é submetida ao beneficiamento através de britagem e separação magnética. A escória de aciaria LD costuma apresentar coloração cinza escura, morfologia angular, com bordas aparentes e superfície áspera, características relatadas por diversos autores como benéficas na produção de materiais cimentícios, por promover maior intertravamento entre a pasta cimentícia e os agregados, melhorando, assim, as propriedades mecânicas do material (GUMIERI, 2002; YILDIRIM; PREZZI, 2011; TAHA et al., 2014; PALANKAR et al., 2015).

Através de microscopia eletrônica de varredura, diversos autores verificaram que as escórias LD apresentam morfologia heterogênea, com partículas de superfície rugosa e formato que varia de subarredondado a angular, como mostra a Figura 23 (PALANKAR et al., 2015; GUMIERI, 2002; YILDIRIM; PREZZI, 2011).

Wang et al. (2011) demonstraram que as escórias de aciaria LD apresentam elevada angularidade das partículas; além de uma continuidade relativamente baixa na distribuição do tamanho das partículas (Figura 24), com variação superior à do cimento, resultados que corroboraram com os obtidos em sua análise de distribuição do tamanho das partículas da escória e do cimento. Ainda segundo os resultados obtidos por espectrometria de raios X por energia dispersiva (EDS), as menores partículas de escória são compostas principalmente por silicatos e aluminatos, e baixa quantidade de Fe_3O_4 .

Figura 23 - Micrografia da morfologia da escória de aciaria LD.

Fonte: Yildirim; Prezzi (2011).

Figura 24 - Micrografia da morfologia da escória de aciaria LD.

Fonte: Wang et al. (2011).

Reddy et al. (2006) apresentaram, em um estudo sobre as propriedades cimentícias da escória de aciaria LD, uma caracterização da microestrutura da escória por elétrons retroespalhados (BSE), como apresentado na Figura 25. Na qual se verifica que a microestrutura consiste em três fases distintas: (1) a fase escura, com padrão dendrítico, correspondente ao silicato dicálcico; (2) a fase cinzenta clara, referente à ferrita dicálcica, formada como a matriz, e (3) os aglomerados escuros dispersos aleatoriamente, correspondentes à cal livre. Além de algumas regiões muito pequenas e brilhantes na matriz de ferrita de cálcio, que indicam a presença de Fe^0 residual.

Figura 25 - Micrografia de escória de aciaria LD resfriada lentamente.

Fonte: Reddy et al. (2006).

Quando hidratada, a escória de aciaria LD gera produtos semelhantes ao cimento. Os produtos de hidratação gerados constituem principalmente no silicato de cálcio hidratado (C-S-H oriundo da hidratação do C_2S) e na portlandita ($Ca(OH)_2$).

No trabalho de caracterização de pastas de escória LD, Belhadj et al. (2014) avaliaram os produtos hidratados presentes nas pastas de escória por microscopia eletrônica de varredura após 90 dias de hidratação. As principais fases observadas correspondem ao gel de C-S-H (Figura 26a), ao hidróxido de cálcio (Figura 26b) e à calcita (Figura 26c). Também foi identificada a fase epídoto ($Ca_2FeAl_2Si_3O_{12}(OH)$) em menor quantidade (Figura 26d).

Figura 26 - Morfologia da escória após 90 dias de cura a 20° C (em atmosfera húmida saturada): (a) C-S-H, (b) portlandita (c) calcita e (d) epídoto.

Fonte: Belhadj et al. (2014).

3.2.5. As reações de CaO e MgO nas escórias de aciaria

Previamente a se apresentar as possibilidades de aplicação da escória de aciaria LD é pertinente que seja explicada a principal preocupação e limitação para o seu emprego, concernente ao seu caráter expansivo, em virtude da presença das fases livres de CaO e MgO na escória de aciaria.

Como apresentado anteriormente, a escória de aciaria LD é uma escória básica e este fator é principalmente justificado pela adição de diferentes fontes de cálcio, como fundente, e pela composição dos refratários utilizados no revestimento do conversor, o que torna a composição da escória em contato com esses refratários mais compatível, evitando o desgaste do revestimento. Para tal, podem ser adicionadas a cal ou a dolomita a fim de saturar as escórias com estes componentes e assim, minimizar a erosão do refratário.

A rápida dissolução do CaO e do MgO, quando adicionados no conversor é imprescindível, caso contrário propiciará a formação de aglomerados de material não reagido flutuantes na escória, a chamada cal residual ou não dissolvida. Para tal, a granulometria do material adicionado deve ser suficientemente fina e a sua adição deve se dar pela pré-mistura com materiais fluxantes (SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , CaF_2), o que permitirá a rápida dissolução no meio, de modo que ao final do processo o CaO esteja presente na escória combinada na forma de silicatos, aluminatos, soluções sólidas ou em carbonatos.

No entanto, a dissolução completa dificilmente ocorre. O CaO, e. g., ao reagir com SiO_2 , durante a formação da escória, dá origem a fase intermediária Ca_2SiO_4 , uma fase muito refratária que tende a formar-se como um revestimento em torno dos grãos de CaO e, portanto, retardar ou até impedir a dissolução da CaO na escória, conforme Figura 27.

Figura 27 - Partículas não reagidas de CaO envoltas por silicatos.

Fonte: Pretorius e Oltmann (2000).

O Ca_2SiO_4 posteriormente reagirá com óxido de silício dando origem a fase CaSiO_3 , que apresenta ponto fusão inferior ao do Ca_2SiO_4 , mantendo-se assim parcialmente líquida (GUMIERI, 2002; PRETORIUS; OLTMANN, 2000).

O resultado da dissolução incompleta é a ocorrência da cal livre e do MgO livre, (periclásio) na escória. Quando a escória é despejada para que seja lentamente resfriada, a cal livre e o MgO livre permanecem aprisionados no interior da escória, que ao se resfriar dá origem a agregados cristalinos de tamanhos variados. De modo que a hidratação de camadas mais internas da escória torna-se dificultada, mantendo em seu interior um elevado teor de CaO livre (MARTINI, 2014; KAMBOLE et al., 2017; GUO et al., 2018, JIANG et al., 2018).

A ocorrência de cal livre na escória pode também ser proveniente da decomposição do C_3S em $\beta\text{C}_2\text{S}$ e CaO. Este tipo de reação está associado a forma como a escória é resfriada, de modo que o processo de resfriamento lento permite que a decomposição ocorra a cerca de 1200°C , e é principalmente inconveniente para o uso da escória como aglomerante, tanto por reduzir o conteúdo do principal mineral responsável pela hidráulidade dos materiais cimentantes, o C_3S , quanto pelo aumento no conteúdo da cal livre (ZAGO, 2014; GUMIERI, 2002; BODOR et al., 2016).

O inconveniente da presença destes óxidos livres e não hidratados está no fato de que a sua hidratação ocorre de forma tardia em ambientes confinados, provocando uma significativa expansão volumétrica durante a formação da portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, e da brucita, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, cujos cristais tem maior volume, de modo a provocar a fragmentação do agregado de escória ou a fissuração resultante de pressões internas no concreto, reduzindo a sua resistência mecânica e à ambientes quimicamente agressivos (ZAGO, 2014; MARTINI, 2014; KAMBOLE et al., 2017; GUO et al., 2018, JIANG et al., 2018).

A hidratação da cal e consequente formação da portlandita confere um aumento volumétrico de quase 100% do volume inicial; enquanto a formação da brucita, hidróxido de magnésio, acarreta em um aumento de quase 120% em relação ao volume ocupado pelo cristal de MgO, o que torna imprescindível que sejam baixos os teores de CaO e MgO livres (JIANG et al., 2018, FARIA, 2007; BRAND, ROESLER, 2015; ZAGO, 2014; GUMIERI, 2002).

Lun et al. (2015) descreveram, com base nos seus resultados, um modelo esquemático do processo de fissuração do material cimentício devido a hidratação da cal livre. No qual, inicialmente, as partículas de escória contendo CaO e periclásio livres estão envoltas pela pasta de cimento, de modo que à medida que a hidratação do cimento progride, uma tensão de restrição é gerada, em função do desenvolvimento de tensões expansivas, causadas pela cristalização e crescimento dos cristais de Ca(OH)_2 e Mg(OH)_2 , que se eleva lentamente após o endurecimento do cimento.

A medida que as forças expansivas superam a tensão de tração do cimento, microfissuras apareceram na pasta de cimento endurecida, e tendem a aumentar de tamanho e espessura com o desenvolvimento das reações de hidratação, formando uma conexão reticular em torno das partículas de escória, de modo que a pior situação é caracterizada pelo “pipocamento” do agregado e sua exposição, e pela formação de fissuras claramente visíveis, que levam, por fim, desintegração ou à ruptura do material e, consequentemente, à redução da sua resistência.

De acordo com Gumieri (2002), o CaO livre pode ser verificado na escória sob diferentes formas. Podendo ser partículas de CaO residual de 6 a 50 μm sob a forma de “esponja”, forma mais reativa e propícia à expansão; sob a forma granular com partículas da ordem de 3 a 10 μm , na interface das diversas fases presentes nas escórias; ou infiltrada entre os óxidos de ferro, em torno de grãos de FeO ou C_2F , ou ainda junto aos cristais de C_2S ou C_3S , com cristais precipitados inferiores a 4 μm .

Enquanto o periclásio é menos frequentemente evidenciado nas escórias de aciaria LD, o MgO encontra-se habitualmente sob forma de soluções sólidas, compostas de FeO e MnO, denominadas magnésio-wustita, tendo sua estabilidade descrita em função da relação $\text{MgO} / (\text{FeO} + \text{MnO})$, que se inferior a 1 demonstra que o MgO está sob forma estável pois encontra-se combinado em uma solução sólida com FeO e MnO, por outro lado se superior a 1 o MgO estará livre, podendo gerar instabilidade volumétrica (GUMIERI, 2002; FARIA, 2007; WANG; WANG; ZHUANG, 2017).

Outra diferença característica entre o CaO livre e o periclásio está na cinética de hidratação, devido a peculiaridades no sistema cristalino de ambos. Os sistemas cristalinos do periclásio e do Mg(OH)_2 são similares aos do CaO e do Ca(OH)_2 , respectivamente, os óxidos com sistema cristalino cúbico e hidróxidos com sistema cristalino hexagonal, Figura 28. No entanto, o raio iônico do CaO é maior do que o do MgO, de forma que no sistema

cristalino do MgO os íons de oxigênio estão em contato íntimo com o íon Mg^{2+} num arranjo compacto nos interstícios. Enquanto no CaO, devido ao tamanho do raio do Ca^{2+} , os íons de oxigênio são forçados a se separar, de modo que os íons de cálcio não ficam arranjados compactamente. Esta diferença torna a estrutura do CaO relativamente menos estável que a do MgO, e torna-se evidente no comportamento expansivo do MgO a prazos mais longos, em até anos, enquanto a hidratação do CaO ocorre em períodos mais curtos, dias ou meses (GUMIERI, 2002; FARIA, 2007; KAMBOLE et al., 2017).

Ademais, o $Ca(OH)_2$ e o $Mg(OH)_2$ formados durante o processo de hidratação podem reagir com o dióxido de carbono da atmosfera para formar carbonato de cálcio ou de magnésio, levando a uma expansão volumétrica adicional. O problema de expansão pode ser remediado ao submeter a escória por um período ao intemperismo ou envelhecimento, a fim de acelerar a hidratação da cal livre e do periclásio.

Figura 28 - Estrutura cristalina do periclásio (à esquerda) e da brucita (à direita).

Fonte: Crystallography356 (2018).

3.2.6. Aplicações das escórias

A utilização dos resíduos siderúrgicos é uma necessidade conferida às siderúrgicas devido ao grande volume de resíduos gerados, aos encargos associados à correta destinação, respeitando às normas ambientais e ao compromisso social de criar uma produção mais sustentável.

As aplicações da escória de aciaria serão determinadas de acordo com suas características química, física e mineral apresentadas. Apesar de exibir propriedades tecnologicamente interessantes, corroborando com a crescente preocupação em

minimizar a extração de recursos naturais não renováveis e reinserir resíduos na cadeia produtiva, a escória de aciaria LD ainda é um material subvalorizado e tem seu uso consideravelmente limitado.

A Tabela 7 apresenta características e aplicações gerais de diferentes tipos de escórias siderúrgicas, associadas às suas propriedades físicas e químicas, que serão variáveis de acordo com as matérias-primas utilizadas e o processo de resfriamento aplicado a cada material.

Tabela 7 - Características e aplicações gerais de escórias siderúrgicas.

Propriedades	Tipo de escória	Características	Aplicações
Físicas	EALD, FEA	Elevada dureza, áspera, resistente ao desgaste, adesiva, elevada área superficial	Agregados para construção de rodovias e obras hidráulicas (concreto asfáltico)
Químicas	EAF, EALD, FEA	Componentes cimentícios (C_3S , C_2S , C_4AF)	Produção de cimento e concreto
	EAF resfriada ao ar e granulada	Não apresenta reação álcali-agregado (baixo Na_2O e K_2O)	Agregados graúdo e miúdo para concreto e matéria-prima para produção do clínquer
	EAF granulada	Elevada hidraulicidade latente (finamente moída)	Adições para cimento e concreto
	EAF resfriada ao ar e granulada, EALD, FEA	Componentes de fertilizantes (CaO , SiO_2 , MgO , FeO , MnO , P_2O_5)	Fertilizante agrícola e ajuste do pH de solos

Nota: EALD: escória de aciaria LD, EAF: escória de alto forno, FEA: escória de aciaria de forno elétrico a arco

Fonte: Pan et al. (2016).

3.2.7. Utilização geral

As escórias de aciaria têm como destinação mais comum a de agregado na pavimentação de estradas de rodagem e como lastro de ferrovias, uma vez que estes materiais têm boas propriedades mecânicas e um baixo custo, sua restrição é justificada

pelo teor de cal livre que pode provocar expansões volumétricas e a ruptura do pavimento, como apresentado na Figura 29 (NSA, 2016; BELHADJ et al., 2012; PAN et al., 2016; DAS et al., 2007).

Figura 29 - Pavimento expandido devido à presença de escória na mistura do revestimento.

Fonte: Pinheiro Neto et al. (2015).

Em diversos países, a escória de aciaria é usada como agregado de concreto asfáltico. Nos EUA, Japão, Alemanha e a França, cerca de 50% das escórias são usados diretamente como base de estrada, além de portos, aeroportos e demais infraestruturas (PAN et al., 2016). No Brasil, 46% da escória de aciaria gerada tem o mesmo destino após ser submetida a um período de cura e avaliada quanto ao seu potencial expansivo (IAB, 2018).

O concreto asfáltico é submetido ao tráfego de veículos pesados e deve suportar um grande número de carregamentos cíclicos repetitivos durante a sua vida útil, essa aplicação está entre as mais significativas, pois a escória consiste em um material resistente, durável e com alta resistência ao desgaste e à derrapagem em comparação ao basalto, por exemplo, tornando-se um agregado ideal para ser utilizado em base e sub-base de pavimentos, assim como, agregado na confecção de misturas asfálticas (NSA, 2016; BELHADJ et al. 2012; DAS et al., 2007). O uso de escórias de aciaria como agregado em concreto asfáltico e em base e sub-base de pavimentos tornou-se promissor, pois permite que maiores quantidades de escórias possam ser usadas; o processamento do material é tecnicamente simples; a preocupação com a estabilidade volumétrica a longo

prazo é inferior e, para tal, foram desenvolvidos métodos específicos para avaliar a expansão da escória (WANG et al., 2010).

Outra aplicação um pouco menos significativa: no Brasil, apenas 1% consiste na utilização da escória de aciaria LD, na agricultura para neutralizar a acidez de solos e como fertilizante, devido à elevada basicidade e à presença de fosfato na escória, sua adição pode ainda melhorar a densidade e a porosidade dos solos, fato que auxilia no transporte hídrico (GUMIERI, 2002; BELHADJ et al., 2012; IAB, 2016).

3.2.8. Utilização na produção de aglomerantes

Durante a geração das escórias, o óxido de cálcio adicionado é combinado às impurezas presentes no aço, gerando certa quantidade de silicatos de cálcio, de modo semelhante ao que ocorre no processo de clinquerização, o que confere à escória certa hidraulicidade e composição química semelhante à do cimento portland. Assim, diversas pesquisas têm mostrado que a escória de aciaria LD, finamente moída, pode ser usada como um substituto do cimento em argamassas e concretos (MURPHY et al., 1997; LUN et al., 2015; BELHADJ et al., 2012).

No entanto, as propriedades hidráulicas da escória são consideradas pobres, dado que a principal fase mineral encontrada na escória de aciaria LD é o polimorfo $\beta\text{C}_2\text{S}$ que, apesar de gerar um conteúdo superior de C-S-H durante a hidratação, apresenta um tempo de reação mais longo; enquanto o teor de silicato tricálcico (C_3S) é consideravelmente baixo, afetando o desenvolvimento da resistência inicial. Ademais, o teor wustita apresentado é alto, e soluções sólidas de wustita, comumente presentes nas escórias, não apresentam propriedades cimentícias e não são combinadas para formar minerais hidráulicos durante o resfriamento da escória líquida, além de apresentarem a capacidade de se combinar com cálcio, reduzindo o teor disponível para que se forme o silicato tricálcico (MURPHY et al., 1997; LUN et al., 2015; BELHADJ et al., 2012).

Na Tabela 8, é exibida a relação existente entre a basicidade, as fases minerais e a reatividade da escória de aciaria, e demonstra que a reatividade das escórias de aciaria aumenta com o aumento de sua basicidade, o que, no entanto, provoca o aumento do conteúdo de CaO livre. A presença de componentes expansivos, tais como MgO e CaO livre, é o principal limitante da utilização de escórias na construção civil, pois possuem

hidratação posterior ao endurecimento do cimento (LUN et al., 2015; BELHADJ et al., 2012; BODOR et al., 2016).

A hidratação do óxido de cálcio livre ocorre rapidamente, promovendo uma elevada liberação de energia e a formação do hidróxido de cálcio, que apresenta volume molar superior à cal, assim o fenômeno de expansão gera a concentração de tensões internas e podem levar à fissuração do material confinado. De modo semelhante, ocorre a hidratação do periclásio e a formação da brucita, no entanto, a hidratação é mais lenta em comparação à cal, devido a superior estabilidade da estrutura cristalina do MgO (ZAGO, 2015; LUN et al., 2015; BELHADJ et al., 2012; BODOR et al., 2016).

Tabela 8 - Reatividade, basicidade e composição mineral de escórias siderúrgicas.

Reatividade	Basicidade		Principais fases minerais
	CaO/SiO ₂	CaO/SiO ₂ +P ₂ O ₅	
Baixa	0,9 - 1,5	0,9 - 1,4	Olivina e mervinita
	1,5 - 2,7	1,4 - 1,6	Mervinita, C ₂ S
Média	-	1,6 - 2,4	C ₂ S
Alta	>2,7	>2,4	C ₃ S, C ₂ S, C ₄ AF, C ₂ F

Fonte: Shi; Qian (2000).

Para obter estabilidade volumétrica e elevar a reatividade das escórias, vários métodos têm sido empregados, como o envelhecimento em ambiente atmosférico (pela ação de intempéries), a granulação da escória, a carbonatação acelerada e o tratamento da escória líquida por injeção de oxigênio e de sílica para ajuste da basicidade (REDDY et al., 2006; BODOR et al., 2016; ZAGO, 2015).

Quando se pretende utilizar escórias como ligantes, a atividade hidráulica do material é muito importante. Um grande número de estudos têm se concentrado na utilização da escória de aciaria LD como matéria-prima para a fabricação de clínquer, como adição na produção de cimento, combinando a escória de aciaria com escória de alto-forno, ou em seu uso mais comum, na substituição parcial do cimento Portland, na qual geralmente resulta em resistências iniciais mais baixas e tempos de pega mais longos,

sendo necessária a utilização de um ativador para acelerar a dissolução da estrutura e a hidratação de escórias (TSAKIRIDIS et al., 2008; ZAGO, 2015; BODOR et al., 2016).

De modo geral, a utilização da escória de aciaria na produção de cimento reduz o consumo de energia dispendida na obtenção do clínquer, principal constituinte do cimento. No entanto, com o uso de escória de aciaria LD como aglutinante, devido ao alto teor de ferro metálico, é requerida uma moagem intensa, e este processo pode representar uma alta demanda de energia e oneração do processo (TSAKIRIDIS et al., 2008; ZAGO, 2015; BODOR et al., 2016).

Apesar de Murphy et al. (1997) defenderem que a substituição da escória na alimentação do forno de clínquerização por uma mistura de calcário e argila não resulta em significativa economia de energia, uma vez que a escória também deve ser queimada, e pouco benefício econômico direto é obtido com a substituição, estudos indicaram que, na produção do clínquer, a adição de escória LD como matéria-prima permite a redução da temperatura de queima, diminuindo assim o consumo de energia (REDDY et al., 2006).

A produção de cimento utilizando escória confere características especiais ao aglomerante, tais como maior resistência à abrasão, menor evolução de calor de hidratação e maior desenvolvimento da resistência tardia, tempo de pega maior e menor resistência inicial, quando comparado com o cimento Portland comum. A utilização da escória pode ser realizada pela substituição da escória de alto forno, do calcário ou em pequenos teores de clínquer, promovendo com sua adição, a redução do consumo de recursos naturais, como o calcário, e das emissões de CO₂ (ZAGO, 2015; REDDY et al., 2006; SHI; QIAN, 2000).

Diversos pesquisadores estudaram o efeito das condições de resfriamento das escórias siderúrgicas para a melhora da hidraulicidade e verificaram que a granulação da escória de aciaria LD, para a formação de um material vítreo, depende tanto da composição química da escória, como das condições de resfriamento (ZAGO, 2015; GUMIERI, 2002; TOSSAVAINEN et al., 2007; REDDY et al., 2006; MURPHY et al., 1997; NORVAL; OBERHOLSTER, 2011).

Para a escória granulada de alto forno, produzida pelo resfriamento brusco com jatos de água de alta pressão, é obtida uma estrutura vítrea, semelhante à areia e que apresente capacidade de endurecer após reagir com água. De modo que suas características como aglomerante hidráulico já são amplamente aceitas, mais de 90% da

escória granulada são utilizadas como matéria-prima para o cimento (HORII et al., 2013; IAB, 2016).

Segundo MURPHY et al. (1997), ao aumentar a quantidade de material amorfo na escória de aciaria, semelhante ao que ocorre na escória de alto forno, sua capacidade de hidratação tende a ser elevada, podendo ser utilizada como material aglomerante na produção de cimentos e concreto, obtendo maior valorização econômica em comparação com materiais convencionais da construção de bases de estradas.

O resfriamento rápido em água pode resultar numa escória amorfa e com boa separação do ferro metálico, devido a sua rápida contração. Por este processo, gera-se uma estrutura com menor grau de cristalinidade do que obtido pelo resfriamento ao ar da escória LD e superior estabilidade volumétrica, sendo descrito como um processo de envelhecimento acelerado, que reduz o teor de cal livre (TOSSAVAINEN et al., 2007; KUMAR et al., 2009). O grau de instabilidade volumétrica do CaO livre depende do tamanho dos cristais, que por sua vez dependem da velocidade de resfriamento. Se resfriada lentamente, são formados, na escória, cristais de óxido de cálcio maiores, que se hidratam lentamente, gerando expansão no interior do material. No entanto, quando resfriados rapidamente, possuem menores dimensões e hidratam-se mais rapidamente, sem gerar tensões internas e fissuração (MARTINI, 2015).

É conhecido que silicatos fundidos apresentam alta viscosidade devido às suas longas cadeias de moléculas, e a formação de uma estrutura cristalina ocorrerá se for permitido o rearranjo lento das moléculas durante o resfriamento. Assim, no resfriamento rápido, a escória passa do estado líquido para sólido, sem o desenvolvimento de uma estrutura cristalina (CALLISTER, 2007; SHACKELFORD; DOREMUS, 2010). No entanto, como pode ser visto na Tabela 9 diferentes resultados podem ser obtidos pela alteração do processo de resfriamento de escórias siderúrgicas.

Entretanto, escórias com elevada basicidade, alta relação CaO/SiO_2 , apresentam menor viscosidade devido à presença de alto teor de íons Ca^{2+} , que agem como modificadores de rede e reduzem o grau de polimerização da cadeia. A alta relação CaO/SiO_2 pode provocar também a elevação da viscosidade na escória, neste caso, por aumentar o CaO não dissolvido, o que dificulta a formação da estrutura vítrea. Apesar de a elevada basicidade impedir a amorfização das escórias, o resfriamento rápido apresenta a vantagem de conferir estabilidade volumétrica e evitar a precipitação de cal livre a partir

da decomposição do silicato tricálcico e de facilitar a separação do ferro metálico (ZAGO, 2015; GAN et al., 2015).

Tabela 9 - Resultados obtidos pela alteração do processo de resfriamento de escórias siderúrgicas, segundo a literatura.

Fonte	Escória	Resfriamento	Amorfo	Cal livre	Resultados
REDDY et al., 2006	EALD	Granulação em água	-	<1.0%	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4, \text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5, \text{Ca}_3\text{SiO}_5, \text{Fe}_2\text{O}_3$
	EALD	Lento ao ar	-	10%	$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5, \text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_6, \text{Ca}_2\text{SiO}_4, \text{CaO}$
	EALD		1%	-	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5, \beta - \text{Ca}_2\text{SiO}_4, \text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5, \text{FeO}$
	FEA		17%	-	$\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2, \gamma - \text{Ca}_2\text{SiO}_4, \text{CaAl}_2\text{SiO}_6$
ENGSTRÖM, et al., 2009	EALD	Granulação	-	-	$(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn})\text{O}, \text{Ca}_3\text{SiO}_5, \alpha - \text{Ca}_2\text{SiO}_4$
	FEA	em água	-	-	$\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2, \text{MgCr}_2\text{O}_4$
ZAGO, 2015	EALD	Granulação em água	72%	0,3%	$\text{Ca}_2\text{FeAlO}_5, \text{AlFe}_2\text{O}_4, \text{MgO}, \text{Ca}_2\text{SiO}_4$
		Lento ao ar	54%	0,4%	$\text{Ca}_2\text{FeAlO}_5, \text{MgO}, \text{Ca}_2\text{SiO}_4$
GUMIERI, 2002	EALD	Granulação em água	82%	0 -, 19%	$\alpha' - \text{Ca}_2\text{SiO}_4, \text{Ca}_3\text{SiO}_5, \text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5, \text{Fe}^0$
		Lento ao ar	-	0,02 - 4,03%	$\beta - \text{Ca}_2\text{SiO}_4, \text{CaO}, \text{Ca}(\text{OH})_2, \text{CaCO}_3, \text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5, \text{FeO}, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{MgO}, \text{Fe}^0$
GAUTIER, 2013	EALD	Granulação em água	-	-	$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5, \text{MgO}, \text{Ca}_3\text{SiO}_5, \text{CaO}$
		Lento ao ar	-	-	$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5, \text{MgO}, \text{CaO}, \beta - \text{Ca}_2\text{SiO}_4$
NORVAL; OBERHOLSTER, 2011	EALD	Granulação em água	10%	-	$\text{CaFeSi}_2\text{O}_6, \text{FeO}, \text{Ca}_2\text{SiO}_4, \text{CaO}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{21}, \text{Fe}^0, (\text{Fe}, \text{Mn})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
		Lento ao ar	3%	-	$\text{MgO}, \text{MgFe}_2\text{O}_4, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{CaO}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{21}, \text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2, \text{Ca}_2\text{SiO}_2, \text{FeO}, \text{Fe}^0, \text{FeMgSiO}_4$
	EALD + sílica	Granulação em água	98%	-	Fe^0
GAN et al., 2015	EALD	Rápido ao ar	-	6,9%	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5, \gamma - \text{Ca}_2\text{SiO}_4, \text{CaO}, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Mg}_2\text{SiO}_4, \text{MgO}, \text{CaAl}_2\text{O}_4$
		Lento ao ar	-	5,8%	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5, \gamma - \text{Ca}_2\text{SiO}_4, \text{CaO}, \text{Mg}_2\text{SiO}_4, \text{CaFeO}_2, \text{CaSiO}_3, \text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$

Fonte: Autoria própria.

Gautier et al. (2013) estudaram o comportamento da escória de aciaria quando submetida a diferentes processos de resfriamento, e apresentaram microestruturas da escória resultantes de três distintos processos, explanados na Figura 31.

No resfriamento industrial (a) foi identificada uma região com coloração cinza claro e listras escuras, que consiste em silicatos de cálcio, diferindo entre si pelos teores de fósforo. Uma segunda região mais escura é composta por cal livre (pequenos cristais brancos) e ferrita cálcica (com teores de SiO_2 , MgO , MnO e Al_2O_3), também foram identificados pequenos cristais de periclásio (cinza escuro). A região mais clara é atribuída à fase magnésio-wustita, contendo também grandes quantidades de MnO e CaO .

Figura 30 - Micrografias da escória de aciaria sob resfriamento (a) industrial, (b) lento e (c) rápido.

Fonte: Gautier et al. (2013).

A escória resfriada lentamente (b) foi submetida a condições mais prolongadas de resfriamento, que, segundo os autores, se aproximam das condições do equilíbrio termodinâmico do material (GAUTIER et al., 2013). Foram identificadas uma fase cinzenta com grandes e homogêneos cristais de silicato dicálcico, com distintos teores de fósforo, claramente bem formados pelo tempo prolongado de resfriamento; uma fase constituída principalmente por cálcio e ferro indicativos da fase ferrítica Srebrodolskita; e uma fase cinza escura correspondente ao periclásio de elevada pureza. A cal livre, encontrada pelos autores por difratometria de raios X, não foi identificada por microscopia eletrônica de varredura, o que os autores atribuem à associação com os silicatos de cálcio.

Pelo resfriamento rápido da escória (c), Gautier et al. (2013) observaram a formação de uma matriz, região mais clara da microestrutura, composta principalmente de ferrita cálcica, com baixos teores de fósforo. E a segunda região composta por pequenos cristais dendríticos, região mais escura, correspondentes a silicatos de cálcio com duas composições: uma composta principalmente de CaO e SiO_2 e a outra composta de CaO , SiO_2 , MgO . Concluindo que a taxa de resfriamento tem influência significativa sobre o tamanho dos cristais, bem como sobre cada proporção de fase e pureza obtida.

Na tentativa de aumentar a capacidade de vitrificação das escórias de aciaria, Pinto Junior (2012) estudou a adição do resíduo de granito, detentor de elevado teor de sílica e reduzido de cal (60% SiO_2 e 4% CaO), para ajustar a composição e reduzir a basicidade da escória de aciaria LD. Por meio da fusão da mistura escória/resíduo de granito, reduziu-se o percentual de CaO livre e obteve-se cimentos com expansão nula. As misturas resfriadas em água apresentaram-se predominantemente amorfas, enquanto nas misturas resfriadas lentamente, foram observadas a presença das fases akermanita e gehlenita, consideradas fases importantes para a atividade hidráulica das escórias.

No entanto, os cimentos produzidos por Pinto Junior (2012), sob condições de moagem industrial, não atingiram as resistências estabelecidas pela NBR 5735 nas diversas idades. Em função dos altos teores de ferro presentes na mistura, provenientes tanto da escória quanto do resíduo de granito, sendo necessário acrescer o tempo de moagem em cerca de 1 hora. Somente com a elevação da área específica foi possível obter a resistência estabelecida por norma.

Os cimentos com escória de aciaria podem ser utilizados na construção civil em obras de aplicação geral, e são especialmente adequados para aplicações em concreto massa e de pavimentos, devido à baixa liberação de calor de hidratação (SHI; QIAN, 2000).

Por apresentarem propriedades mecânicas satisfatórias, mas retardo nas reações de hidratação, os cimentos com escória de aciaria podem ser produzidos com a utilização de ativadores. A ativação da escória melhora as propriedades do cimento quanto à redução dos tempos de início e final de pega, além de melhorar o desenvolvimento da resistência mecânica inicial (SHI; QIAN, 2000; BELHADJ et al., 2012).

A ativação química das escórias pode ser obtida pelo acréscimo de um aditivo acelerador que altere o processo de precipitação dos hidratos, diminuindo o tempo necessário à nucleação (SHI; QIAN, 2000; BELHADJ et al., 2012). Belhadj et al. (2012) investigaram a utilização de diversos ativadores, tais como o cloreto de cálcio, cloreto de sódio, metassilicato de sódio e cimento de alta alumina. Dentre os quais o cloreto de cálcio promoveu um aumento significativo na resistência à compressão axial da pasta de escória endurecida, sendo o efeito justificado pela redução do teor de Ca(OH)_2 nos poros do C-S-H formado, o que facilita a difusão das fases não hidratadas pela camada de C-S-H. Entretanto, o uso de aditivos contendo cloretos pode provocar a deterioração das

armaduras em estruturas de concreto armado ou de concreto protendido, sendo proibida pelas normas brasileiras a sua utilização, de acordo com ABNT NBR 6118 (2014).

A ativação da escória também pode ser obtida fisicamente, através do aumento da área de superfície dos grãos de escória, em que se eleva a superfície de contato entre grão e água, acelerando as reações de hidratação. Zhang et al. (2011) demonstraram que partículas de escória de variadas dimensões apresentam comportamentos diferentes quando hidratados. Como esperado, verificou-se inicialmente que a quantidade de água necessária para a obtenção da consistência normal das pastas de escória aumenta significativamente com a diminuição do tamanho das partículas. Do mesmo modo, partículas com diâmetro médio $D_{50} = 1,43 \mu\text{m}$ apresentam taxa de evolução de calor e calor cumulativo de hidratação elevados, ao passo que não se observam diferenças óbvias na evolução do calor para as frações de escória superiores a $5 \mu\text{m}$.

Na Figura 31 são apresentadas, a partir de Zhang et al. (2011), as micrografias das pastas endurecidas de escória, obtidas por diferentes frações granulométricas e períodos de cura. Para 3 dias de cura (Figura 31a), observa-se uma grande quantidade de produtos de hidratação na pasta com granulometria fina, enquanto as partículas médias de escória apresentam hidratação superficial e as partículas grosseiras apresentam superfície limpa.

Figura 31 - Micrografias de pastas endurecidas de escória de aciaria LD: (a) Fração fina ($D_{50} = 1.43 \mu\text{m}$) curada por 3 dias e (d) por 28 dias; (b) fração média ($D_{50} = 5.74 \mu\text{m}$) curada por 3 dias e (e) por 28 dias; (c) fração grossa ($D_{50} = 15.17 \mu\text{m}$) curada por 3 dias e (f) por 28 dias.

Fonte: Zhang et al. (2011).

Segundo os autores, após cura durante 28 dias, a quantidade de produtos de hidratação na pasta de escória fina aumenta de forma constante (Figura 31d); na pasta de fração média uma certa quantidade de produtos de hidratação foi obtida; enquanto na pasta de fração grosseira, apenas uma ligeira hidratação superficial é observada. Corroborando com as micrografias, os resultados de resistência mecânica mostraram que a contribuição da fração fina de escória de aciaria LD (tal como $D_{50} = 1,43$ e $5,74 \mu\text{m}$) pode ser comparável com a do clínquer, sendo assim, são recomendadas para aplicação em materiais à base de cimento.

Wang et al. (2011) demonstraram a partir da difratometria de raios X (Figura 32), que mesmo após 360 dias de cura, parte dos silicatos e aluminatos não haviam sido hidratados. Fato relacionado ao tamanho de partícula da escória, pois à medida que tamanho do grão aumenta, a atividade hidráulica de silicatos e aluminatos é reduzida.

Figura 32 - Difratoograma da escória de aciaria hidratada o após 360 dias de cura.

Fonte: Adaptada de Wang et al. (2011).

Como apresentado na Figura 33, Wang et al. (2011) identificaram que algumas partículas de silicato e de aluminato, que constituíam a escória de aciaria LD, apresentando elevado tamanho de partícula, obtiveram apenas uma ligeira hidratação superficial destas partículas após 360 dias de hidratação, gerando uma quantidade muito pequena de produto de hidratação.

Figura 33 - Micrografias de produtos de hidratação de fases cimentícias com elevado tamanho de partícula na escória de aciaria.

Fonte: Wang et al. (2011)

Os autores ressaltam que as propriedades cimentícias da escória de aciaria provêm das fases silicato ($\beta\text{C}_2\text{S}$) e aluminato (C_{12}A , $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) enquanto as fases inertes (soluções sólidas de CaO-FeO-MnO-MgO) e a cal livre não contribuem para as propriedades cimentícias. Bem como, que a taxa de hidratação da escória é consideravelmente menor do que a do cimento portland nas primeiras idades, e assim, que as partículas maiores por apresentarem baixa reatividade, dão pouca contribuição às propriedades cimentícias da escória de aciaria.

Wang et al. (2011) demonstraram que a escória de aciaria LD melhora a condição de hidratação do cimento em idades tardias. Uma vez que nestas idades, a taxa de hidratação do cimento depende do grau de dificuldade da penetração da água nas camadas C-S-H e as fases inertes da escória, que estão envolvidas pelo gel C-S-H, reduzem indiretamente a espessura da camada de C-S-H em torno das partículas de cimento, desempenhando assim, um papel de nucleação.

Ademais, Pan et al. (2016) relataram que a adição de uma certa quantidade de escória de aciaria LD ao cimento pode reduzir a porosidade, melhorar a distribuição dos poros e aumentar a consistência da pasta de cimento. Diversos resultados encontrados na literatura são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Efeito da utilização da EALD na produção de cimentos e argamassas, segundo a literatura.

Fonte	Aplicação	Resultados
Kumar et al., 2009	Substituição da EAF	Com teores de substituição de até 15% da EAF por escória EALD granulada na produção do cimento, a resistência aos 28 dias se manteve próxima a de referência. Com a substituição da EAF por escória EALD cristalina, as propriedades mecânicas do cimento não foram alteradas com adições em até 8% por escória.
ZAGO, 2015	Substituição da EAF e do clínquer	Com teores de substituição de 5% da EAF por EALD granulada obteve-se um ganho nas propriedades mecânicas do cimento de 32% aos 28 dias, enquanto com 5% da EALD cristalina, o ganho foi de 29% na mesma idade. Com a substituição de 5% do clínquer obteve-se os mesmos níveis de resistência com a EALD granulada e cristalina.
GUMIERI, 2002	Substituição do clínquer	Com a substituição de 6% do clínquer por EALD granulada, obteve-se o mesmo nível de resistência a compressão do cimento referência. Já a substituição de 20% provocou redução de 15% na resistência mecânica.
ZHANG et al., 2011	Combinada ao clínquer e ao gesso	Com a adição de até 50%, as resistências à compressão e à flexão do cimento mantiveram-se próximas as do cimento referência.
	Substituição do clínquer (< 10 µm)	Com substituição de 30, 50 e 60%, as resistências à compressão e à flexão foram superiores à do cimento referência, assim como foram os tempos de pega.
GAN et al., 2015	Substituição do cimento	Com substituição de 5, 10 e 15% do cimento por EALD (410 m ² /kg) as propriedades mecânicas declinaram. Com a substituição de 5% por EALD (490 e 580 m ² /kg) a resistência à compressão foi elevada, enquanto com 15% de substituição as resistências declinaram.
Yang et al., 2016	Substituição de cimento	Com a substituição de 20% e 40% do cimento por uma mistura de EALD e cinza de casca de arroz, as argamassas apresentaram resistência à compressão e flexão semelhantes ao de referência.
OZKAN; SARIBIYIK, 2011	Substituição de uma mistura de clínquer e gesso	O cimento foi obtido com a substituição de 20 a 80% da mistura por EALD. Apenas as substituições de 60 e 80% por EALD geraram expansão acima do limite normativo.
		O cimento foi obtido pela substituição da mistura por uma composição: EALD - EAF, em teores variando de 8%EALD-12% EAF a 24%EAF-16% EALD. A presença da EAF reduziu o efeito da expansibilidade, mantendo todas as amostras em níveis inferiores ao normativo.
Wang et al., 2011	Substituição do cimento	Com substituição de 22,5% e 45% do cimento, os principais produtos de hidratação foram C-S-H, Ca(OH) ₂ , Fe ₃ O ₄ e C ₂ F, os mesmos da referência. O período de dormência se tornou mais longo com o incremento de EALD e o calor de hidratação foi reduzido.
Wang et al., 2012	Substituição do cimento	Argamassas contendo 22,5 e 60% de EALD, aos 28 dias, apresentaram resistência à compressão equivalente a 87,5 e 51,9% da referência. Aos 360

(Continua)

(Conclusão)

		dias, foi equivalente a 86 e 61%. E a estrutura de poros da pasta endurecida tornou-se mais grosseira.
		Com substituição de 50% do cimento, as argamassas contendo uma mistura de 30% EALD - 70%EAF obtiveram resistência à compressão equivalente a 65%, 70% e 102% da resistência referência aos 3, 7 e 28 dias, respectivamente. Com uma mistura de 50% EAL- 50% EAF foi equivalente a 52%, 62% e 93% da referência aos 3, 7 e 28 dias, respectivamente.

Nota: EALD: escória de aciaria LD; EAF: escória de alto forno; FEA: escória de aciaria de forno elétrico a arco.

Fonte: Autoria própria.

Em regra, a utilização da escória LD na produção de cimento se dá principalmente pela substituição da escória de alto forno, do clínquer e do próprio cimento, Figura 34. Tais substituições geram vantagens tecnológicas e econômicas, enquanto as principais preocupações relativas ao seu uso são o baixo teor de silicatos de cálcio reativos e o potencial expansivo de alguns de seus constituintes (GUMIERI, 2002; TAHA et al., 2014; TSAKIRIDIS et al., 2008).

Demonstrando, assim, a necessidade de ser utilizada em combinação com outros materiais, para que seja consumido o óxido de cálcio livre e acelerado o processo de hidratação, o que pode se dar pela utilização combinada com materiais pozolânicos, como a cinza volante, de modo que a reação pozolânica se desenvolva com o consumo do excesso de cal da escória; ou mesmo com escórias de alto forno, a fim de que a escória de aciaria atue como um ativador na hidratação da escória de alto forno, e aporte o superior uso de resíduos siderúrgicos.

Figura 34 - Principais substituições realizadas na produção de aglomerantes com EALD.

Fonte: Autoria própria.

3.3. A INFLUÊNCIA DA ESCÓRIA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Ao longo dos anos a literatura sobre o uso da escória de aciaria no concreto vem apontando inúmeros benefícios para esse emprego no que tange as propriedades mecânicas do concreto endurecido. Os ganhos de resistência mecânica estão principalmente ligados a morfologia irregular e angular das partículas dos agregados britados de escória e na textura superficial áspera, que resulta no intertravamento das partículas e na aderência com a matriz cimentícia. Apesar do extenso número de trabalhos voltados para avaliar a resistência mecânica do concreto com escória, o estudo de propriedades relacionadas a durabilidade é relativamente recente e limitado, e pouco se conhece sobre a ação da escória para evitar a deterioração do concreto.

3.3.1. O emprego de escória na produção de concreto

Os agregados naturais da indústria da construção civil são os insumos minerais mais explorados do mundo depois da água, ultrapassando milhões de toneladas anualmente em diversos países, e com projeção de consumo brasileiro superior a 800 milhões de toneladas em 2022 (YUNXIA et al., 2008; IBRAM, 2010; OWEN, 2017).

A demanda por agregados para a produção de concreto expande-se com o aumento da infraestrutura e mundialmente tem sido influenciada pelo rápido crescimento econômico na Ásia, fato demonstrado pelo elevado consumo de areia em países como a China, que consumiu mais areia entre 2013 a 2017 do que os Estados Unidos usaram em um século (OWEN, 2017).

Em muitos casos, o tipo adequado de agregado para uma dada aplicação é escasso ou inacessível em certas regiões ou mesmo em países. Para garantir a conservação dos agregados naturais e manter o equilíbrio ecológico, o estudo de agregados alternativos vem sendo intensificado. Neste contexto, os resíduos gerados pelas indústrias siderúrgicas são vistos como possíveis agregados alternativos para produção do concreto (PALANKAR et al, 2015; OWEN, 2017).

Segundo Motz e Geiseler (2001), as propriedades mais importantes apresentadas por agregados artificiais para o cumprimento eficiente frente ao desempenho exigido, correspondem a densidade aparente, a forma, a resistência à fragmentação, a absorção de água, a estabilidade volumétrica e a resistência à abrasão. Ao longo dos anos, estudos

têm sido realizados a fim de comparar o comportamento das escórias siderúrgicas ao de agregados como o calcário, cascalho, gábre e areia, destinando-as à produção de concreto, como demonstrado na Figura 35 (TAHA et al., 2014; YU et al, 2016; PALANKAR et al, 2015; LI et al., 2016; BRAND; ROESLER, 2015).

Quando submetida ao resfriamento lento, a escória de aciaria obtém uma estrutura cristalina, a qual se atribuem propriedades hidráulicas pobres. No entanto, gera-se uma estrutura altamente resistente à abrasão e de elevada dureza, forma na qual as escórias podem ser empregadas tanto como agregado graúdo, quanto miúdo (FARIA, 2007; PAN et al.; 2016; GEISELER, 1996).

Figura 35 - Escória de aciaria LD (à esquerda) e cascalho de granito natural (à direita).

Fonte: Li et al. (2016).

Na Tabela 11, são apresentadas algumas propriedades físicas e mecânicas da escória LD em comparação aos agregados naturais. Segundos os dados, a escória de aciaria LD apresenta resistência à abrasão superior à de agregados convencionais, verificado pelo inferior teor de material desagregado; assim como é observada uma diferença significativa entre a massa específica aparente dos agregados, pois valores elevados são encontrados para a escória em consequência do alto teor de ferro. Destaca-se também que a absorção de água dos agregados de escória é superior à dos agregados naturais, e quanto à forma, os agregados de escória de aciaria são altamente angulares, mas tendem à cubicidade, apresentando quantidades muito baixas de partículas alongadas.

Tabela 11 - Comparação entre algumas propriedades da escória de aciaria LD de agregados naturais.

Agregado	Massa específica aparente [g/cm³]	Absorção de H₂O [%]	Resistência à abrasão Los Angeles [%]	Fonte
EALD	3,1 - 3,7	0,2 – 1	9 - 18	Geiseler (1996)
Basalto	2,6 - 2,8	0,3 - 1,2	15 - 20	
EALD	3,3	1	22	Motz,
Granito	2,5	<0,5	12	Geiseler (2001)
Cascalho	2,6	<0,5	21	
EALD	3,2	1,9	12,9	Xie et al. (2013)
Calcário	2,6	0,9	-	
Basalto	2,7	0,3	17,1	
EALD	3,5	2,3	-	Brand, Roesler (2015)
Dolomita	2,8	1,8	-	
EALD	3,4	2	18	Palankar et al. (2015)
Granito	2,7	0,50	20	
EALD	3,2	2,4	12,7	Li, Q. et al. (2016)
Cascalho	2,7	0,5	20,8	
EALD	3,4	1 – 1,7	13,6	Xie et al. (2016)
Dolerito	2,8	0,3	14,8	
EALD	3,4	1,8	11	Chen, Wei (2016)
Calcário	2,6	1,1	25	
EALD fino	3,58	4,23	-	Pang et al. (2015)
Areia	2,56	3,9	-	
EALD graúdo	3,42	3,31	-	
Calcário	2,49	1,69	-	

Fonte: Autoria própria.

A utilização da escória como agregado apresenta vantagens relevantes, no âmbito econômico e ambiental, quando comparado à sua utilização na substituição do clínquer ou do cimento. O primeiro fator corresponde ao volume de material a ser empregado. Como os agregados correspondem a mais de 70% do volume do concreto, um teor superior de agregados de escória pode ser incorporado ao concreto. Bem como, na substituição do clínquer há a possibilidade de redução das propriedades mecânicas do concreto, caso o teor de clínquer seja bruscamente reduzido.

Outro fator significativo está no consumo de energia relacionado à moagem da escória até a granulometria do clínquer ou cimento, da ordem de 75 µm de diâmetro. A moagem é uma das etapas de maior consumo de energia na produção de cimento, neste processo, aproximadamente um terço da energia total consumida na produção de cimento é necessária para a obtenção de partículas na referida área específica (LI et al., 2016). De forma que, devido à baixa friabilidade da escória cristalina, levaria a redução do caráter de sustentabilidade do seu emprego ou a sua inviabilização econômica.

Estudos revelam que a utilização de agregados de escórias de aciaria pode ser satisfatória, uma vez que o desempenho do concreto com escória de aciaria quanto à resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à ruptura e módulo de elasticidade pode ser comparável ou ligeiramente superior ao concreto constituído por agregados convencionais (BRAND; ROESLER, 2015; YU et al., 2016; BODOR et al., 2016; PALANKAR et al., 2015; PANG et al., 2015).

Os agregados de escória de aciaria podem melhorar as propriedades mecânicas devido à alta angularidade de suas partículas e a textura áspera de sua superfície, o que gera um melhor intertravamento entre os agregados e a pasta de cimento. Por outro lado, se muito acentuadas, essas características podem interferir negativamente, reduzindo a trabalhabilidade das misturas de concreto com alto índice de substituição, uma vez que partículas muito angulares resultam na redução da mobilidade do concreto, assim como podem provocar segregação das partículas na mistura. Ademais, os custos de processamento são inferiores em comparação a utilização na produção de cimentos, devido à redução da exigência de energia consumida para uma moagem fina (BODOR et al., 2016; PALANKAR et al., 2015; BRAND; ROESLER, 2015; PANG et al., 2015).

A variação volumétrica pode ser o fator limitante para a utilização de agregados de escória de aciaria LD, pois traz um risco potencial quanto à quantidade de cal livre e óxido de magnésio livre, de grande relevância devido à sensibilidade à tensão de tração do cimento endurecido. Este risco pode ser eliminado ou reduzido ao permitir que os agregados sejam submetidos a intempéries por um período de cura suficiente para reduzir a cal e magnésia livres a limites admissíveis (TAHA et al., 2014; YU et al., 2016; PALANKAR et al., 2015).

Como visto anteriormente, de acordo com a aplicação e os requisitos exigidos, diferentes tratamentos podem ser realizados nas escórias, seja para elevar sua atividade

hidráulica ou obter estabilidade volumétrica. Para elevar a capacidade cimentante da escória, foram reportados processos que envolvem o aumento na taxa de resfriamento e alteração da composição química da escória de aciaria. Para a obtenção de baixo teor de cal livre nas escórias de aciaria LD, estudos têm demonstrado que a reação entre os óxidos da escória e CO_2 leva à formação de carbonatos estáveis através do processo de carbonatação, como o CaCO_3 , impedindo, assim, a formação de hidróxidos expansivos (PAN et al., 2016; BODOR et al., 2016).

A carbonatação em laboratório reproduz o processo natural de intemperismo, no qual o CO_2 reage com a escória, na presença de umidade para acelerar a reação em alguns minutos ou horas. Neste processo, serão formados carbonatos estáveis e insolúveis, sendo CaO e MgO os óxidos mais favoráveis a reagir com CO_2 . No entanto, não apenas CaO , MgO e Ca(OH)_2 , mas também outros compostos podem reagir, tais como os silicatos C_2S , para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e CaCO_3 ; e mesmo o silicato de cálcio hidratado, que ao reagir com CO_2 forma precipitados de CaCO_3 e um gel de sílica (BODOR et al., 2016; PAN et al., 2016; GHOULEH et al., 2017).

Fora a eliminação dos teores de óxidos expansíveis, após a reação de carbonatação, são observadas diferenças significativas nas propriedades físicas das escórias, que incluem a redução da densidade e do tamanho das partículas, a formação de estruturas de poros mais finas, com menor porosidade e mudanças na superfície e forma da partícula, que também ocorre devido à aglomeração, a formação de partículas mais grossas (BODOR et al., 2016; PAN et al., 2016; GHOULEH et al., 2017).

Pan et al. (2016) reportam que a escória de aciaria carbonatada pode ser usada como agregado miúdo, substituto de areia. Os cristais de CaCO_3 , formados na escória carbonatada, reduzem o conteúdo de CaO livre e podem aumentar a compacidade e a solidez da pasta de cimento por preencherem os vazios presentes, conferindo elevada resistência nas idades iniciais. Segundo Pang et al. (2015), a reação de carbonatação reduz o volume de vazios no agregado de escória, alterando a forma, a tortuosidade e outras propriedades internas dos poros; o que pode reduzir a sua taxa de absorção de água e elevar a impermeabilidade.

Bodor et al. (2016) empregaram o processo de carbonatação na escória de aciaria LD, e demonstraram a possibilidade de substituir 50% da areia natural em argamassas de cimento por agregados de escória de aciaria carbonatada, a partir da comparação das

propriedades mecânicas destas argamassas com uma argamassa contendo escória não carbonatadas e outra de cimento padrão (sem escória), como referência. O processo de carbonatação mostrou-se um excelente tratamento de estabilização da cal e da magnésia livres, em virtude da reação com CO_2 , os resultados de expansibilidade pelas agulhas de Le Chatelier mostram que a abertura obtida para argamassa com escória carbonatada é semelhante à de referência (próximo a 1 mm), no entanto para a argamassa com escória não carbonatada foi significativamente superior.

De acordo com os resultados, considerando a combinação dos parâmetros testados, tais como consistência, resistência à compressão e lixiviação de elementos tóxicos, o melhor efeito correspondeu a uma mistura preparada com escória carbonatada com partículas inferiores a 0,5 mm, em que a resistência à compressão se mostra superior à de referência. Entretanto, para este tamanho de partícula, a absorção de água foi superior para as escórias carbonatadas em comparação com as escórias não carbonatadas. Ademais, verificou-se que, com a carbonatação, a tendência de lixiviação de vários elementos é reduzida, majoritariamente para o bário, o níquel e o chumbo, enquanto permanece praticamente inalterada para o cromo e cobre, e aumenta para o vanádio (BODOR et al., 2016).

Pang et al. (2015) avaliaram o efeito da carbonatação na melhoria das propriedades de durabilidade e resistência mecânica das escórias LD, e compararam o desempenho do concreto composto por agregado graúdo de calcário, do concreto com agregado de escória de aciaria sem carbonatação e do concreto com agregado de escória de aciaria carbonatada. A resistência à compressão do agregado de escória após a carbonatação foi inferior em comparação à dos agregados de escória não carbonatados e naturais.

Os resultados mostraram que a trabalhabilidade não foi afetada, não havendo alterações significativas na consistência do concreto com agregados de escória carbonatados e não-carbonatados. A absorção de água do agregado de escória carbonatada foi superior aos demais, entretanto o tratamento de carbonatação reduziu o teor de CaO livre de 7% para menos de 1% (PANG et al., 2015).

No concreto, a resistência à compressão foi superior com a utilização de agregados de escória com e sem carbonatação. O uso de agregados carbonatados promoveu o aumento da resistência à compressão de 15 a 50% nas idades de 3, 7 e 28 dias de cura; a utilização de agregados não carbonatados teve efeito semelhante, no entanto,

apresentou uma ligeira redução aos 60 dias de cura devido, segundo os autores, ao alto teor de CaO e MgO livres que resultou em instabilidade volumétrica. Fato verificado pelo uso direto da escória como agregado, que provocou o rompimento do concreto em cerca de 48 horas de exposição à umidade e temperaturas elevadas. Por outro lado, no entanto, o concreto com agregado carbonatado não fissurou em cura a vapor mesmo após 240 horas (PANG et al., 2015).

No que tange o uso de escória de aciaria LD como agregados “in natura”, submetidos apenas ao envelhecimento, Taha et al. (2014) estudaram a viabilidade da utilização de escória de aciaria LD como substituto do agregado graúdo para o gábro, avaliando as propriedades mecânicas do concreto endurecido. Foram realizadas substituições de gábro equivalentes a 25, 50, 75 e 100%, em massa, por agregado de escória LD. Nos ensaios de resistência à compressão, à tração por compressão diametral e à flexão, em concretos contendo 100% de agregados de escória, os melhores resultados foram obtidos em comparação ao concreto de referência (com 100% gábro), em que se obtiveram os respectivos aumentos de 11%, 11% e 13%, aos 28 dias.

Segundo os autores, os resultados estão associados principalmente à textura áspera da superfície das partículas de escória e à morfologia fragmentada, capaz de conferir maiores resistências ao concreto melhorando, assim, a ligação entre os constituintes da pasta de cimento e os agregados.

Brand e Roesler (2015) avaliaram o efeito da substituição total do agregado graúdo de dolomita por agregados de escória de aciaria LD e aciaria elétrica, a fim de comparar os efeitos da substituição quanto à resistência mecânica, à retração por secagem e ao fator de durabilidade de gelo/degelo do concreto. O concreto com agregados de escória LD apresentou queda na resistência à compressão, enquanto com agregados de escória de aciaria elétrica foi equivalente à resistência do concreto de referência. Para a resistência à tração por compressão diametral, o resultado foi inferior com a presença de ambas as escórias. Do mesmo modo, a retração por secagem foi mais significativa com a substituição da dolomita.

No entanto, as propriedades de fratura do concreto com agregados de escória foram superiores, com melhorias de 39% no fator de intensidade de tensão crítica e de 22% na energia total de fratura. Assim como a durabilidade do concreto sob ciclos de gelo/degelo foi considerada adequada e superior aos limites normativos. Ainda segundo os autores, a

perda de resistência mecânica e o aumento da retração, provavelmente, foram resultados de uma fraca ligação entre agregados e pastas de cimento, originada pelas diferenças na distribuição granulométrica dos agregados empregados, bem como, na textura superficial das partículas, na angularidade e no módulo de elasticidade apresentado.

Palankar et al. (2015) utilizaram agregados graúdos de escória de aciaria LD para substituir os agregados de granito nas seguintes proporções 25, 50, 75 e 100%, em volume. O concreto fresco apresentou a redução da trabalhabilidade com o aumento do teor de escória nas misturas, devido à forma angular dos agregados que podem reduzir a mobilidade da matriz. Os autores verificaram que, devido à elevada densidade aparente da escória, os concretos passaram de 23,9 kN/m³, com granito, para 26,4 kN/m³ com 100% de substituição por escória.

A resistência à compressão aos 28 dias apresentou uma pequena redução com 25% de substituição, equivalente a 1,2% e 13%, com a substituição total dos agregados. Para o menor teor de substituição, a resistência à tração reduziu 4,6 % e 14,9 % com 100% de agregados de escória; a resistência à flexão reduziu 3% com a menor substituição e 12% com a total em comparação com o concreto de referência aos 28 dias de cura. Do mesmo modo, após 28 dias de cura, o módulo de elasticidade diminuiu 1,9 % e 11,8% com teores de substituição de 25 e 100%, respectivamente. Os autores acreditam que a perda da resistência com o aumento da substituição dos agregados no concreto ocorreu devido à presença de uma fina camada de calcita na superfície de agregados de escória, o que gerou uma fraca aderência na interface entre agregado e pasta, como mostra a Figura 36.

Figura 36 - Agregado de escória com o a presença de filme de calcita.

Fonte: Palankar et al. (2015).

Testes realizados para avaliar a absorção de água no concreto, de acordo com ASTM C642, mostraram que a escória de aciaria LD apresentou absorção de água superior em comparação com os agregados de granito, elevando, assim, a porosidade total do concreto aos 28 dias, e apenas no menor nível de substituição da escória (25%), os resultados se mantiveram próximos ao de referência (PALANKAR et al., 2015).

Rajan (2014) utilizou agregados de escória de aciaria para substituir areia em teores de 10, 20, 30, 40 e 50%, em massa, e avaliar de modo comparativo as propriedades mecânicas do concreto endurecido. A resistência à compressão do concreto foi elevada com a substituição da areia em todos os teores de escória de aciaria empregados, aos 28 dias o melhor resultado foi apresentado com teor de 30% de substituição que promoveu o aumento de 19% da resistência, ao passo que com a substituição de 50% o ganho foi de 10%. Os resultados de resistência à tração por compressão diametral mostraram que o melhor resultado também foi obtido com 30% de substituição, obtendo um ganho de 12%, aos 28 dias de cura. A resistência à flexão foi elevada com o aumento da porcentagem de escórias até 30% e teve perda de resistência com a substituição de 40 e 50% da areia, equivalente a 9 e 18%, respectivamente.

Quadir et al. (2016) substituíram 15, 25 e 35%, em massa, da areia no concreto por escória de aciaria LD e verificaram que a resistência à compressão do concreto foi elevada com o aumento do teor de escória nos três níveis de substituição. Com o emprego da escória, segundo as respectivas substituições 15; 25 e 35%, a resistência à compressão aumentou em 31%; 56% e 73% após 7 dias; e 38%, 63% e 75% após 28 dias de cura.

Com objetivos semelhantes, Avinash et al. (2014) estudaram a viabilidade de utilização das escórias de alto-forno e de aciaria LD como agregados alternativos à areia de rio na produção do concreto, com substituição de 100% em massa. Os autores verificaram que a substituição da areia alterou a consistência do concreto no estado plástico, elevando o resultado do *slump*. Com a substituição total do agregado miúdo, observou-se um aumento de 15% na resistência à compressão do concreto, aos 28 dias, com a utilização da escória de aciaria LD, enquanto concretos com escória de alto forno mantiveram-se na mesma faixa da referência.

Ravikumar et al. (2015) estudaram a substituição de 30, 60 e 100% do agregado graúdo de granito por escória de aciaria LD e verificaram que a resistência à compressão é elevada em até 6% com substituição máxima de 60%, enquanto a substituição completa

da escória de aço reduziu a resistência do concreto em comparação ao de referência. Os resultados da resistência à tração por compressão diametral revelam um aumento à medida que a porcentagem de substituição é acrescida, mas é reduzida para 100% de substituição. A resistência à flexão foi igualmente elevada com o aumento do teor de escória e obteve valor máximo com 60% de substituição, equivalente a um ganho de 16%.

Wang, Wang e Zhuang (2017) utilizaram cinco tipos de escória de aciaria, que infelizmente não foram classificadas quanto ao processo de origem, como adição mineral na produção de concreto. Foram realizadas substituições de cimento por escória de aciaria equivalentes a 40% e 60%, para a preparação de concretos com duas relações a/lig , 0,35 e 0,5 e cura de até 4 anos. Segundo Wang, Wang e Zhuang (2017), os teores de CaO e MgO nas escórias foram determinantes na resistência à compressão dos concretos. A resistência dos concretos com relação $a/lig=0,5$, contendo 40% de escória tiveram redução entre 27,9% a 39,4% aos 28 dias, enquanto com 60% de escória foi de 52% a 59,6%. Na idade de 1460 dias, as resistências dos concretos contendo 40% de escória são de 26,3% a 32,6% menores do que o concreto de referência, enquanto as resistências dos concretos contendo 60% de escória de aço são 36,9% a 47% mais baixas. Verificou-se, entretanto que algumas amostras de concreto não puderam ser ensaiadas após 360 dias devido a desintegração da amostra causadas por expansão volumétrica iniciada com 90 dias de hidratação (WANG; WANG; ZHUANG, 2017).

Para a relação $a/c=0,35$ os resultados de resistência à compressão dos concretos foram superiores comparados a $a/c=0,5$, no entanto, para os concretos com escória observou-se uma redução em função do aumento da substituição. Deve-se ainda ressaltar que mesmo com resistências mais altas, a partir de 730 dias, se deu o rompimento de alguns concretos devido à expansão. Este fenômeno ocorre porque a microestrutura do concreto com menor relação a/c é muito mais densa, o que pode aumentar significativamente a tensão interna decorrente da hidratação de componentes expansivos na escória de aciaria.

Como visto, diversos estudos foram conduzidos utilizando agregados de escória de aciaria LD no concreto, em vários níveis de substituição de agregados naturais, tais como calcário, cascalho, gábre e areia. O concreto endurecido teve o seu desempenho mecânico avaliado, principalmente, segundo o ensaio de resistência a compressão. Contudo, poucas foram as tentativas de avaliar a durabilidade e o caráter expansivo do concreto. Ademais,

muitos trabalhos consultados na literatura mesclam informações sobre diferentes tipos de escória (escória de alto forno e escória de aciaria), ou não especificam o tipo de escória de aciaria empregada, o que induz a uma comparação equivocada dos resultados, visto que tais materiais diferem nas características físicas, químicas e minerais apresentadas.

3.3.2. A influência da escória nas propriedades mecânicas

A resistência à compressão do concreto é considerada a propriedade mais importante a ser medida para caracterizar o comportamento mecânico do material, possivelmente, pois o concreto é usado principalmente para explorar a sua boa resistência à compressão (NEVILLE, BROOKS, 2010). A incorporação de escória ao concreto demonstra na maioria das vezes um acréscimo na resistência à compressão (TAHA et al., 2014; RAJAN, 2014; QUADIR et al., 2016; AVINASH et al., 2014; RAVIKUMAR et al., 2015; PANG et al., 2015; BODOR et al., 2016). Segundo os autores, este ganho é, sobretudo, justificado pelas propriedades físicas do agregado de escória, seja este miúdo ou graúdo.

Tais propriedades estão diretamente relacionadas ao processo de fragmentação da escória, como a morfologia irregular e angular das partículas dos agregados britados que em regra resulta no aumento do atrito entre os agregados e os constituintes da pasta de cimento, contribuindo com o intertravamento das partículas. Ressalta-se também a textura superficial áspera que confere maiores resistências, dado que agregados com elevada área superficial quando comparados aos agregados arredondados ou de superfície lisa, tem por efeito o incremento na aderência entre a matriz cimentícia e os agregados (BALBO, 2007; FERNANDES, 2005, NEVILLE, 2016; KOSMATKA; PANARESE; KERKHOFF, 2003; ALVES, 1993).

Outro fator pode ser significativo. Segundo Neville (2016), uma maior aderência também pode ser resultado de partículas porosas, em função da capacidade de penetração pasta de cimento hidratada nas partículas, fato que eleva a ligação entre ambos.

Visto que em alguns casos foi verificada uma elevada porosidade do agregado de escória este pode ser um fator que justifique o ganho na resistência mecânica, em concordância com o que foi concluído por Kambole et al. (2017), que ao estudarem o efeito do uso da escória de aciaria LD como agregado para concreto asfáltico, verificaram

que a absorção de água dos agregados de escória, eram um indicativo de uma superfície áspera das partículas de escória, que permite que o aglutinante asfáltico seja adequadamente absorvido pelo agregado, garantindo o desenvolvimento da espessura necessária do filme de asfalto para obter uma melhor aderência e um bom desempenho do pavimento, em comparação com os agregados menos absorventes.

No entanto, alguns déficits também são observados, e de acordo com os autores se dão tanto em virtude das características físicas do agregado quanto da composição da escória (BRAND, ROESLER, 2015; PANG et al., 2015; PALANKAR et al., 2015). Para os autores a queda da resistência está relacionada às diferenças na distribuição granulométrica dos agregados artificiais comparados aos naturais, fator que exerce grande influência no grau de empacotamento da mistura, podendo aumentar a proporção de vazios e a porosidade, consequentemente reduzir a resistência do material; e à angularidade das partículas, características do processo de fragmentação pelo qual são obtidas.

Os agregados britados, pelo próprio processo de fragmentação, apresentam uma alta tendência em exibir formas angulosas. O fato do material ser obtido por britagem infere em uma baixa esfericidade, o que dificulta a rolagem das partículas e o seu adensamento, e podem exigir mais água para alcançar uma dada trabalhabilidade.

De acordo com Castro (2007), pode-se compreender o efeito da forma dos agregados no concreto a partir do modelo idealizado de esferas, no qual os componentes sólidos do concreto se caracterizam como esferas circundadas por água. E quanto mais próximas da forma esférica as partículas de um agregado forem, mais trabalhável será o concreto, se consideradas constantes as demais características e materiais. No entanto partículas altamente arredondadas geram uma contribuição negativa na resistência mecânica do concreto, pois é reduzido o atrito entre os agregados e a pasta de cimento.

Deve-se ressaltar também que agregados com forma equidimensional são preferidos aos agregados com diferenças significativas entre suas dimensões, pois podem melhorar a trabalhabilidade do concreto, enquanto partículas que se diferenciam das equidimensionais podem empacotar-se de forma anisotrópica, formando vazios ou acúmulo de água (LUZ; ALMEIDA, 2012; NEVILLE; BROOKS, 2010).

Com menos assiduidade, o efeito do uso da escória na resistência à tração e no módulo de elasticidade são verificados. A resistência à tração pode-se mostrar sensível à

quantidade de cal livre e óxido de magnésio livre presentes na escória, devido a geração de fissuras no processo de hidratação, em função da sensibilidade à tensão de tração da pasta de cimento endurecido. Enquanto o módulo de elasticidade do concreto é amplamente afetado pelo módulo dos agregados constituintes do concreto e uma diferença significativa entre os módulos de elasticidade favorece o surgimento de microfissurações na interface agregado-matriz cimentícia (NEVILLE, 2016). Ademais, segundo Mehta e Monteiro (2006) o concreto não é um material elástico perfeito devido a sua estrutura heterogênea e multifásica, e ainda em função das características da zona de transição na interface.

No que se refere as escórias, um importante efeito do seu uso, está na sua maior porosidade em comparação com alguns agregados naturais, um fator intrínseco do material e considerado por Mehta e Monteiro (2006) um dos fatores mais importantes. A porosidade dos agregados no concreto é vista no módulo de elasticidade, isto é, no quanto o concreto resiste ao se deformar elasticamente, em razão da porosidade ser determinante na rigidez e controlar a capacidade do agregado em restringir a deformação da matriz cimentícia. Quando são realizados ensaios de absorção de água dos agregados, estes servem como uma indicação do número de vazios interconectados com um tamanho que permitirá que a água livre se mova para seu interior durante a imersão. Grande parte desta água é retida nos poros e vazios próximos a superfície das partículas fraturadas expostas a superfície. Quanto mais altos os valores de absorção de água, maior a probabilidade de que tal agregado seja fraco, não durável e suscetível a problemas com geadas em climas frios (KAMBOLE et al., 2017).

De tal modo, a microporosidade intrínseca ao material tem mérito tal qual a distribuição granulométrica dos grãos que gerarão a macroporosidade, no entanto, a macroporosidade tende a ser amenizada, visto que será preenchida pela pasta de cimento. Assim, ordinariamente, a alta porosidade de agregados de escória pode refletir no aumento da deformabilidade dos concretos quando submetidos a carregamentos, fato indesejável visto que os agregados comumente utilizados na dosagem dos concretos são mais resistentes e menos deformáveis que a pasta de cimento endurecida (NEVILLE, 2016; CHIOSSI, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

3.3.3. A influência da escória na durabilidade

Pouco pode-se afirmar sobre o efeito do emprego da escória de aciaria LD na durabilidade do concreto, algumas escassas pesquisas demonstraram que a durabilidade do concreto feito com agregados de escória seria comparável ou inferior aos concretos comuns. Entretanto, é amplamente conhecida a importância dos agregados no âmbito da fabricação de concretos duráveis e a necessidade do cumprimento de algumas exigências para que se evite a deterioração prematura do concreto. Isto posto, este tópico salienta aspectos da influência do agregado na estrutura porosa do concreto, bem como a estabilidade volumétrica e química do agregado, quanto a reações endógenas.

Em estudos com concreto contendo escória, a porosidade é um fator de extrema relevância pois quando comparado a agregados naturais a escória apresenta uma estrutura porosa e propensa a absorção de água (Tabela 11), o que interfere diretamente no transporte de gases, água e substâncias agressivas para o interior do concreto. Isso se dá, pois, a durabilidade do concreto está estritamente ligada à capacidade dos concretos em dificultar o transporte de agentes agressivos externos em seu sistema de poros (OLLIVIER; TORRENTI, 2014; CASCUDO, 1997).

Assim a absorção de água do concreto é uma importante medida realizada a fim de representar a forma como se dá a absorção de soluções líquidas constituídas de sais dissolvidos, capazes de contaminar o concreto (CASCUDO, 1997). Isto se faz necessário visto que o transporte de agentes agressivos será governado pela penetrabilidade da água, pois a difusão destes agentes se dará através da umidade presente no interior do concreto. Dado que a escória apresenta absorção de água superior à dos agregados naturais sua utilização conduz a ao aumento da absorção de água no concreto e, conseqüentemente, da porosidade total (PALANKAR et al., 2015; PALANKAR; SHANKAR; MITHUN, 2016; BODOR et al., 2016).

Ademais quando se trata de agregado miúdo, a presença em excesso de partículas de tamanho reduzido pode levar ao aumento da absorção física de água, resultando inicialmente na diminuição na consistência do concreto fresco e posteriormente no aumento da porosidade do material (PALANKAR et al., 2015; PALANKAR; SHANKAR; MITHUN, 2016; BODOR et al., 2016).

Concernente a manifestações patológicas diretamente relacionadas à porosidade aberta interconectada é de extrema relevância que se verifique a relação entre o emprego de escória LD no concreto e a penetração de agentes agressivos ao longo de sua vida útil, visto que se tratam de parâmetros importantes para avaliação da durabilidade do concreto, especificamente da penetração de íons cloreto e de carbonatação.

Não obstante, há uma ausência de pesquisas que contemplem o uso das técnicas de carbonatação acelerada e da migração de cloretos para tal finalidade, o que dificulta a dissertação sobre esta relação. À vista disso será apresentada uma breve análise de resultados obtidos em concretos com escória de aciaria elétrica, acerca dos fenômenos de carbonatação e migração de íons cloreto no concreto e da resistência gerada pelo uso da escória à estas manifestações, de modo que as tomando como referência serão utilizadas para investigar o efeito do uso da escória de aciaria LD.

Quanto ao uso da escória de aciaria elétrica como agregado, duas implicações na difusão de íons cloretos no concreto foram sinalizadas demonstrando que a resistência a penetração de íons cloreto pode ser aumentada. Primeiramente, aponta-se que sua presença pode proporcionar uma alteração na estrutura de poros que permite maior ou menor facilidade de deslocamento dos íons, pois tende a alterar as dimensões dos poros e a densificação da zona de transição devido à escória atuar como pontos de nucleação para os produtos de hidratação, contudo este efeito poderá ser positivo caso a presença da escória não eleve o consumo de água durante a mistura do concreto (ISMAIL et al., 2013; ARRIBAS et al., 2014; WANG; WANG; ZHUANG, 2017). A Figura 37 ilustra o aumento na profundidade de penetração dos íons cloro nos concretos com agregados de escória de aciaria elétrica (CEAF3 e CEAF4) após ciclos de imersão em solução cloretos, indicadas pela região esbranquiçada que contorna os corpos de prova, quando comparados ao concreto de referência CR. De acordo com Arribas et al. (2014), após 66 ciclos de imersão os concretos não excederam o limite de total de cloretos na massa de concreto inferior a 0,4% da massa de cimento. Após 108 ciclos, a penetração de cloretos em todos os concretos ultrapassou a profundidade de 35 mm. E finalmente, após 230 ciclos, tanto o CEAF4 quanto o CR extrapolaram a profundidade de 45 mm, enquanto o concreto CEAF3 não excedeu, apresentando qualidade superior aos demais. Este comportamento, entretanto, não foi justificado pelos autores.

Figura 37 - Seção transversal dos concretos evidenciando a profundidade da penetração de íons cloreto pela aspersão de nitrato de prata.

Fonte: Arribas et al. (2014).

O segundo ponto corresponde a redução de cloretos livres, em função da formação do cloroaluminato de cálcio devido a reação dos íons cloreto com os componentes da escória, que segundo a literatura é desencadeado pela presença das fases C_3A e C_4AF , esta última comumente encontrada na escória de aciaria LD, o que retardaria a migração de íons cloretos no concreto. No entanto não foram encontrados trabalhos que evidenciam a formação deste produto de reação quando avaliados concretos com incorporação de escória (ISMAIL et al., 2013; ARRIBAS et al., 2014; WANG; WANG; ZHUANG, 2017).

Segundo Jiang et al. (2018) quando o emprego da escória LD de dá em substituição ao cimento, verifica-se que a penetração de íons cloreto no concreto aumenta. Dado que para uma mesma relação água/cimento, a penetração de íons cloreto no concreto com escória teria sido superior ao concreto de referência apesar de sua resistência à compressão após 90 dias ser semelhante, sendo provável que a escória não apenas induziu ao aumento da porosidade, mas também elevou a conectividade dos poros.

Em termos de resistência à difusão de CO_2 , a profundidade de carbonatação pode aumentar com o incremento do teor de escória presente no concreto, devido ao aumento da porosidade no material, o que facilita o transporte do CO_2 por meio do sistema de poros da pasta de cimento, no entanto verificou-se que a relação água/ligante é um fator de maior relevância quando comparado ao fator teor de substituição da escória, de modo que para baixas relações água/ligante o teor de escória exerce pouca influência, pois a

manutenção de baixa porosidade capilar é garantida pela baixa relação água/cimento, conforme ilustrado na Figura 38 (FARIA, 2007; JIANG et al., 2018).

Figura 38 - Profundidade de carbonatação de concretos com a substituição de cimento por escória de aciaria LD.

Fonte: Jiang et al. (2018).

Apesar de pouco influente no Brasil, a resistência ao gelo/degelo é uma importante propriedade do concreto em países de invernos rigorosos. Devido aos ciclos de congelamento e degelo pode ocorrer o surgimento de fissuras e o lascamento do concreto causados pelo desenvolvimento de pressões internas, dada a expansão progressiva sofrida. No que tange os agregados, Luz e Almeida (2012) apontam que o congelamento da água absorvida pelo agregado e pela adsorção da água por fases higroscópicas do agregado provocam importantes variações volumétricas, gerando deteriorações estéticas no concreto como escamações pontuais e pipocamentos (Figura 39) ou severos comprometimentos estruturais como a fissuração generalizada e a desagregação em consideráveis profundidades (KOSMATKA; PANARESE; KERKHOFF, 2003; NEVILLE, 2016).

Em ciclos de gelo e degelo, a absorção de água pelo agregado pode ser tão elevada que impossibilite acomodar a expansão e a pressão hidráulica gerada inerentes do processo de congelamento da água (NEVILLE, 2016; KOSMATKA; PANARESE; KERKHOFF, 2003).

Figura 39 - Pipocamento na superfície de concreto devido à pressão interna em razão do congelamento da água absorvida pelo agregado.

Fonte: Kosmatka; Panarese; Kerkhoff (2003).

Brand e Roesler (2015) ao realizarem a substituição total do agregado graúdo de dolomita por agregados de escória de aciaria LD e aciaria elétrica, verificaram que a durabilidade do concreto com escória ao gelo/degelo foi considerada aceitável, com base no fator de durabilidade ser superior ao mínimo aceitável de 70% após 300 ciclos, em acordo com a norma americana AASHTO T161. Apesar do resultado ser considerado adequado, segundo os autores, o concreto com escória de aciaria LD apresentou uma perda de massa superior ao concreto com escória de aciaria elétrica, em razão de uma descamação superficial, provavelmente oriunda de um maior teor de CaO livre na escória de aciaria LD.

Quando se trata de variações térmicas, ciclos de molhagem e secagem, ciclos de gelo e degelo é uma exigência que o agregado possua estabilidade volumétrica, para que seja apto a resistir a grandes variações em função de alterações de caráter físico. Diferentemente da estabilidade volumétrica, a expansibilidade volumétrica é responsável por ganhos de volume originados com o desenvolvimento de reações químicas expansivas. Algumas dessas reações expansivas não se encaixam na afirmação de que a deterioração química do concreto se dá pela reação de agentes externos agressivos e constituintes do concreto. Neste caso, muitas ocorrem devido a própria composição química e mineral dos componentes do concreto e incluem as reações álcali-agregado, a hidratação tardia do CaO e MgO livres, e a formação da etringita tardia (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Alguns agregados podem apresentar certas quantidades de substâncias consideradas deletérias à durabilidade do concreto, não sendo apropriados mesmo

apresentando-se suficientemente resistentes ao desgaste, por terem em sua composição compostos químicos capazes de reagir quimicamente com a matriz cimentícia do concreto, podendo provocar significativas variações volumétricas na pasta e no agregado, afetar as reações de hidratação do cimento, reduzir a aderência entre a pasta e o agregado ou ser nocivos às armaduras de concretos armados (KOSMATKA; PANARESE; KERKHOFF, 2003; NEVILLE, 2016; NEVILLE; BROOKS, 2010).

Alguns agregados podem apresentar compostos capazes de reagir com os hidróxidos alcalinos (NaOH e KOH) da pasta de cimento, gerando expansões volumétricas significativas no concreto, criadas pelas reações álcali-agregado, compreendidas pelas reações denominadas de álcali-sílica, álcali-silicato e álcali-carbonato. Estas ocorrem quando estão presentes no agregado fases silicosas reativas (quartzo microcristalino, trimidita, cristobalita, opala, minerais feldspáticos, filossilicatos, tectossilicatos) ou cristais de dolomita com impurezas argilosas, no caso das reações álcali- carbonato (CARLES-GIBERGUES; HORNAIN, 2014) e no cimento elevados teores de álcalis.

Nas reações mais comuns, álcali-sílica e álcali-silicato, agregados constituídos de sílica amorfa, mal cristalizada ou microcristalina, são atacados pela solução intersticial dos poros do concreto. A sílica, liberada pelo ataque da solução, reage com os álcalis Na^+ e K^+ presentes nesta solução intersticial, dando origem a um gel sílico-alcalino ou um cálcio-sílico-alcalino, se contiver o cálcio, de modo que se verifica o fenômeno de expansão ocorrendo no interior do concreto (CARLES-GIBERGUES; HORNAIN, 2014). Assim, em decorrência destas reações o gel gerado apresentará composição dependente das impurezas e será responsável pela formação de redes de fissuras e pela perda de aderência entre a pasta e o agregado. A severidade das reações provocadas pelos agregados depende, além de sua reatividade, de sua dosagem e granulometria (KOSMATKA; PANARESE; KERKHOFF, 2003; NEVILLE, 2016).

Neste contexto, a composição mineral da escória de aciaria LD gera uma certa apreensão concernente às reações álcali-agregado. Dado que quanto à composição química, oriundos de pequenas impurezas do aço, os álcalis Na^+ e K^+ podem ser encontrados na escória em quantidades relativamente baixas, como visto na Tabela 4, dificilmente sendo uma fonte adicional de álcalis. A composição mineral da escória de aciaria LD é, por outro lado, formada por silicatos produzidos pelas impurezas removidas do aço, podendo apresentar-se de forma prioritariamente cristalina ou com algum

percentual de fase amorfa, em função do processo de resfriamento adotado, conforme apresentado na Tabela 9. Desta forma, o potencial expansivo de agregados de escória deve ser verificado quanto à possível reação com os álcalis do cimento, visto que estas reações se desenvolvem para agregados silicosos, constituídos de vidros ricos em sílica, mais ou menos devitrificados (CARLES-GIBERGUES; HORNAIN, 2014; YU et al., 2016).

Ozkan e Saribiyik (2013), estudaram a influência da escória de aciaria LD no desenvolvimento de reações álcali-silica e verificaram que, apesar da expansão percentual não exceder o limite normativo da ASTM C1260 na maioria das amostras, equivalente a 0,2%, o aumento no teor de escória conduziu a valores elevados de expansão. No entanto, de acordo com os autores, a razão para a alta expansão é justificada pelo teor de óxidos livres de MgO e CaO na escória de aciaria LD.

De modo semelhante, ao analisar a reatividade de escória de aciaria elétrica, Adegoloye et al. (2015) observaram que apesar da expansão volumétrica ter aumentado em função do acréscimo da fração de agregados de escória, não foi possível identificar a presença de fases vítreas que justificassem a reatividade álcali-agregado da escória. Sendo assim justificada pela expansão oriunda das reações de hidratação da cal livre ou do óxido de magnésio livre.

Arribas et al. (2014), no entanto, também ao estudar a reatividade de escórias de aciaria elétricas, observou que uma maior expansão na argamassa foi observada para um tipo de escória (MEAF4), a qual havia sido submetida a um processo rápido de resfriamento, obtendo um certo teor de fase vítrea e adquirindo, segundo os pesquisadores, uma certa reatividade alcalina; enquanto outra amostra de escória (MEAF3) resfriada lentamente e de alta cristalinidade apresentou uma estabilidade volumétrica superior, conforme Figura 40.

Não obstante aos fatos apresentados, os pesquisadores não conseguiram caracterizar a formação do gel característico das reações RAA, o que não exime a possibilidade de as escórias apresentarem apenas diferentes reatividades e facilidades do desenvolvimento das reações de hidratação do CaO e MgO.

Figura 40 - Variações de comprimento após testes de RAA.

Fonte: Arribas et al. (2014).

Quando se retrata a presença dos óxidos livres de CaO e MgO muita atenção deve ser dada, pois a expansibilidade volumétrica é um aspecto crucial quando se considera o uso da escória de aciaria LD como um agregado para a construção civil. Como discutido anteriormente, a escória de aciaria LD pode apresentar elevados teores de CaO livre, e a hidratação deste composto resulta em ganhos de volume significativos e, consequentemente, na geração de elevadas pressões internas e em danos ao concreto. O MgO livre é outro composto instável na escória, no entanto, seu efeito é menos discutido devido à sua lenta taxa de hidratação, quando comparada à cal livre.

Ainda que a expansão tenha um efeito significativo tanto nas propriedades mecânicas do concreto, quanto na durabilidade, pouco se têm de informações quanto a investigações de reações expansivas no concreto, sendo preferido o estudo voltado para a expansão do agregado (BRAND, ROESLER, 2015; DING et al., 2017; JIANG et al., 2018; PANG et al., 2015). A investigação da expansibilidade da escória na forma de agregados ocorre principalmente pelo método de imersão em água a temperatura elevada, prescrito na ASTM D4792, ou por ensaio em autoclave, ASTM C 1155.

Wang, Wang e Zhuang (2017) utilizaram cinco tipos de escória de aciaria com diferentes teores de CaO livre e MgO, Tabela 12, em dois teores de substituição parcial ao cimento 40 e 60 %, para a dosagens de concretos com relação a/lig, 0, 35 e 0,5 e cura de até 4 anos. Segundo Wang, Wang e Zhuang (2017) os teores de CaO e MgO nas escórias foram determinantes na resistência à compressão dos concretos.

Tabela 12 - Características das escórias utilizadas.

Escórias	A	B	C	D	E
CaO [%]	0.35	4.96	0.21	0.51	2.09
MgO [%]	7.68	3.46	6.54	5.98	5.15
Área superficial [kg/m ³]	453	461	472	442	516

Fonte: Wang; Wang; Zhuang (2017).

Esta pesquisa demonstrou que na maioria dos casos houve a redução da resistência a compressão dos concretos contendo escória, em relação ao referencial e principalmente que alguns concretos não puderam ser ensaiados após 360 dias devido a sua desintegração causada por expansão volumétrica iniciada com 90 dias de hidratação (WANG; WANG; ZHUANG, 2017). Em face destes resultados, os autores constataram que os piores efeitos foram observados para os concretos compostos por escória de aciaria com teor superior de CaO livre, sendo este o principal componente expansivo presente nas escórias. De modo que em escórias com baixo teor de CaO e elevado teor de MgO, a escória não causa danos ao concreto com a idade de 4 anos, mesmo após ensaio em autoclave permanecendo o seu comportamento semelhante ao do concreto de referência.

Ainda segundo os autores, foi possível verificar que o hidróxido de cálcio gerado pela hidratação do cimento apresenta uma morfologia diferente da do Ca(OH)_2 produzido na reação de hidratação de CaO livre, conforme exibido na Figura 41.

Figura 41 - Partícula do Ca(OH)_2 , oriundo da hidratação de CaO livre, analisado por MEV (EDS).

Fonte: Wang, Wang e Zhuang (2017).

A portlandita é uma das fases melhor cristalizada do cimento, com estrutura cristalina hexagonal, por outro lado pela reação de CaO livre, origina-se um emaranhado de componentes cristalinos com morfologia que se assemelham aos hexágonos da portlandita, não muito bem definidos, devido ao espaço restrito disponível para a cristalização desta fase.

Brand e Roesler (2015) a fim de verificar a substituição do agregado gráúdo de dolomita por escória de aciaria na produção de concreto, realizou um ensaio adaptado de teste de expansão em autoclave, no qual a amostra foi submetida ao vapor a 2,1 MPa e 216°C durante três horas, semelhante ao teste de autoclave ASTM C151.

Os testes realizados compararam a expansibilidade de agregados de escória de aciaria LD e escória de aciaria elétrica. De modo que a expansão apresentada por estas variou de 0,1% a 8,8%, com resultados mais altos oriundos da escória LD. Estes resultados foram relacionados aos teores de CaO e MgO livres presentes no material por análise de termogravimetria (TGA) pós-autoclavagem, com a análise verificou-se que o MgO livre apresentava-se em teores estimados em 2,2% e 0,2% para as escórias LD e aciaria elétrica, respectivamente. Ademais, o conteúdo de CaO livres foi de 3,4% e 0,1% para as escórias LD e de aciaria elétrica, respectivamente (BRAND, ROESLER, 2015).

Ding et al. (2017) submeteram agregados de dois grupos diferentes de escória de aciaria LD ao teste de expansão especificado na ASTM D4792. A escória SA apresentava 8.7% de CaO livre, enquanto a escória SB, 12.2%; e expansão equivalente a 4,7% e 5,4%, para as escórias SA e SB, respectivamente. A fim de estabilizar a cal livre presente na escória, foi adicionado ácido oxálico, em diferentes concentrações, a uma pasta de escória e água, para que se forma-se o oxalato de cálcio ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \beta\text{H}_2\text{O}$). Dentre os benefícios apontados pelos autores estão a redução da expansibilidade e a redução da porosidade capilar do material cimentício devido a precipitação deste sal, conforme é exibido na Figura 42, após o teste de expansão em argamassas.

Figura 42 - Resultado do teste de expansão após 4 dias de cura a 90°C.

Fonte: Ding et al. (2017).

Palankar, Shankar e Mithun (2016) utilizaram a escória de aciaria LD como agregado graúdo na produção de concreto, e verificaram que a expansão da escória trouxe sérios problemas devido a formação de fissuras no concreto. A Figura 43 evidenciam a deterioração do concreto após 120 dias de cura, em meio ácido.

Figura 43 - Expansão volumétrica dos agregados de escória de aciaria LD no concreto.

Fonte: Palankar, Shankar e Mithun (2016).

As Figuras 43 (a) e (b) evidenciam o “pipocamento” do agregado na superfície do concreto devido à pressão interna exercida quando se deu a expansão dos agregados de

escória. Nas 43 (c) e (d) é exibida a exposição do agregado após a perda de cobertura superficial juntamente com a formação de uma camada branca na superfície do agregado, resultado da reação com o CO_2 do ambiente, originado a uma fina camada de calcita.

A comparação entre o concreto com agregado natural de granito e o concreto com escória demonstrou juntamente com o efeito do ataque em meio ácido, o concreto exibiu a formação de fissuras em sua superfície à expansão dos agregados de escória, bem como a formação de uma película branca na superfície dos agregados, conforme apresentado na Figura 44.

Figura 44 - A deterioração do concreto com agregado natural (à direita) e com agregado de escória de aciaria LD, após 120 dias de cura em meio ácido.

Fonte: Palankar, Shankar e Mithun (2016).

Pang et al. (2015) investigaram a possibilidade de utilizar o agregado graúdo carbonatado de escória de aciaria LD a fim de substituir o agregado de calcário e o agregado de escória LD sem carbonatação. A eficiência desta substituição teve como um dos parâmetros adotados a avaliação da estabilidade volumétrica do concreto, para a qual diferentes metodologias foram empregadas pelos pesquisadores.

Um dos métodos apresentados consistiu na cura de barras de argamassa contendo agregado miúdo de escória LD carbonatada (CSA), escória sem carbonatação (SSA) e calcário (NA), a 100°C e com umidade relativa em 100%. Conforme exibidos na Figura 45, dentre as amostras contendo escória LD sem carbonatação, logo após 24 h de cura a quente uma das barras fraturou devido a expansibilidade e todas as demais se

mantiveram inteiras, enquanto após 120 h todas as barras de argamassa contendo escória LD sem carbonatação foram completamente destruídas e apresentaram expansão correspondente a 0,12%. Segundo os autores, as barras compostas de agregado natural apresentaram retração de 0,02% e de escória carbonatada, expansão de 0,02%.

Figura 45 - Ensaio de expansão de barras de argamassa após 24 h, à direita, e 120 h de cura, à esquerda.

Fonte: Pang et al. (2015).

Para avaliar o efeito da expansão no concreto, foram moldados cubos de pasta de 2 cm³ preenchidos com agregado graúdo de escória CSA, escória SSA e de calcário. A expansão das amostras foi avaliada pela ação do vapor d'água, em ambiente controlado de T=100°C e UR=100%. Foi verificado que o tratamento de carbonatação reduziu significativamente a taxa de expansão da escória, conforme verificado na Figura 46 (a) após 48 h de exposição e (b) após 240h.

Figura 46 - (A) Resultado da expansão após 48 h e (b) após 240 h de cura.

Fonte: Pang et al. (2015).

Foi observado que após 48 h de cura em elevadas temperatura o agregado de escória sem carbonatação causou sérios danos ao concreto e provocou a desintegração

total do elemento de concreto após 240 h. Fato que segundo os autores demonstrou que o uso direto da escória LD como agregado no concreto poderia trazer sérios danos relacionados a sua estabilidade.

Kambole et al. (2017) verificaram que quando exposta a ambientes úmidos, como em estradas, o CaO livre e periclásio presente na escória de aciaria LD tendem a reagir com a água, o que para certas aplicações, tais como estradas não pavimentadas, não implicam em restrições de uso devido a estabilidade volumétrica do agregado. No entanto, quando a escória é usada em camadas de estradas não ligadas (base e sub-base), a estabilidade deve estar dentro de limites aceitáveis que variam de acordo com as normativas vigentes nos diferentes países.

Entretanto, os autores determinam que para o uso em camadas não ligadas, podem ser empregadas escórias de aciaria LD com teor de cal livre de até 7%, já para o uso em revestimento asfáltico (concreto betuminoso), as escórias podem apresentar até 4% cal livre. Para este último emprego, verificou-se que em certos casos uma película de betume é formada como um revestimento sobre o agregado de escória de aciaria, fato que evita a reação de hidratação e assim limita o seu potencial de expansão. Segundo os autores, discutia-se que a expansão poderia também ser evitada pelo emprego de partícula de escória com granulometria inferior a 13,2 mm em camadas de pavimento com mistura asfáltica. No entanto, segundos os autores, resultados diferentes foram obtidos em estudos realizados na África do Sul, indicando que, mesmo quando usada no asfalto, a reação de hidratação pode ocorrer e levar a problemas como a fissuração local e a eflorescência do sal, conforme exibido na Figura 47.

Figura 47 - Danos causados a superfície do concreto asfáltico devido a hidratação da escória de aciaria LD.

Fonte: Kambole et al. (2017).

Deve-se ter em mente que além da perda de resistência mecânica, a expansão de agregados de escória leva a fissuração e a alteração da cinética dos processos de transporte de agentes agressivos do meio externo para o interior do concreto. Quando se trata da ação dos agentes de corrosão, por carbonatação ou penetração de íons cloreto, verifica-se que uma fissura acelera a penetração dos agentes agressivos ao nível da fissura, quanto a abertura e profundidade, assim como em zonas vizinhas a ela devido a microfissuração no seu entorno, tornando mais rápida a degradação do material.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico são inicialmente apresentados os métodos empregados para a caracterização da escória quanto as suas características físicas, químicas e quanto ao seu uso como um agregado. Seguidos dos métodos para a caracterização do concreto no estado fresco, para o comportamento mecânico do concreto no estado endurecido e os ensaios de durabilidade realizados, conforme resumidamente apresentado na Figura 48.

Figura 48 - Fluxograma do plano experimental resumido.

Fonte: Autoria própria.

4.1. VARIÁVEIS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1.1. Variável independente

Para que fosse avaliada a influência da escória de aciaria LD nas propriedades do concreto o procedimento experimental foi estruturado pela variação do teor de

substituição parcial do agregado miúdo por escória nas seguintes proporções: 0%; 25%; 50% e 75% em massa.

4.1.2. Condições fixas

A fim de reduzir as influências nos resultados foram fixadas algumas condições para a execução do programa experimental, como se descrevem a seguir.

- I. Relação água/aglomerante: 0,54.
- II. Tipo de cura: Após 24 h da moldagem, todos os corpos de prova foram acondicionados em câmara úmida, com temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar acima de 95%, e permaneceram na câmara de cura até a data de execução de ensaio, conforme NBR 5738.
- III. Resistência à compressão: os concretos estudados foram produzidos de modo que pertencessem a uma mesma faixa de resistência, com f_{ck} (resistência característica do concreto à compressão) equivalente a 30 MPa aos 28 dias de cura.

Apesar de não terem sido realizadas alterações nas dosagens para a manutenção do abatimento dos concretos estudados, estes foram produzidos com o intuito de obter abatimento de (120 ± 20) mm, para que apresentassem maior fluidez e se caracterizassem como um concreto bombeável. Tais alterações foram evitadas a fim de que não fosse introduzida uma nova variável ao sistema, como por exemplo o aumento do teor de aditivo.

4.2. MATERIAIS CONSTITUINTES E CONCRETO

4.2.1. Escória de aciaria LD

A escória de aciaria foi coletada nos pátios de cura e envelhecimento da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) – Volta Redonda, num total de cerca de 250 kg de escória de aciaria LD. Todo o material recebido foi inicialmente seco em estufa a 100°C por 24 horas, a fim de eliminar a água absorvida durante o processo de envelhecimento no pátio à céu aberto da CSN.

Para a obtenção de um material homogêneo e que atendesse às exigências estabelecidas pela ABNT NBR 7211 quanto às dimensões do agregado miúdo, a escória foi submetida ao peneiramento para a separação de partículas superiores a 4,75 mm, Figura 49. A fragmentação dos agregados retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm foi realizada em um britador de mandíbulas, seguida de moagem, em moinho de rolo, até que todo o produto de moagem apresentasse dimensões características de agregado miúdo.

Figura 49 - À esquerda, escória amostrada e subsequente separação de partículas superiores a 4,75 mm e a britagem dos agregados.

Fonte: Autoria própria.

Foram obtidos 220 kg de agregados miúdo de escória de aciaria LD; o material foi homogeneizado e acondicionado em bombonas para o transporte até a Universidade Federal de Goiás, conforme apresentado na Figura 50. Todo o processo de secagem, classificação granulométrica, britagem, homogeneização e acondicionamento em bombonas foi realizado no Centro de Pesquisa da CSN.

Figura 50 - (A) Escória com dimensões características de agregado miúdo; (B) quarteamento da escória e (C) escórias acondicionadas e prontas para uso.

Fonte: Autoria própria.

4.2.2. Agregados naturais

Foram utilizados como agregado miúdo a areia quartzosa de origem natural de leito de rio e agregado graúdo de granito, doados por Furnas Eletrobrás. Todos os ensaios de caracterização estão exibidos no item 5.2.1 e 5.2.2.

4.2.3. Cimento Portland

Para a composição do concreto foi utilizado o cimento Portland do tipo CPV-ARI, Votorantim, que corresponde a um cimento de alta resistência nas idades iniciais, obtido por uma moagem mais fina e sem emprego de adições minerais ou pozolânicas. De tal modo, por não conter adições minerais, tende a não inibir possíveis reações álcali-agregado provocadas pelo uso da escória, um dos objetivos de estudo deste procedimento experimental. Os resultados dos ensaios de caracterização são exibidos no item 5.2.4.

4.2.4. Aditivo plastificante

Em todos os concretos usou-se o aditivo plastificante líquido de pega normal, chamado comercialmente de Sikament RM 320, fornecido pela Sika S.A. O aditivo foi adicionado em 0,8 % da massa do cimento a fim de reduzir a quantidade de água necessária para atingir a consistência requerida para o vertimento. As características deste aditivo, fornecidas pelo fabricante, estão na Tabela 13.

Tabela 13 - Características do aditivo plastificante.

Característica	Valor
Composição	Melamina formaldeído
Aspecto/cor	Líquido/Castanho escuro
Massa específica	1,16 g/cm ³
pH	10,3

Fonte: Autoria própria.

4.2.5. Concreto

O traço do concreto foi obtido pelo emprego do método Módulo de Finura realizado no Laboratório de Concreto de FURNAS-GO. A dosagem dos concretos foi realizada em três estágios:

- I. Estudo de dosagem para a definição do traço de referência, considerando os parâmetros estabelecidos como condições fixas do concreto, tais como a dimensão máxima característica ($D_{m\acute{a}x}$) do agregado graúdo de 25 mm, relação água cimento de 0,54, a resistência à compressão de f_{ck} de 30MPa e f_{cj} (resistência média do concreto à compressão) de 36,6MPa, aos 28 dias, e abatimento do tronco de cone igual a 120 mm. Pelo método de dosagem adotado, estabeleceu-se que a relação (cimento + areia)/(cimento + agregado total), designada por "k" foi mantida constante e equivalente 0,49. (O procedimento foi disponibilizado no APÊNDICE A.)
- II. Dosagem dos concretos de referência e com a substituição da areia por escória de aciaria LD, em 25%, 50% e 75%, em massa.
- III. Dosagem dos concretos de referência e com a substituição de 25% e 50% de areia, em massa, escolhidos como composições a mais eficientes.

A nomenclatura utilizada para identificação dos concretos foi adotada referenciando a quantidade de resíduo utilizada em substituição da areia, de modo que o percentual de substituição em massa está apresentado após a nomenclatura E, originária de escória, enquanto o concreto de referência foi denominado CR. Os parâmetros de dosagem são exibidos na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros de dosagem dos concretos.

Tipo de concreto		CR	CE25	CE50	CE75
Traço em peso – 1:m		6,47	6,47	6,47	6,47
Dados da composição	Cimento (kg/m ³)	299	303	305	309
	Água (kg/m ³)	162	164	165	167
	Areia natural (kg/m ³)	754	574	384	195
	Areia artificial (kg/m ³)	-	191	384	586
	Brita (kg/m ³)	1180	1197	1203	1222
	Aditivo (%)	0,8	0,8	0,8	0,8
	Relação a/c	0,54	0,54	0,54	0,54
	Módulo de Finura	5,26	5,33	5,40	5,47
	% de areia em massa	39	39	39	39
	% de areia em volume	39,4	39,4	39,4	39,4
Propriedades do concreto fresco	Abatimento (mm)	120	120	90	55
	Ar incorporado (%)	2,12	1,37	1,72	1,31
	Massa unitária (kg/m ³)	2397	2432	2441	2480

Fonte: Autoria própria.

4.3. MÉTODOS EMPREGADOS

Neste tópico são inicialmente apresentados os métodos empregados para a caracterização da escória quanto às suas características físicas, químicas e quanto ao seu uso como um agregado. Seguidos dos métodos para a caracterização do concreto no estado fresco, para o comportamento mecânico do concreto no estado endurecido e os ensaios de durabilidade realizados.

4.3.1. Caracterização da escória de aciaria LD

4.3.1.1. Análise química

Para a caracterização da escória de aciaria LD, foi realizada a análise química semi-quantitativa a partir da técnica de espectrometria de fluorescência de raios X, realizada, em equipamento Axios MAX, marca PANalytical, para a qual a amostra foi preparada por prensagem com ácido bórico. A análise foi realizada no laboratório de Fluorescência da EEL USP – Lorena.

A análise de cal livre foi realizada de acordo com a ABNT NBR 7227 – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol, utilizando o método de extração por etilenoglicol e titulação com NaOH, realizada nos laboratórios da CSN Cimentos.

4.3.1.2. Análise de fases mineralógicas

A análise mineralógica da escória foi realizada em difratômetro Bruker- D8, com radiação $\text{CuK}\alpha$, tensão de 40 kV e 40 mA, equipado com detector marca Dectris, modelo Pilatus 3R 100K-A, no intervalo angular de 5 a 70°, passo de 0,005°, com tempo/ passo de 0,6 segundos, em Furnas-GO. A quantificação pelo método de Rietveld foi realizada utilizando o software TOPAS® Versão 4.2.

4.3.1.3. Análise morfológica

Para a análise morfológica das partículas de escória foram obtidas imagens geradas por elétrons secundários, utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura. As partículas de escória foram fixadas sobre fita de carbono e metalizadas por deposição de ouro. Foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura, MEV-Hitachi, modelo TM 3000,

com filamento de tungstênio e tensão de 20 kV, no laboratório de Microscopia Eletrônica, EEL USP – Lorena.

As análises em microsonda eletrônica foram realizadas no CRTI - Centro Regional para o desenvolvimento Tecnológico e Inovação, da Universidade Federal de Goiás - UFG. Foi utilizada uma microsonda eletrônica JEOL JXA-8230, acoplada com cinco detectores WDS JEOL, e um detector EDS, para a realização da quantificação química pontual das fases presentes em amostras com distribuição dos grãos entre 500 - 250 μm . As condições de análise foram: 15 kV de aceleração de voltagem, 10 nA de corrente e 1 μm de diâmetro dos feixes de elétrons. Os tempos de contagem para todos os elementos foi de 10 segundos no pico e de 5 ou 10 segundos no background.

4.3.2. Caracterização da escória como agregado miúdo

De acordo com a NBR 7211, o agregado miúdo é composto por grãos passantes pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e retidos na peneira com abertura de malha de 150 μm . O ensaio de distribuição granulométrica da escória foi realizado segundo a NBR NM 248, pela utilização de peneiras de série normal (ABNT Nº 100, 50, 30, 16, 8 e 4). O resultado da análise granulométrica permitiu que se realizassem os cálculos da dimensão máxima característica e do módulo de finura do agregado, e obtivesse a curva granulométrica.

Para possibilitar a avaliação do comportamento da escória como agregado miúdo foram realizados ensaios de absorção de água, na condição saturados superfície seca (NBR NM 30), massa aparente (NBR NM 52), os ensaios de resistência ao desgaste superficial dos grãos de agregado de escória, a partir da resistência a abrasão Los Angeles (NBR 12042).

A fim de comparar a absorvidade da escória e da areia natural foi realizado o ensaio de porosimetria de adsorção-desorção gasosa, com nitrogênio gasoso, em equipamento Autosorb-iQ, da marca Quatachrome Instrument. A análise baseia-se na condensação de nitrogênio gasoso nos poros do material, o que permite alcançar informações sobre o volume destes poros a partir da quantidade de gás requerida. Assim foram obtidos os parâmetros de volume de poros, raio médio de poros e superfície específica.

O potencial de reatividade álcali-agregado, segundo a NBR 15577-4 – Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, para o qual foram moldadas 4 barras de argamassa a fim de avaliar a reatividade de agregados frente a uma solução alcalina de hidróxido de sódio, acompanhando as expansões dimensionais das barras de argamassa por relógio digital. Todas as análises citadas anteriormente foram realizadas nos laboratórios de Furnas.

4.3.3. Caracterização do Concreto

Os métodos de avaliação do concreto quanto às suas propriedades no estado fresco, por meio de caracterização reológica, e no endurecido, por meio de suas propriedades mecânicas, foram realizados no Centro Tecnológico Civil de Furnas Centrais Elétricas AS – Aparecida de Goiânia (GO). Enquanto, os ensaios de durabilidade foram realizados no Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil (LABITECC - UFG).

Pode-se dizer que a caracterização do concreto foi realizada em duas grandes etapas. Inicialmente pela determinação da consistência e resistência mecânica das composições CR, CE25, CE50 e CE75, conforme programa experimental sumarizado na Tabela 15.

Tabela 15 - Resumo de ensaios mecânicos, idades e corpos-de-prova dos concretos CR, CE25, CE50 e CE75.

Propriedade analisada	Tempo de cura [dias]	Corpos de prova	
		Quantidade por dosagem	Dimensões [mm]
Resistência à compressão	28 e 91	3	Cilíndrico 100 x 200
Resistência à tração	28 e 91	3	Cilíndrico 100 x 200
Módulo de elasticidade	28 e 91	3	Cilíndrico 100 x 200

Fonte: Autoria própria.

Seguidos pela caracterização dos concretos da segunda dosagem, CR; CE25 e CE50, avaliados quanto a resistividade elétrica, velocidade de propagação de ultrassom, absorção de água, carbonatação, migração de cloretos e ensaios de envelhecimento do concreto, conforme programa experimental sumarizado na Tabela 16.

Tabela 16 - Resumo de ensaios de durabilidade, idades e corpos-de-prova dos concretos CR, CE25 e CE50.

Propriedade analisada	Idade [dias]	Corpos de prova		
		Quantidade/ dosagem	Forma	Dimensões [mm]
Resistividade elétrica	7, 14, 28 e 91	3	Cilíndrico	100 x 200
Velocidade da onda ultrassônica	7, 14, 28 e 91	3	Cilíndrico	100 x 200
Absorção de água e índice de vazios	28 e 91	3	Cilíndrico	100 x 200
Migração de cloretos	91	2	Cilíndrico	100 x 200
Envelhecimento natural	28	3	Barra prismática	40 x 40 x 160
Envelhecimento acelerado	28	3	Barra prismática	25 x 25 x 285
Envelhecimento cíclico	28	3	Barra prismática	40 x 40 x 160

Fonte: Autoria própria.

4.3.3.1. Determinação da consistência

As propriedades do concreto no estado fresco foram avaliadas conforme NBR NM 67 – Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. De modo a identificar o teor máximo de substituição que não geraria perdas na trabalhabilidade do concreto no estado fresco, o que diz respeito à facilidade e à homogeneidade com que o material pode ser misturado, lançado, adensado e acabado, sem perder sua estabilidade e resistindo à segregação dos materiais que o compõem.

4.3.3.2. Caracterização reológica do concreto fresco

O comportamento reológico do concreto no estado fresco foi avaliado por ensaios de reometria, para o qual, foi utilizado um reômetro tipo planetário, modelo SCI-R,

fabricado pela Siranda de Projetos e Tecnologia Ltda, Figura 51. Para tal, o material analisado foi depositado em uma cuba metálica e, em seguida, uma pá foi verticalmente inserida.

Figura 51 - Reômetro utilizado tipo planetário.

Fonte: Autoria própria.

Inicialmente, foi aplicado um ciclo de cisalhamento, variando a velocidade de rotação de 55 a 800 rpm e retornando a 55 rpm, trabalhando em dois ciclos de “subida e descida”. Os valores de torque são obtidos como resposta de resistência à rotação, ou seja, é medida a força necessária para manter a pá se movendo sob uma determinada velocidade de rotação, fornecendo, assim, informações sobre a variação da trabalhabilidade em função do tempo nas misturas de concreto em estudo.

4.3.3.3. Resistência mecânica

As misturas de concreto foram ensaiadas com base nas normas NBR 5738 Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova e NBR 5739 Concreto: Determinação da Resistência à Compressão.

O desempenho mecânico dos concretos foi também avaliado quanto à resistência à tração, de acordo com a NBR 7222 Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova, e quanto ao módulo de elasticidade, conforme NBR 8522 – Concreto: Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão, utilizando corpos de prova cilíndricos e extensômetros elétricos do tipo LVDT (Linear Variation Displacement Transducer). Inicialmente, foram efetuados dois carregamentos, seguidos de descarregamentos, até 40% da tensão de

ruptura a fim de acomodar os medidores. Em seguida, o corpo de prova foi submetido ao carregamento de ensaio mediante a aplicação de cargas sucessivas para a medição das deformações correspondentes.

Para todos os ensaios supracitados deste item 4.3.3.3 o equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica motorizada, modelo DL 100T, marca pela Emic, com capacidade de 1000 kN. As faces dos corpos de prova foram regularizadas por meio de retífica automática com refrigeração a água.

O teor de substituição mais eficiente foi definido, principalmente, com base nos resultados destes três ensaios, a partir dos quais foi considerada mais eficiente a mistura que apresentou tanto melhor comportamento mecânico quanto que manteve a sua consistência no estado fresco. O concreto com esta composição foi avaliado pelos métodos seguintes.

4.3.3.4. Resistividade elétrica superficial

A resistividade elétrica do concreto foi avaliada segundo a ASTM G57 – “Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method”, utilizando o equipamento de laboratório para a medida direta da resistividade elétrica superficial Resi, marca PROCEQ S.A, adequado para aferir variações de resistividade entre 0 - 99 k Ω .cm $\pm$ 1 k Ω .cm; com emprego de corrente de 180 μ A, frequência de 72 Hz e impedância de 10 M Ω . As medidas foram realizadas nos corpos de prova, na condição saturada logo após a remoção destes da câmara úmida em Furnas, ao posicionar sobre o concreto o conjunto de quatro eletrodos, com espaçamento fixo de 5,0 cm entre eles, em posição longitudinal.

4.3.3.5. Determinação da absorção de água por imersão

A durabilidade do concreto foi avaliada pelo ensaio de absorção conforme NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, no qual as quantificações são realizadas através de imersão do corpo de prova em água até saturação, seguido pela sua pesagem em balança hidrostática, realizadas nos laboratórios de Furnas.

4.3.3.6. Velocidade de propagação da onda ultrassônica

O ensaio de ultrassom consistiu na medição do tempo de propagação de ondas ultrassônicas em elementos de concreto, no qual o seu comprimento correspondeu à distância entre o emissor e receptor. Para tal, a obtenção da velocidade de pulsos ultrassônicos do concreto se deu pelo emprego do método de transmissão direta, que consiste na aplicação de duas sondas alinhadas sobre faces opostas do elemento de concreto, conforme descrito na NBR 8802 (ABNT, 2013).

As medidas foram obtidas utilizando o equipamento de ultrassom modelo Pundit Lad+, fabricado pela Proceq, com transdutores de 54 kHz, duração do pulso determinada nas configurações do equipamento equivalente a 9,3 μ s e amplitude do pulso, igual a 500 V. Para a realização das medidas, as faces dos elementos de concreto foram limpas e a fim de evitar a ocorrência de ar entre a sonda e a superfície do concreto, sobre as faces foi aplicado gel condutor para ultrassom. Obtendo-se como resposta de medição, tanto o tempo de propagação, quanto a velocidade de propagação dos impulsos. Os ensaios foram realizados em Furnas.

4.3.3.7. Carbonatação acelerada

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado com base na ISO 1920-12 - Testing of concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete- Accelerated carbonation method, no qual uma amostra de concreto é exposta a uma concentração de CO₂ superior à presente na atmosfera, a partir da introdução do gás em uma câmara de carbonatação, com temperatura e umidade relativa controladas.

Neste ensaio, realizado no laboratório de durabilidade de Furnas, foram utilizados corpos de prova com dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, curados por 91 dias. Após o período de cura, os corpos de prova foram submetidos a pré-condicionamento durante 21 dias no interior da câmara de carbonatação, sem o fornecimento de CO₂, a fim de obter a estabilização da umidade no interior do concreto, conforme Figura 52.

Figura 52 - Pré-condicionamento dos concretos em câmara de carbonatação (à esquerda) e corpos de prova selados com tinta (à direita).

Fonte: Autoria própria.

Para tal, foi utilizada uma câmara de carbonatação da marca Caron, modelo 6034-1, com controles de temperatura, umidade relativa e concentração de gás carbônico. De modo que o pré-condicionamento foi executado utilizando as condições de umidade relativa e temperatura idênticas às posteriormente empregadas no ensaio de carbonatação acelerada, equivalente à temperatura de 24°C e umidade relativa 65%.

Posteriormente a esta etapa, os corpos de prova tiveram as suas faces seladas (Figura 52) utilizando tinta spray a fim de impedir a carbonatação multidirecional e a penetração do dióxido de carbono em apenas uma direção no interior do concreto. Deu-se então efetivamente início ao processo de indução da carbonatação acelerada, no qual os corpos de prova foram dispostos no interior da câmara de carbonatação e expostos à ação do CO₂ sob as seguintes condições: concentração de CO₂ equivalente a 3,5%; 65% de umidade relativa e temperatura de 24°C.

O ensaio de carbonatação acelerada foi conduzido pelo período de 28 dias, de modo que nas idades de 7, 14 e 28 dias foram cortadas fatias de concreto, com dimensões de 10 de diâmetro e 6,5 cm de altura, nas quais foram realizadas medidas da profundidade de carbonatação, conforme esquema apresentado na Figura 53.

Figura 53 - Esquema ilustrativo do procedimento de corte da carbonatação do concreto.

Fonte: Autoria própria.

4.3.3.8. Análise da solução do poro

A análise da solução do poro dos concretos foi realizada a fim de respaldar a discussão acerca da condutividade do concreto com a substituição da areia por escória, bem como dos fenômenos observados após o ensaio de carbonatação acelerada.

Para tal, foi empregada a técnica denominada “Método do pó em suspensão”, que consistiu na perfuração e coleta do pó de concreto, realizado em concretos sem carbonatação e após o ensaio de carbonatação acelerada. O pó de concreto foi obtido pela perfuração do concreto com 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura, com auxílio de

Ato contínuo, a obtenção do pó, no laboratório de análises químicas de Furnas, as amostras foram diluídas em água destilada, sob agitação num período de 24 horas, com uma relação sólido:água de 1:20. Terminado o período de diluição, a solução foi filtrada, e o filtrado foi submetido às análises de (i) avaliação do potencial hidrogeniônico, com medidor portátil Thermo Scientific Orion 3-Star pH Meter™; (ii) avaliação da condutividade elétrica com aparelho portátil Thermo Scientific Orion 3-Star Conductivity Meter™; (iii) Determinação da concentração iônica dos seguintes de: Sódio [Na⁺] e Potássio [K⁺] por fotometria de chama em Fotômetro de chamas, modelo Q498M2, marca Quimis; Cálcio [Ca²⁺] por titulação complexométrica, e Sulfato [SO₄²⁻] por Procedimento de Furnas IT.QA.110: Análise Química – Determinação de enxofre na forma de sulfeto e sulfato.

4.3.3.9. Migração de cloretos em regime não estacionário

A resistência do concreto à penetração dos íons cloreto foi avaliada pelo coeficiente de migração de cloretos em regime não estacionário, conforme especificado na NT BUILD 492 “Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments”. No método, são utilizados corpos de prova cilíndricos saturados, com 100 mm de diâmetro e 50 mm espessura, obtidos pelo corte do corpo de prova de 100 mm x 200 mm.

Neste ensaio, realizado no LABITECC (UFG), um potencial elétrico externo é aplicado, inicialmente de 30 V, a fim de induzir e acelerar a difusão do ânion cloreto na amostra de concreto. A duração do ensaio varia de 6 a 96 horas, o que dependerá da medida da corrente inicial que atravessa a amostra, como uma resposta da resistência do concreto à passagem de corrente elétrica. Para tal, são utilizadas: 300 mililitros da solução anódica de hidróxido de sódio (NaOH) em contato com o lado superior da amostra e 12 litros de solução catódica de cloreto de sódio (NaCl) na região inferior.

Foram ensaiados três corpos de prova de cada dosagem que ato contínuo ao ataque foram rompidos em prensa por aplicação de esforços de compressão a fim de medir a profundidade de penetração de cloreto (Figura 54). Em função da pulverização de uma solução de nitrato de prata sobre as seções rompidas, teve-se a precipitação de cloreto de prata, formando uma região esbranquiçada na amostra, que determina a profundidade da frente de penetração dos cloretos.

Figura 54 - Rompimento do concreto atacado, à esquerda, e medida da espessura da frente de avanço dos cloretos.

Fonte: Autoria própria.

Em face às espessuras de penetração, é possível calcular o coeficiente de migração/difusão de cloreto, segundo a equação 11:

$$D = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \cdot (x_d - 0,0238 \frac{\sqrt{(273+T)Lx_d}}{U-2}) \quad (11)$$

Em que: D= Coeficiente de difusão do regime não estacionário ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$); U= valor da diferença de potencial do campo elétrico (V); T= Valor médio da temperatura inicial e final da solução anódica ($^{\circ}\text{C}$); L= espessura da amostra (mm); x_d = valor médio da profundidade penetração de cloretos (mm); t= duração do ensaio (h).

Com o propósito de verificar a formação de sal de Friedel nos concretos, foram realizadas análises por difratometria de raios X e microscopia eletrônica de varredura. As medidas de difração de raios X foram realizadas em Furnas, em um difratômetro Bruker D8, em que as varreduras foram realizadas com radiação $\text{CuK}\alpha$, no intervalo angular de 5 a 70° , passo de $0,005^{\circ}$ e tempo/passo de 0,15 segundos. Para a análise por MEV foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura, Jeol, JSM – 6610, equipado com EDS, Thermo scientific NSS Spectral Imaging e realizado o recobrimento com carbono para as amostras de concreto, do Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução (LABMIC – UFG).

4.3.3.10. Envelhecimento de argamassas de concreto

Os ensaios de envelhecimento tiveram o propósito de verificar problemas relacionados à instabilidade volumétrica dos agregados oriundos da expansão da escória, por hidratação do CaO livre, MgO livre. Para tal, após a dosagem dos concretos foi realizado peneiramento do concreto fresco para remoção do agregado graúdo. Para o procedimento utilizou-se peneira com malha de abertura 4,8 mm. Dos concretos peneirados, ou seja, das argamassas oriundas do concreto, moldaram-se corpos de prova para análise do comportamento "volumétrico" da escória como agregado.

A utilização de corpos de prova de argamassa se justifica pela necessidade de minimizar a complexidade de análises ao eliminar o uso de agregados graúdos e de obter amostras mais facilmente manipuláveis, como barras de argamassa. Assim, as barras de argamassa de concreto, após 28 dias de cura, foram submetidas a diferentes processos de envelhecimento, dois acelerados e um natural:

- I. **Envelhecimento por imersão:** o ensaio foi adaptado da ASTM 4752, usada para a determinação da expansão potencial de agregados devido a reações de hidratação. O ensaio consistiu na cura de barras de argamassa de concreto prismáticas, de 25 mm x 25 mm x 285 mm, por imersão em banho de água mantida a 80°C durante 70 dias em estufa com circulação de ar. Durante o período de ensaios foram realizadas medidas periódicas da variação do comprimento das barras em imersão.
- II. **Envelhecimento cíclico:** consistiu na imersão e emersão de barras prismáticas de argamassa de concreto, de 40 mm x 40 mm x 160 mm. Foram realizados 10 ciclos de imersão/emersão, nos quais as barras permaneciam imersas em água a 80°C durante 3 dias, e em seguida, eram secas a 80°C durante 4 dias em estufa com circulação de ar.
- III. **Envelhecimento natural:** com o propósito de verificar o comportamento do concreto em condições naturais de serviço, barras prismáticas de argamassa de concreto, de 40 mm x 40 mm x 160 mm, foram expostas ao ambiente natural protegido da exposição direta do sol e de chuva, pelo período de 180 dias.

Após o período estipulado de duração dos ensaios de envelhecimento cíclico e natural, foi realizada a determinação da resistência à tração na flexão e de compressão nas barras “envelhecidas” de 40 mm x 40mm x 160 mm, conforme a metodologia descrita na norma NBR 13279. Os ensaios de resistência à tração na flexão e de compressão foram realizados em prensa hidráulica motorizada, modelo PCE 100 C, fabricada pela Emic, com capacidade de 1000 kN, realizados no LABTECC - UFG.

Seguido aos ensaios de rompimento, amostras do material foram separadas para as análises de termogravimetria TG/DTG para verificar a ocorrência de hidróxidos e carbonatos dos óxidos expansivos, fluorescência de raios X e difratometria de raios X, realizadas no Centro Regional para o Desenvolvimento tecnológico e Inovação (CRTI – UFG).

Os termogramas foram obtidos em equipamento Setaram Labsys Evo, com medidas no intervalo de temperatura de 25 a 1000 °C, usando taxa de aquecimento de 10 °C/min e fluxo de Argônio de 10 mL/min.

As medidas de difração de raios X foram realizadas em um difratômetro Bruker D8 Discover. As varreduras foram realizadas com radiação $\text{CuK}\alpha$, no intervalo angular de 5 a 100°, passo de 0,02° e tempo de leitura por passo de 100 segundos. As amostras foram mantidas em rotação de 15 rpm. A quantificação pelo método de Rietveld foi realizada utilizando o software TOPAS® Versão 4.2.

Para as medidas de fluorescência de raios X, foram feitas análises de pérolas fundidas da amostra e tetraborato de lítio em um espectrômetro WDS Bruker S8 Tiger, equipado com tubo de Rh. A calibração foi realizada com o pacote GeoQuant M® da Bruker composto por padrões de rochas e minerais naturais.

4.3.3.11. Análise estatística

Em face dos resultados obtidos, estes foram submetidos à análise estatística, com o intuito de subsidiar a discussão das diversas respostas às análises de caracterização e do quanto estes valores diferem entre si.

À vista disso, a análise de identificação de valores espúrios foi empregada inicialmente, conforme a norma americana ASTM E 178, a fim de apontar e remover os valores que se distanciam das outras observações amostrais identificadas mediante a realização do teste de Dixon, com um nível de significância igual a 5%, elevando a confiabilidade da interpretação dos valores obtidos.

Os resultados isentos dos valores espúrios foram submetidos à análise de variância (ANOVA), realizada com o emprego do software Statistica 10.0, StatSoft®, para o qual foram calculados os valores do parâmetro de significância de “Fcal” e comparados com os valores Tabelados “Ftab” (Tabela de Fisher - ANEXO A), obtidos em função dos graus de liberdade do efeito avaliado e do resíduo do modelo, para o nível de significância de 5%. De modo que se $F_{cal} > F_{tab}$, o efeito avaliado é significativo no modelo. Por fim, havendo uma influência significativa das variáveis consideradas no estudo, comparações múltiplas de médias evidenciaram o agrupamento das médias que não diferem entre si de modo

significativo, obtidas pelo teste de Duncan, igualmente com o emprego do software Statistica 10.0.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD

5.1.1 Distribuição granulométrica da escória

A curva granulométrica obtida segundo a ABNT NBR NM 248, pela utilização de peneiras de série normal (ABNT Nº 100, 50, 30, 16, 8 e 4) é apresentada na Figura 55.

Figura 55 - Distribuição granulométrica (A) da escória e (B) das composições de escória e areia.

Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado no gráfico, a escória apresentou distribuição granulométrica contínua, no entanto, mais grossa do que comumente se emprega na produção de concretos, extrapolando os limites da zona utilizável, entretanto todas as composições de areia/escória de encontram dentro dos limites normativos.

A dimensão máxima característica da escória corresponde a 4,75 mm para o agregado de escória de aciaria LD, a maior dimensão possível para o agregado miúdo. Quanto maior a partícula do agregado, menor será a demanda de água da mistura, assim, a relação água/ligante pode ser reduzida com consequente ganho na resistência mecânica, mas esta afirmação é verdadeira apenas se for mantida a trabalhabilidade da mistura. Enquanto, o módulo de finura (MD) equivale igual a 3,32. Segundo Neville e Brooks (2010), o módulo de finura do agregado miúdo costuma variar entre 2,3 e 3,0 e valores acima destes indicam que se trata de um agregado mais grosso. De modo que se

faz necessário avaliar o efeito da granulometria na trabalhabilidade do concreto, a fim de que não seja alterada a dosagem de cimento, que se evite a tendência de segregação do concreto e alcance uma trabalhabilidade satisfatória.

5.1.2. Análise química

O resultado da análise química semi-quantitativa, realizada por fluorescência de raios X, é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - Composição química da escória de aciaria.

Composto	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MnO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂
Teor [%]	28,2	26,9	18,2	10,2	8,9	1,5	1,5	1,3	1,2	0,9	0,9

Fonte: Autoria própria.

Segundo a análise química, os principais componentes da escória correspondem ao SiO₂, CaO, Fe₂O₃, MgO e Al₂O₃, comumente encontrados na escória de aciaria LD, que totalizam em mais de 90% dos constituintes da escória, além dos demais constituintes minoritários. Verifica-se que o teor de álcalis (Na⁺ e K⁺) presente na escória é baixo, não atuando como aporte externo de álcalis no concreto para o desenvolvimento das reações álcali-agregado.

Vale ressaltar que a escória utilizada neste estudo foi fornecida gentilmente pela CSN, que de antemão forneceu uma escória oriunda de aciaria LD, no entanto como pode ser verificado na análise química o teor de CaO é relativamente baixo quando comparado com o teor do SiO₂, resultando numa basicidade de 0,95, valor este bem inferior ao comumente encontrado em escórias de aciaria LD de 2,5 a 4,5. Na usina Presidente Vargas da CSN são geradas escórias de Alto Forno, Aciaria LD e Aciaria Elétrica, muito provavelmente este efeito trata-se da contaminação da escória de aciaria LD por alguma outra forma de escória.

5.1.3. Óxido de cálcio livre total

Conforme ensaio normalizado pela NBR 7227 – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol, a % de CaO livre encontrada foi de 3,8% na escória de aciaria LD. O valor de CaO livre total, segundo a extração por etilenoglicol, compreende tanto os teores de óxido de cálcio livre quanto de hidróxido de cálcio, conforme foi possível identificar na análise de difração de raios X, demonstrado na Tabela 18.

O ensaio por extração com etilenoglicol não estabelece um limite normativo, no entanto a literatura reporta que o teor de cal livre na escória de aciaria LD pode atingir teores superiores a 12% (YILDIRIM, PREZZI, 2011), e, de acordo com Pinto Junior (2012), o valor limite para o teor de CaO livre pode variar de acordo com a aplicação desejada devendo ser inferior a 7% para agregados de pavimentos asfálticos e inferior a 5% para aplicação em concretos e argamassas. No entanto, vale ressaltar que estes valores estão relacionados ao emprego da escória como adição ao cimento, e no que diz respeito ao uso como agregado estes valores podem ser inferiores.

5.1.4. Análise mineralógica

Na Tabela 18 são exibidas as fases identificadas por difratometria de raios X. O difratograma da escória de aciaria LD é apresentado no APÊNDICE B.

As principais fases mineralógicas identificadas na escória de aciaria correspondem ao alumino-silicato de cálcio e sódio (labradorita), fase que pode ter tido origem do processo lento de resfriamento da escória fundida, a identificação da larnita (C_2S) também pode ser justificada a partir do resfriamento lento da escória que transforma o C_3S em C_2S e CaO.

A presença dos silicatos de cálcio com potencial hidráulico, na escória estudada, pode melhorar as reações de superfície entre o agregado de escória e a pasta de cimento, o que influenciaria no aumento da resistência mecânica do concreto. Foram identificadas também fases compostas por ferro, tais como wustita, hematita, traços de magnetita, goetita e ainda de ferro metálico.

Ademais, responsáveis pela expansão volumétrica da escória, foram verificadas a cal, a portlandita e a calcita, em quantidade superior devido ao período pelo qual a escória foi submetida ao envelhecimento, bem como o relativo a transporte e armazenamento até a data de seu emprego. Foram identificadas a presença de periclásio; também responsável

pelo ganho volumétrico das escórias; e traços de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), arquerita (KH_2PO_4), magnetita (Fe_3O_4), espinélio (MgAl_2O_4) e ilmenita (FeTiO_3) em teor muito pouco expressivo. Foram verificados ainda traços das fases arquerita (KH_2PO_4), magnetita (Fe_3O_4), espinélio (MgAl_2O_4) e ilmenita (FeTiO_3).

Tabela 18 - Composição mineral da escória de aciaria LD.

Fase mineral	Fórmula química	Teor [%]
Labradorita	$(\text{Ca}, \text{Na}) (\text{Al}, \text{Si})\text{O}_4$	17,6
Larnita	Ca_2SiO_4	16,9
Alita	Ca_3SiO_5	15,8
Quartzo	SiO_2	11,3
Brownmillerita	$\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$	4,2
Cordierita	$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$	3,4
Biotita	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{OH})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}$	3,7
Wustita	FeO	5,2
Hematita	Fe_2O_3	5,7
Calcita	CaCO_3	4,6
Cal	CaO	1,7
Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	2,2
Periclásio	MgO	1,7
Troilita	FeS	3,3

Fonte: Autoria própria.

5.1.5. Análise morfológica

A morfologia e textura dos agregados têm uma importância muito significativa nas propriedades do concreto, podendo interferir na trabalhabilidade do concreto fresco e na resistência mecânica do concreto endurecido. A morfologia das partículas de escória de aciaria LD é exibida nas Figuras 56 (A) a (F); as micrografias correspondem a imagens de uma mesma região em aumentos sequenciais, de (A) a (D), e de uma outra região, de (E) a (F).

Conforme é possível verificar nas imagens, os grãos de escória apresentam morfologia irregular com alta angulosidade e arestas bastante evidentes, características que podem

ser atribuídas ao processo de britagem pelo qual foi submetida e a elevada resistência mecânica do material desenvolvida em razão do resfriamento lento da escória em pátio de cura.

Nas duas últimas imagens, (E) e (F), é possível verificar a ocorrência de microfissuras na superfície da partícula de escória. A formação dessas fissuras na escória pode estar relacionada tanto à ocorrência de tensões térmicas geradas durante o resfriamento, seja pelo contato da escória líquida com o ar ou com jatos de água que auxiliam no resfriamento ao ar; pelo processo de britagem e cominuição das escórias; ou ainda devido à retração das partículas durante a solidificação destas, fatores que influenciam diretamente na porosidade das escórias de aciaria LD (GUMIERI, 2002).

Utilizando a técnica de espectroscopia por dispersão de comprimento de onda, realizada em microsonda eletrônica, foi realizada a quantificação química pontual das fases presentes em amostras com distribuição dos grãos entre 500 - 250 μm . As imagens obtidas são exibidas nas Figuras 57 (A) a (E) e demonstram a grande heterogeneidade da escória de aciaria LD.

Figura 56 - Micrografia dos agregados de escoria de aciaria LD.

Fonte: Autoria própria.

Verifica-se que na maioria dos grãos, as fases encontram-se combinadas e com um certo teor de impurezas presentes, de modo que poucas fases independentes foram observadas, no entanto, mesmo estas fases não apresentaram composição química livre de impurezas. Uma das poucas fases homogêneas identificadas foi o FeO (o grão central mais claro da Figura 57 (A)), corroborando os resultados obtidos por DRX; assim como, partículas de ferro metálico nas Figuras 56 (C) envoltas por silicato de cálcio e alumínio ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) e calcita, e (D) envolta por silicato dicálcico e uma fase de silicato de magnésio e alumínio.

Pela análise, foi verificada ainda a presença de cristais cuja composição principal corresponde a CaO e SiO_2 , associados a uma alta quantidade de FeO (23% em massa) e Al_2O_3 (14 % em massa) (Figura A). Assim como foi verificada na Figura (A) a presença de partículas de silicato de cálcio e alumínio, a presença de ferritas de cálcio ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$), com contendo conteúdo variável Mg e Mn, e, na Figura (B), de ferrita de magnésio (MgFe_2O_4); de silicato de cálcio com relação “C/S” equivalente a 1,5 (valor médio) o que indica a presença do silicato dicálcico (Ca_2SiO_4), com certo teor de impureza de magnésio, bem como da fase espinélio (MgAl_2O_4), associado a um teor de ferro.

Foram verificadas ainda a ocorrência de bolhas nas partículas de escória, que se apresentam preenchidas com resina em decorrência da preparação da amostra para a análise e de algumas fissuras ao longo das partículas.

As bolhas presentes na escória são originadas da liberação de gases durante o processo de resfriamento/solidificação das escórias e são importantes indicadores da porosidade do material em estudo, como apresentado nas Figuras 57 (D) e (E) na qual diversas bolhas são formadas sobre uma fase de silicato de magnésio e alumínio, e envolvem a fase de silicato dicálcico.

Figura 57 - Análise de fases da escória de aciaria LD por microssonda eletrônica: 1-FeO, 2-Ca₂FeO, 3-MgFe₂O₄, 4-MgAl₂O₄, 5-Ca₂SiO₄, 6-FeO, 7- Ca₂AlFeO₅.

Fonte: Autoria própria.

5.2. RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMO CONSTITUINTES DO CONCRETO

5.2.1. Agregado miúdo: escória e areia natural

Para este estudo foi utilizada a areia natural de leito de rio de cor creme amarelada, com grão de tamanhos variados, formas bem arredondadas a angulosas quase esféricas a alongadas. A composição química da areia natural, obtida por fluorescência de raios X, realizada na EEL USP, é composta basicamente de SiO_2 (94,5%), com frações minoritárias de Al_2O_3 (2,69%); Fe_2O_3 (1,62%); K_2O (0,64%) e Na_2O (0,30%). A composição química da escória já foi apresentada na Tabela 17.

Os resultados dos ensaios físicos da areia natural e da areia artificial de escória são apresentados na Tabela 19, juntamente com as normas empregadas.

Tabela 19 - Caracterização física do agregado miúdo de areia natural e escória.

Determinação	Escória de aciaria LD	Areia Natural	Métodos de Ensaio
Absorção de água (%)	4,8	0,3	NBR NM 30/2001
Módulo de Finura	3,3	2,6	NBR NM 248/2003
Massa Esp. Aparente do Agr. Seco (g/cm^3)	2,7	2,6	
Massa Esp. do Agr. Sat. Sup. Seca (g/cm^3)	2,8	2,6	NBR NM 052/2009
Massa Específica (g/cm^3)	3,1	2,7	
Massa Unitária (g/cm^3)	1,6	-	NBR NM 45/2006
Abrasão Los Angeles (%)	33 "D"	-	NBRNM 51/2001
Teor de material pulverolento (%)	2,83	-	NBR NM 46/2003

Fonte: Autoria própria.

Embora não seja comumente realizado, o ensaio de desgaste superficial de abrasão Los Angeles do agregado miúdo é crucial conhecer essa propriedade da escória, tanto em função do histórico verificado ao longo de demais estudos (Tabela 11), quanto para compreender o seu impacto em propriedades como o módulo de elasticidade do concreto.

A capacidade do agregado de escória em resistir aos desgastes ou à fragmentação quando submetido às forças de atrito se mostrou baixa, com uma perda de massa de 33%,

grandemente influenciado pela porosidade do material, essa característica indica uma tendência nos resultados obtidos para propriedades do concreto.

Verifica-se que algumas características medidas apresentam ampla diferença entre os agregados de escória e a areia, tais como a absorção, o módulo de finura e a massa específica.

É amplamente conhecido que escórias de aciaria apresentam massa específica superior, em função do elevado teor de ferro característico de sua composição, e pode ser cerca de 30% superior ao agregado natural (JIANG et al., 2018). Este fato torna a escória uma exceção ao conceito de que os materiais porosos e absorptivos apresentam menor massa específica, em função dos vazios que os constituem.

Segundo Kambole et al. (2017) e Yildirim e Prezzi (2011), estudos mostraram ainda que o tamanho de partícula da escória pode influenciar na massa específica, de maneira que para frações inferiores a 2,36 mm, a massa específica pode ser reduzida em 17% quando comparado a partículas com tamanhos entre 4,75 a 2,36 mm. Visto que em frações superiores há geralmente mais partículas de ferro.

Como observado na Tabela 19, a absorção de água dos agregados de escória é significativamente superior à da areia de quartzo, fator relevante no que tange a trabalhabilidade do concreto no estado fresco e a resistência mecânica do concreto endurecido, uma vez que pode elevar a demanda de água para manter a consistência do concreto no estado fresco. Essa tendência de maior absorptividade foi igualmente observada por outros autores, conforme apresentado anteriormente na Tabela 11 e como apontado por Kambole et al. (2017), a absorção de água da escória de aciaria LD é geralmente superior à de agregados naturais, principalmente para tamanhos de partículas mais finos.

Dado que o ensaio de absorção de água para os agregados indica o número de vazios interconectados, que possuem dimensão que permite o livre deslocamento da água para o seu interior durante a imersão, essa maior absorptividade pode demonstrar que maior será a probabilidade de que o agregado tenha um baixo módulo de elasticidade e não seja durável (KAMBOLE et al., 2017).

A análise individual do grão de escória em lupa estereoscópica demonstrou uma textura porosa e irregular que sugere maior absorptividade do agregado, como pode ser visto na Figura 58.

Figura 58 - Grãos de escória observados em lupa estereoscópica.

Fonte: Autoria própria.

Assim, fez-se necessário avaliar de maneira mais quantitativa a porosidade da escória, conforme exibido na Tabela 20, para o resultado da porosimetria por adsorção – dessorção de nitrogênio gasoso dos agregados de areia e escória.

Tabela 20 - Caracterização da porosidade da areia natural e escória por adsorção de nitrogênio.

Determinações	Areia natural	Escória de aciaria LD
Área específica – BET [m^2/g]	1,18	6,1
Raio médio de poros [nm]	1,91	1,92
Volume de poros [cm^3/g]	0,002	0,02

Fonte: Autoria própria.

A área superficial específica da escória se mostrou significativamente superior, cerca de cinco vezes a da areia, isto demonstra que para a escória mais superfícies estão expostas. A área superficial específica da escória é altamente influenciada pela porosidade das partículas que a constituem, tanto no que envolve poros, quanto na ocorrência de fissuras. Já a areia natural quartzosa comporta-se desta maneira por tratar-se de um material altamente densificado e de superfície lisa.

Essa discussão se confirma quando observados os valores relativos a porosidade de escória e da areia. Ambos materiais apresentam raio médio de poros em intervalo demasiado semelhante, com predominância de classes de poros com raios próximos a

2,0 nm. De modo que os diâmetros dos poros se situam dentro dos limites dos poros classificados como mesoporos (diâmetro entre 2 – 50 nm).

O volume de poros, entretanto, exibe forte distinção para ambos materiais, de maneira que para a escória é cerca de dez vezes superior ao da areia, o que representa que, embora possuam poros de tamanho semelhantes, o volume de vazios nas escórias é superior. Tal resultado demonstra que uma maior área de superfície está disponível para a adsorção de água nas paredes dos poros das escórias.

5.2.2. Reatividade álcali-agregado

O resultado do ensaio de determinação do potencial de reatividade álcali-agregado da escória, realizado conforme preconizado pela NBR 15577-4, é apresentado na Figura 59. Pela qual, barras de argamassa, compostas por cimento CPV ARI e escória de aciaria LD foram imersas em solução alcalina de hidróxido de sódio, a 80°C, durante 30 dias. Ao longo deste período foram monitoradas as expansões lineares.

Verificou-se que o agregado apresentou expansão superior a 0,19% aos 30 dias de cura, equivalente a 0,35%, o que caracteriza o seu comportamento como potencialmente reativo para o uso em concreto (Figura 59).

Figura 59 - Evolução da expansão média das misturas contendo escória com e sem adição de sílica ativa.

Fonte: Autoria própria.

O cimento CPV utilizado para o ensaio foi o mesmo empregado na produção do concreto, em sua composição não são realizadas adições minerais, o que torna o cimento CPV uma importante fonte de álcalis advinda do clínquer, bem como altamente reativo, por ser produzido com uma moagem mais fina comparada aos demais, fato visto pela expansibilidade ter iniciado logo nos primeiros dias de cura.

Na análise petrográfica da escória (APÊNDICE C), não comumente realizada, mas empregada nesta pesquisa como uma análise acessória com o propósito de compreender o comportamento da escória, verificou-se que alguns fragmentos de escória apresentam material extremamente fino com características óticas semelhantes ao quartzo microcristalino, considerada uma fase silicosa sensível ao meio alcalino e passível de reagir com os álcalis do cimento, sendo assim, em relação à potencialidade da escória em promover reatividade, pode-se considerar que os fragmentos contendo quartzo microcristalino representam a única fase, identificada por microscopia ótica, que apresenta esta suscetibilidade. Entretanto, por difratometria de raios X foram identificadas outras fases, como óxidos e hidróxidos de cálcio e magnésio.

Posteriormente à obtenção deste resultado, foram realizados outros dois ensaios com o objetivo de demonstrar a possibilidade da mitigação das reações deletérias do tipo RAA, através da adição de 8 e 15% de sílica ativa (massa específica: $2,27 \text{ g/cm}^3$ e área específica $22,02 \text{ m}^2/\text{g}$) em relação à massa de cimento em combinação com o uso do cimento CP IV-32, que apresenta potencial inibidor para esta reação. O emprego do cimento CP IV foi definido devido a sua composição apresentar até 50% de material pozolânico, reduzindo, consequentemente, o teor de álcalis do cimento oriundos do clínquer (Tabela 21).

A reação álcali-agregado é baseada na reação entre o SiO_2 , do agregado reativo, e os álcalis do cimento presentes na solução intersticial do concreto e, com base em estudos, é conhecido que o emprego da sílica ativa conduz a inibição da reação, com teor máximo de adição de 15%, em relação à massa do cimento (CARLES-GIBERGUES; HORNAIN, 2014).

A inibição provocada pela adição de uma pozolana como a sílica ativa é justificada principalmente pelo aumento da produção de C-S-H, sobretudo de C-S-H pozolânico, que apresenta uma estrutura de poros mais fina, tal fato implica na redução dos coeficientes de difusão e da permeabilidade da pasta de cimento, o que reduz a migração dos álcalis em direção aos agregados reativos. Bem como, pela redução da relação Ca/Si no C-S-H

pozolânico, o que provoca um relevante aumento na fixação dos álcalis no interior de suas estruturas, restringindo o aporte de álcalis para a reação.

Na Figura 59 são apresentados os resultados comparativos da expansão média das argamassas obtidas pelo emprego do cimento CP V; do cimento CP IV com adição de 8% de sílica ativa e do cimento CP IV com adição de 15% de sílica ativa.

Os resultados mostram que a substituição do cimento e a adição de 8% e 15% de sílica ativa, em massa, foram suficientes para reduzir a expansão a valores abaixo do limite normativo (0,19 %). Até os 16 dias ambas apresentaram medidas de expansão bastante semelhantes, de cerca de 0,03%, contudo, a partir desta idade a expansibilidade foi mais pronunciada para a mistura com menor teor de sílica ativa, que se aproximou do limite.

Considerando as fases minerais presentes na escória e os resultados obtidos pelo ensaio de mitigação, pode-se concluir que a expansão apresentada pela escória não corresponde a uma expansão resultante do tipo álcali-agregado, que teria efetivamente sido suprimida pela troca do cimento e da adição de sílica ativa.

Nessa conformidade, caracterizam-se como reações expansivas dos constituintes da escória de aciaria LD. Deve-se ressaltar que o comportamento expansivo apresentado na Figura 59 difere do comumente apresentado por agregados reativos (CUNHA, CINCONTTO, 2008; ABCP, 2011; CARLES-GIBERGUES; HORNAIN, 2014), pois estes podem apresentar expansão superior a 0,2% logo nos primeiros dias de ensaio. Em contrapartida, sabe-se que a hidratação dos constituintes expansivos da escória ocorre após a cura da matriz cimentícia.

Tabela 21 - Caracterização do cimento CP IV-32 utilizado no ensaio de mitigação, segundo NBR 5736.

Propriedades determinadas			Resultados	Limites
Massa Específica/ Área Específica - Método Blaine (g/cm³)			2,96	-
Finura por Peneirador Aerodinâmico – # 200 - NBR 12826			1,4	-
Área Específica - (Blaine) (cm²/g) - NBR NM 76/98			6270	>3000
Tempo de Pega (h:min) - NBR 16607	Início (h:min)		02:10	≥ 1:00h
	Fim (h:min)		03:00	≤ 12:00h
Expansibilidade em autoclave média (%)			0,04	≤ 0,8
Resistência à Compressão da Argamassa (MPa) – NBR 7215	3 dias		29,8	≥ 10 MPa
	7 dias		37,7	≥ 20 MPa
	28 dias		42,8	≥ 32 e ≤ 49
	91 dias		40,9	≥ 40
Composição química (%)	Perda ao fogo		2,28	≤ 4,5
	Resíduo insolúvel		27,33	≤ 1
	Sulfato de cálcio (CaSO ₄)		5,10	-
	Óxido de cálcio livre (CaO livre)		0,43	-
	Anidrido sulfúrico (SO ₃)		3,00	0
	Óxido de magnésio (MgO)		4,39	≤ 6,5
	Dióxido de silício (SiO ₂)		31,37	-
	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		3,12	-
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		10,71	-
	Óxido de cálcio (CaO)		43,19	-
	Álcalis totais	Óxido de sódio	0,25	-
		Óxido de potássio	0,86	-
		Equivalente alcalino	0,82	-
	Álcalis solúveis em água	Óxido de sódio	0,06	-
Óxido de potássio		0,4	-	
Equivalente alcalino		0,33	-	

Fonte: Autoria própria.

5.2.3. Agregado graúdo

A caracterização física do agregado graúdo natural de granito está apresentada na Tabela 22, juntamente com a normatização que estabelece as diretrizes de execução.

Tabela 22 - Caracterização do agregado graúdo.

Determinação	Brita	Métodos de Ensaio
Absorção (%)	0,4	NBR NM 53/2009
Módulo de Finura	6,95	NBR NM 248/2003
Abrasão Los Angeles (%)	24 "B"	NBR NM 51/2001
Índice de Forma (c/e)	2,6	NBR 7809/2006
Massa Específica S.S.S.(g/cm ³)	2,7	NBR NM 53/2009
Sanidade ao Ataque de Na ₂ SO ₄ (%)	0,13	ASTM C-88/2013
Ciclagem acelerada Água-Estufa (%)	0,09	NBR 12696/1992

Fonte: Autoria própria.

O agregado graúdo utilizado é de natureza ígnea, cor cinza-rosado, com estrutura maciça a levemente orientada e com dimensão máxima característica igual a 9 mm. O tipo litológico classificado na análise petrográfica foi hornblenda granito/biotita granito, com composição cristalina estimada: Hornblenda granito: plagioclásio (55-60%); quartzo (25-30%); hornblenda (15-20%); biotita (1-2%); opacos - zircão - apatita (<1%) e Biotita granito: microclínio (35-40%); plagioclásio (15-20%); quartzo (35-40%); biotita (2-5%); hornblenda (<1%); opacos - apatita (traços).

5.2.4. Cimento Portland CPV ARI

A caracterização física e química do cimento utilizado nesta pesquisa e os parâmetros normativos da NBR 5733 foram exibidos na Tabela 23.

Tabela 23 - Caracterização físico-química do cimento CP V ARI.

Propriedades determinadas		Resultados	Limites NBR 5733	
Massa Específica/ Área Específica - Método Blaine (g/cm³)		3,1	-	
Finura por Peneirador Aerodinâmico – # 200 - NBR 12826		0,2	-	
Área Específica - (Blaine) (cm²/g) - NBR NM 76/98		4300	>3000	
Água de Consistência - Pasta (%) – NBR 16606		29,6	-	
Tempo de Pega (h:min) - NBR 16607	Início	01:50	≥ 1:00h	
	Fim	02:50	≤ 10:00h	
Resistência à Compressão da Argamassa (MPa) – NBR 7215	3 dias	29,8	≥ 24 MPa	
	7 dias	35,8	≥ 34 MPa	
	28 dias	40,7	-	
	91 dias	44,6	-	
Composição química (%)	Perda ao fogo		4,11	≤ 4,5
	Resíduo insolúvel		0,47	≤ 1
	Sulfato de cálcio (CaSO₄)		5,83	-
	Óxido de cálcio livre (CaO livre)		0,97	-
	Anidrido sulfúrico		3,43	0
	Óxido de magnésio		3,97	≤ 6,5
	Dióxido de silício		17,25	-
	Óxido de ferro		2,92	-
	Óxido de alumínio		4,03	-
	Óxido de cálcio		61,02	-
	Óxido de titânio		0,38	-
	Álcalis totais	Óxido de Sódio	0,23	-
		Óxido de Potássio	1,3	-
		Eq. Alcalino	1,09	-
	Álcalis solúveis em água (K₂O)		0,94	-

Fonte: Autoria própria.

5.3. RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

5.3.1. Resultados dos ensaios de consistência e resistência mecânica dos concretos

A primeira etapa de dosagem dos concretos, conforme supracitado, objetivou a produção das dosagens de concreto: CR, CE25, CE50 e CE75, inicialmente avaliados no estado fresco quanto à consistência apresentada, e posteriormente a 28 e 180 dias de cura úmida, avaliados quanto à resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Todos os ensaios referidos serviram como base para a definição da dosagem mais adequada para a realização da caracterização da durabilidade em concretos compostos por escória de aciaria LD.

5.3.1.1. Consistência e reologia do concreto no estado fresco

O concreto foi produzido tendo sua classificação como um concreto bombeável, devido à alta aplicabilidade desta classe de concretos. Para tal, a fluidez dos concretos no estado fresco foi avaliada quanto ao abatimento, limitado em 120 mm, às características reológicas e ao aspecto visual. Tal preocupação é justificada devido ao fato de que as propriedades dos agregados têm maior influência sobre a trabalhabilidade do concreto do que as propriedades do cimento, e que uma mistura de concreto que gera dificuldades no lançamento e adensamento, possivelmente apresentará características de resistência mecânica e durabilidade insuficientes (CASTRO, 2007). O aspecto visual dos concretos apresentou-se de maneira bastante divergente entre as composições. Verificou-se que com o aumento do teor de escória, a mistura apresentava um teor de argamassa insuficiente para envolver o agregado graúdo, tornando-o mais evidente na mistura. Como é possível observar na Figura 60, à medida que maiores quantidades de escória são adicionadas ao concreto, a proporção entre os materiais constituintes da mistura (cimento, agregados, água e aditivo) se torna ineficaz para a manutenção da plasticidade do concreto, tornando o concreto menos fluido.

Figura 60 - Aspecto visual do concreto logo após a dosagem.

Fonte: Autoria própria.

Os valores do abatimento corroboraram a avaliação visual e demonstraram a redução da trabalhabilidade do concreto, tal fato evidencia a redução da facilidade de mobilidade do concreto fresco. Os valores individuais e as imagens do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone são apresentados na Figura 61. Ao considerar a classe de consistência do concreto como S100, para abatimento entre 100 – 160 mm, os concretos CE25 e CE50 se mantêm próximos do concreto referência, apesar de o concreto CE50 se encaixar na classe S50, de acordo com a classificação da NBR 7212. No entanto, o concreto CE75 apresenta um valor díspar de consistência, expressivamente distante do pré-estabelecido, o que demonstra que o elevado atrito entre as partículas individuais deste concreto dificulta o seu adensamento, provocando o intertravamento das partículas e elevados valores de abatimento, dispondo-o na classe de concretos S50, e, segundo a norma, tais concretos caracterizam-se pelo emprego em alguns tipos de pavimentos e elementos de fundações.

Em geral, foram encontrados na literatura resultados semelhantes aos obtidos, uma vez que outros autores identificaram que o concreto com agregado de escória LD, tanto graúdo quanto miúdo, sofre perdas na trabalhabilidade. Tal fato é atribuído principalmente pelo aumento da demanda de água, resultado da elevada absorção da escória LD, e pela forma angular das partículas de escória, que reduz a sua mobilidade na matriz cimentícia e provoca a redução da fluidez do concreto (PANG et al., 2015; PALANKAR et al. 2015; JIANG et al., 2018).

Figura 61 - Resultado obtido pelo abatimento do tronco de cone dos concretos.

Fonte: Autoria própria.

Segundo Jiang et al. (2018), foi observado que a trabalhabilidade é significativamente reduzida quanto menor for a relação água/aglomerante ou quanto menor for o tamanho de partícula da escória utilizada. Em ambos o fator comum se relaciona ao aumento da demanda de água com o uso da escória. Ainda segundo os autores, deve-se ressaltar que em casos em que há a completa substituição do agregado natural por escória é comumente verificada a ocorrência de segregação e exudação, seja pela substituição do agregado miúdo ou do grão e em consequência da substituição total do agregado grão natural pode vir a ocorrer uma queda no abatimento de até 80%.

Desta forma, antes da dosagem a alta absorção da escória (ver Tabela 19) tornou-se uma preocupação para a manutenção da fluidez das misturas, de modo garantiu-se que a sua adição fosse realizada na condição saturado com superfície seca, a fim de evitar a absorção de água de amassamento pelo agregado miúdo e minimizar o impacto da alta absorção da areia artificial. Condição comumente empregada com o propósito de evitar perdas na trabalhabilidade do concreto.

No entanto, outros fatores geram impacto na trabalhabilidade do concreto, que está altamente relacionada a três principais fatores: a quantidade de pasta de cimento, a relação água/ligante e as características morfológicas dos agregados. Neste trabalho, para todas as dosagens foram mantidas constantes a quantidade de cimento e a relação água/cimento, em 0,54.

Isto posto, foi verificada a influência da forma dos agregados empregados por meio da análise morfológica, pela qual os grãos de areia natural e escória foram avaliados em

lupa estereoscópica. A análise dos grãos foi realizada em cada uma das frações retidas nas peneiras da série normal (150 μm - 4,75mm) e é apresentada na Figura 62.

Figura 62 - Imagens dos agregados obtidas em lupa estereoscópica da areia e da escória de aciaria LD.

Fonte: Autoria própria.

De maneira geral, a areia natural apresenta partículas de elevada esfericidade, com faces desgastadas pela ação da água, predominantemente arredondadas e com textura superficial lisa. Os grãos na faixa de 600 μm a 2,36 mm, entretanto, apresentam forma subangular, com arestas mais evidentes quando comparados à menor fração granulométrica.

Em contrapartida, torna-se notório que a escória, obtida por britagem, apresenta partículas predominantemente angulares, em todas as faixas granulométricas e, como demonstrado por Carasek et al. (2016), quanto mais se distanciar do formato esférico e mais angulosa a partícula for, menor será o grau de empacotamento de uma mistura, visto que o atrito interno entre as partículas é elevado devido à alta fricção interparticular, fato que dificulta a rolagem entre grãos. Por conseguinte, resultará em uma inadequada acomodação das partículas, e o máximo empacotamento torna-se inatingível.

Ademais, segundo Neville (2016), a ocorrência de partículas angulosas exige maior quantidade de água para alcançar uma dada trabalhabilidade, fato que implicaria no aumento da porosidade do concreto e, conseqüentemente, na queda da resistência mecânica. Pode-se afirmar que este efeito foi obtido para o concreto CE75, que apenas alcançaria o abatimento de 120 mm caso sua formulação fosse alterada pelo aumento da relação a/lig ou pelo aumento do teor de aditivo. Outro fator a se alterar seria a quantidade de pasta de cimento: se elevado o teor, alcança-se bons resultados em termos de fluidez do material, no entanto isso pode trazer outras implicações problemáticas no

comportamento do concreto após seu lançamento, como altas taxas de liberação de calor, retração térmica, além do aumento do custo da produção do concreto. Quanto à textura superficial, verificou-se que a areia artificial apresenta superfície áspera, fato este que, segundo Neville (2016), pode ser benéfico uma vez que a textura mais rugosa pode resultar em maior aderência entre os agregados e a matriz cimentícia.

Para complementar o estudo da trabalhabilidade, foi avaliado o comportamento reológico de todos os concretos, Figura 63. Os resultados são apresentados em função da força aplicada que resulta do cisalhamento do concreto, ou seja, do torque em função da velocidade de rotação (rpm).

Figura 63 - Valores obtidos dos ensaios de reometria realizados nos diferentes concretos.

Fonte: Autoria própria.

Analisando os gráficos obtidos, verifica-se que os concretos CE25 e CE50 apresentam comportamento reológico similares conforme a inclinação e proximidade das curvas apresentadas. O concreto CE75 apresentou um comportamento diferenciado, verificado também nas análises visuais e no ensaio de abatimento de tronco de cone. O resultado aponta uma tendência de crescimento da viscosidade plástica com o aumento do teor de escória devido ao efeito de intertravamento mecânico. Durante a execução do ensaio foi observado também a tendência à segregação do agregado graúdo da pasta de cimento.

O concreto em questão, CE75, se diferenciou dos demais, pois apresentou uma área de histerese maior (área interna das curvas que mede a propriedade do fluido de manter

a tensão de cisalhamento com a variação da taxa), indicando até uma possível separação da pasta com o agregado. Todos os outros apresentaram um menor torque, demonstrando que as misturas obtiveram um empacotamento na mesma proporção, facilitando a fluidez e resultando em concretos com menor probabilidade de segregação durante o ensaio.

Em termos de engenharia, pode-se concluir que em função das características plásticas do concreto CE75, seu lançamento se torna mais trabalhoso levando a bomba a realizar esforços superiores e a obter maior probabilidade de segregação dos componentes durante o transporte, lançamento ou adensamento do concreto.

5.3.1.2. Resistência mecânica

Os ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade estático por compressão foram realizados aos 28 e 180 dias de cura, a fim de fornecer informações quanto ao efeito da escória na resistência mecânica do concreto após um período mais longo de hidratação, dadas as características expansivas da escória de aciaria LD. Para observar as diferenças estatisticamente significativas dos valores obtidos, os resultados da análise de variância (ANOVA) são exibidos nas Tabelas 24, 25 e 26.

Tabela 24 - Resultados da análise de variância realizada com os dados individuais da resistência à compressão.

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	p	Resultado
Modelo	33065,75	1	33065,75	14662,68	4,49	0	Significativo
Idade	127,10	1	127,10	56,36	4,49	0,000001	Significativo
Teor de substituição	59,05	3	19,68	8,73	3,24	0,001164	Significativo
Idade* teor	2,41	3	0,80	0,36	3,24	0,784863	Não significativo
Erro (resíduo)	36,08	16	2,26				
Total	33290,39	24,00	33215,59				
R: 0,92 R ² : 0,84							

Nota: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; R² = coeficiente de determinação do modelo (1 - SQ_{erro}/SQ_{total}); R = coeficiente de correlação do modelo.

Fonte: Autoria própria.

O modelo da análise de variância foi significativo, dado que $F_{cal} > F_{tab}$, com coeficiente de determinação igual a 0,84. Do mesmo modo, dos efeitos avaliados tem-se que a idade e o teor de substituição são variáveis estatisticamente significativas para explicar alterações dos valores obtidos de resistência à compressão, para um nível de confiança de 95%.

Pode-se constatar que o tempo de cura (idade) é o fator mais influente na mudança da resistência à compressão quando comparado ao teor de escória utilizada no concreto. Tal fato demonstra que a variação da idade dos concretos resultará em uma alteração significativa da resistência independentemente do teor de substituição realizado, para uma dada relação a/lig. Ressalta-se também que este efeito está relacionado principalmente ao prolongado período de cura pelo qual o concreto foi mantido, o que permitiu a evolução da resistência à compressão durante o período de 6 meses.

A Figura 64 apresenta o gráfico das médias, para as duas idades estudadas, bem como a união dos resultados em grupos estatisticamente iguais, com base na comparação múltipla de médias, realizada pelo teste de Duncan.

Na Figura 64 é evidenciado o aumento da resistência à compressão dos concretos com a substituição da areia por escória, em todos os teores de substituição.

Figura 64 - Médias de resistência à compressão dos concretos, com intervalo de confiança de 95%.

Fonte: Autoria própria.

Ademais, quando observado o aumento percentual da resistência, compreende-se o agrupamento realizado após análise estatística. Sendo que em média os concretos com

a utilização de escória tiveram resistências 0,4%; 7,5% e 7,8% maiores que o concreto de referência, aos 28 dias, e 0,6%; 7,5% e 9,6% aos 180 dias, para 25%, 50% e 75% de substituição, respectivamente.

Não obstante ao agrupamento obtido pela comparação das médias, os valores alcançados apresentam uma alta proximidade em termos de relevância para a engenharia. Observa-se, aos 180 dias, que entre o concreto de referência e o com maior nível de substituição (CE75) a diferença existente na resistência de dosagem é de apenas 2,3 MPa e corresponde à máxima variação entre as dosagens. Este valor, no entanto, é inferior ao valor utilizado para determinar ou prever a variabilidade de um concreto produzido para uma dada construção, correspondente a 4 MPa, conforme prescrito na NBR 12655 e empregado na equação $f_{cj} = f_{ck} + 1,65 sd$, em que: f_{cj} é a resistência média do concreto à compressão, prevista para uma dada idade; f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão, e sd é o desvio-padrão da dosagem (4 MPa).

Em termos gerais, pode-se discutir o aumento da resistência à compressão em função de alterações na aderência mecânica do concreto, que devido à alta angulosidade das partículas da escória, associada à sua textura superficial áspera, proporcionou o aumento do atrito interno entre os agregados, ou intertravamento das partículas de escória e de cimento, bem como da aderência à pasta de cimento. Por outro lado, como observado, estes mesmos fatores interferem na trabalhabilidade das misturas, podendo reduzir a fluidez do concreto com o aumento do índice de substituição.

Pode-se ainda inferir que o uso de escória provocou melhorias na interface do agregado miúdo, tal efeito pode ser compreendido como alterações que se concentram no entorno dos agregados de escória. É sabido que a estrutura da matriz de cimento no concreto não é homogênea e que, na vizinhança dos agregados, a porosidade da pasta é superior. Obviamente, este efeito é mais significativo quanto maior for a dimensão do agregado, sendo assim mais expressivo para o agregado graúdo.

No entanto, considerando que quase 40% da massa do concreto produzido corresponde a areia, este efeito não pode ser ignorado para o agregado miúdo. Assim, dado que a escória apresenta absorção superior a areia quartzosa natural, o seu emprego muito provavelmente levou a absorção local de água adsorvida na superfície dos grãos de escória, tendo a redução da espessura de filmes d'água adsorvido no entorno do agregado miúdo de escória, fato que leva a redução local da porosidade da pasta na zona de

transição do agregado miúdo e, conseqüentemente, à elevação da resistência mecânica do concreto.

Ainda sob o enfoque de alterações na interface do grão, pode-se inferir que devido a composição mineralógica da escória, reações na superfície dos agregados de escória tenham elevado a aderência do agregado com a pasta, propiciando a formação de aluminatos e silicatos de cálcio hidratados.

Quanto a resistência à tração por compressão diametral, os resultados individuais foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e estão exibidos na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultados da análise de variância para os dados individuais da resistência à tração.

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	Ftab	Resultado	Resultado
Modelo	294,51	1	294,51	3269,57	4,54	0,0	Significativo
Idade	0,71	1	0,71	7,90	4,54	0,01	Significativo
Teor de substituição	0,42	3	0,14	1,56	3,29	0,24	Não significativo
Idade* teor	0,08	3	0,03	0,28	3,29	0,84	Não significativo
Erro	1,35	15	0,09				
Total	297,07	22	0,97				
R: 0,69 R ² : 0,48							

Fonte: Autoria própria.

O modelo calculado mostrou-se significativo, no entanto, o coeficiente de determinação do modelo não foi alto, igual a 0,48. Isso significa que pouco mais de 40% da variação dos dados é explicada pelo modelo, não obstante, ele seja estatisticamente válido para ser empregado na análise.

Dentre as variáveis independentes adotadas, apenas a idade dos concretos corresponde a um efeito significativo na resistência à tração, observa-se que com o aumento da idade obteve-se uma evolução da resistência à tração por compressão diametral. No entanto, pela resistência média de todos os concretos não serem estatisticamente distintas ($F_{\text{tab}} > F_{\text{cal}}$), quanto ao teor de substituição de areia, estes se caracterizam como um único grupo de concretos, conforme observado na Figura 65.

A resistência à tração dos concretos apresenta apenas aos 28 dias um ganho de resistência para o concreto CE25, de cerca de 2%. Com a substituição de 50% de areia há a redução de 5,9% da resistência à tração, já com o teor máximo de substituição, equivale a 8%. Aos 180 dias, no entanto, a diferença entre a resistência média dos concretos contendo escória e o de referência se tornou menor e apresentou uma redução em todos os níveis de substituição, equivalentes a 0,95%; 0,69% e 5,45% para os concretos CE25; CE50 e CE75, respectivamente.

Figura 65 - Médias de resistência à tração dos concretos, com intervalo de confiança de 95%.

Fonte: Autoria própria.

Assim, vale ressaltar que a distinção entre os concretos não é considerada significativa do ponto de vista estatístico, e que a variação percentual entre as médias é pouco relevante, indicando assim uma tendência do comportamento apresentado pelo concreto composto por escória, principalmente quando observados os valores de resistência obtidos para o concreto com máximo teor de escória, CE75.

A redução da resistência à tração dos concretos compostos por escória de aciaria LD pode estar associada ao desenvolvimento de reações expansivas de componentes presentes na escória, que levam ao desenvolvimento de microfissuras resultantes do aumento de volume desses componentes na matriz confinada após a hidratação da pasta cimentícia. No entanto, as idades de ensaio podem não ter sido suficientemente longas

para se constatar este efeito. Segundo Wang, Wang e Zhuang (2017), os problemas concernentes à expansibilidade da escória são praticamente imperceptíveis até os 28 dias de hidratação, dada a lenta reação dos componentes expansivos das escórias (CaO e MgO livres), e podem começar a ser significativos após 360, dependendo do teor de escória presente no concreto.

Apesar do concreto não ser um material verdadeiramente elástico, devido à complexidade e heterogeneidade de sua composição, para tensões inferiores a 40% da resistência à compressão, ele poderá ser considerado como tal. Assim os resultados individuais de módulo de elasticidade estático obtidos por compressão submetidos à ANOVA, considerando como efeitos o teor de substituição e a idade dos concretos, são apresentados na Tabela 26 e Figura 66.

Tabela 26 - Resultados da análise de variância para os dados individuais do módulo de elasticidade.

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	p	Resultado
Modelo	33265,75	1	33265,75	19900,30	4,49	0,0	Significativo
Idade	34,37	1	34,37	20,56	4,49	0,000339	Significativo
Teor de substituição	56,51	3	18,84	11,27	3,24	0,000320	Significativo
Idade* teor	1,68	3	0,56	0,33	3,24	0,800299	Não significativo
Erro	26,75	16	1,67				
Total	33385,06	24,00	33321,19				
R _{mod} : 0,89 R ² _{mod} : 0,78							

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que os concretos foram divididos em três grupos distintos (delimitados pela linha pontilhada), o primeiro formado pelo concreto CR, o segundo pelo concreto CE25 e o terceiro pelos concretos CE50 e CE75, de modo que nenhum dos concretos contendo escória foram agrupados com o concreto de referência. Apesar do ensaio de determinação do módulo de elasticidade estático ser realizado pela compressão dos corpos-de-prova, a influência do agregado miúdo no concreto não foi semelhante àquela na resistência à compressão.

Os resultados demonstraram a influência expressiva gerada no módulo de elasticidade pela substituição do agregado miúdo, visto que todos os níveis de substituição

promoveram a sua redução, em 4,4%; 10,7%; 9,4%, aos 28 dias, enquanto aos 180 dias foi equivalente a 4,62%; 11,69% e 6,10%, para os teores de 25 %, 50% e 75% de escória, respectivamente.

Figura 66 - Médias do módulo de elasticidade dos concretos, com intervalo de confiança de 95%.

Fonte: Autoria própria.

Em virtude de todos os concretos com substituição terem apresentado a redução do módulo de elasticidade, pode-se atribuir essa redução a baixa rigidez do agregado de escória quando comparado ao agregado natural, uma vez que com o início do carregamento, é o agregado, o material mais rígido que compõe o concreto, que absorve a maior fração da solicitação e à medida que o agregado se deforma, parte de seu carregamento é transferido para a pasta de cimento. No entanto, se o agregado apresenta baixa rigidez, ele sofrerá deformações mais acentuadas, como neste caso em comparação com a areia, e reduzirá a resistência à deformação do concreto como um todo.

Tal afirmação pode ser justificada em função de algumas propriedades observadas na caracterização do agregado de escória, tais como a porosidade do agregado de escória, caracterizada tanto pelas imagens obtidas por lupa estereoscópica, a partir da qual foi possível observar uma textura porosa e irregular características de um material de alta absorvidade, quanto pelo elevado resultado de absorção de água apresentado pela escória, que demonstra a porosidade aberta e interconectada apresentada pelo material

ao permitir a livre entrada de água para o seu interior (Tabelas 19 e 20). Pode-se ainda, ser justificada pelo elevado valor obtido no ensaio de abrasão Los Angeles para a escória de aciaria LD, que demonstrou apresentar uma baixa resistência ao desgaste superficial, pela facilidade com que se deu a sua desintegração durante o ensaio.

Como uma análise acessória à discussão da rigidez dos concretos, e corroborando os resultados obtidos pelo módulo de elasticidade foram realizadas análises de esclerometria em elementos de concreto, que determinaram a dureza superficial do material (procedimento e resultados disponíveis em APÊNDICE G). Conforme exibido na Figura 67, a análise das duas propriedades, módulo de elasticidade e índice esclerométrico (IE), demonstra alta correlação entre ambos, com R^2 igual a 0,98.

Figura 67 - Relação entre módulo de elasticidade e índice esclerométrico dos concretos aos 91 dias.

Fonte: Autoria própria.

De modo semelhante, a influência gerada pela incorporação da escória no módulo de elasticidade, observa-se o decréscimo do IE com o aumento do teor de escória, devido a perda de resistência ao desgaste observado nos concretos. Deste modo, quanto menor for o valor do módulo de elasticidade, maior será a deformação do elemento de concreto e menor será a sua capacidade de suportar cargas sem que venha a ocorrer deformações definitivas, tornando imprescindível uma avaliação cuidadosa do efeito de sua dosagem para aplicações estruturais.

Tomando os resultados destes ensaios, foi criada a Tabela 27, a fim de comparar o desempenho dos concretos com agregado de escória ao concreto de referência.

Tabela 27 - Avaliação comparativa do desempenho dos concretos de escória.

Concreto	Trabalhabilidade	Res. à Compressão	Res. à Tração	Mód.Elasticidade
CE25	↑	↑	↑	↓
CE50	↓	↑	↑	↓
CE75	↓	↑	↓	↓

Fonte: Autoria própria.

Com base nessa avaliação, o concreto CE25 foi definido como a melhor dosagem realizada com uso de escória de aciaria LD, uma vez que a maioria das exigências, tanto no estado fresco, em termos de fluidez do concreto, quanto pela melhora nas propriedades mecânicas, foram satisfeitas para esta composição, de 25% de substituição de areia natural por escória de aciaria LD. No entanto, devido à semelhança dos resultados obtidos entre os concretos CE25 e CE50, e aos benefícios ambiental e econômico possíveis de serem alcançados pelo uso de escória em quantidades superiores, ambos foram selecionados para a realização de uma segunda etapa de dosagem, objetivando verificar o efeito da escória na durabilidade do concreto.

5.3.2. Resultados da caracterização da durabilidade dos concretos

Nesta seção são apresentados os resultados das análises de durabilidade dos concretos CR, CE25 e CE50, quanto aos ensaios realizados de resistividade elétrica, velocidade de propagação de ultrassom, absorção de água e índice de vazios, carbonatação acelerada e migração de cloretos no estado não-estacionário.

5.3.2.1. Massa específica

Os resultados obtidos de massa específica dos concretos foram submetidos a ANOVA, após 91 dias de hidratação, conforme apresentados na Tabela 28, em que foi avaliado o comportamento do concreto frente a incorporação da escória de aciaria LD.

Tabela 28 - Resultados da análise de variância realizada com os dados da massa específica real.

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	p	Resultado
Modelo	61,00	1	61,00	1829883,00	5,99	0,0	Significativo
Teor de substituição	0,0026	2	0,0013	39,00	5,14	0,0003	Significativo
Erro	0,0002	6	0,00003				
Total	61,00	9	60,997				
R: 0,96 R ² : 0,93							

Fonte: Autoria própria.

Seguida a análise de variância foi realizada a comparação múltiplas das médias, de acordo com o exibido na Figura 68, com a divisão em grupos estatisticamente iguais. Os resultados obtidos são altamente condizentes com as expectativas. Apesar de agregados porosos e absorventes apresentarem relativamente baixos valores de massa específica, as escórias de aciaria apresentam valores superiores, em função da presença de altos teores de óxido de ferro e até mesmo partículas de ferro em sua composição. Tal fato é observado diretamente nas propriedades do concreto (PALANKAR et al. 2015; KAMBOLE et al., 2017; JIANG et al., 2018).

Figura 68 - Médias de massa específica real dos concretos.

Fonte: Autoria própria.

5.3.2.2. Absorção de água e índice de vazios

Os resultados obtidos do ensaio de absorção de água por imersão fornecem informações que permitem ser correlacionadas com a porosidade total do concreto, principalmente por representarem a porosidade aberta do concreto que permite o livre transporte de água para seu interior. O resultado da ANOVA é apresentado na Tabela 29, para a qual foram avaliados como efeitos teor de substituição e a idade dos concretos.

O modelo da análise de variância foi significativo, com coeficiente de determinação igual a 0,98. É possível verificar que o fator idade é o fator mais significante na absorção dos concretos, isso se dá pois durante a hidratação a porosidade capilar do concreto tende a ser reduzida à medida em que haja a formação de produtos de hidratação como o C-S-H, uma vez que a formação dos compostos hidratados preenche gradativamente os poros capilares, diminuindo, assim, a dimensão e a interconexão dos poros. Assim com o aumento do grau de hidratação, o acesso de água ao sistema de poros é reduzido.

Tabela 29 - Resultados da análise de variância para os dados individuais da absorção de água por imersão.

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	p	Resultado
Modelo	281,89	1	281,89	42602,3	4,8	0,0	Significativo
Idade	2,96	1	2,96	447,5	4,8	0,0	Significativo
Teor de substituição	0,98	2	0,49	74,4	3,9	0,0	Significativo
Idade*Teor	0,013	2	0,01	0,99	3,9	0,40	Não significativo
Erro	0,079	12	0,01				
Total	285,9	18	285,4				

R: 0,99 R²: 0,98

Fonte: Autoria própria.

Em função da alta correlação ($R^2 = 0,99$), Figura 69, a análise dos parâmetros de absorção de água e índice de vazios (APÊNDICE H) foram feitas de maneira unificada, uma vez que o índice de vazios se trata de um resultado direto da absorção medida.

Figura 69 - Correlação entre absorção capilar e índice de vazios, com 95% de confiança.

Fonte: Autoria própria.

Deste modo, na Figura 70 é exibido o gráfico que contém a divisão das médias de absorção dos concretos em grupos estatisticamente iguais, com base na comparação múltipla das médias, realizada pelo teste de Duncan.

Verifica-se que os concretos foram agrupados de maneiras diferentes nas duas idades. Aos 28 dias, os concretos CR, CE25 e CE50 foram divididos individualmente em três grupos distintos. Ao passo que após 91 dias de cura, os concretos foram divididos em dois

grupos, um formado pelos concretos CR e CE25, e o outro pelo CE50. O mesmo comportamento foi observado para as médias do índice de vazios.

Figura 70 - Médias de absorção de água dos concretos, nas idades de 28 e 91 dias.

Fonte: Autoria própria.

Em comparação ao concreto de referência, os concretos com escória apresentaram acréscimos de 4% e 14%, aos 28 dias, 1,5% e 14%, aos 91 dias, na absorção de água para os concretos CE25 e CE50, respectivamente. É possível verificar pelos resultados que com o passar do tempo há a densificação da matriz cimentícia, com a formação de produtos de hidratação nos poros capilares, e que após 91 dias de cura os resultados apresentam uma baixa variabilidade em função da estrutura porosa do concreto já estar consolidada, sofrendo muito pouca alteração a partir deste momento (MEHTA, MONTEIRO, 2006).

Ainda que seja verificado o acréscimo da absorção dos concretos, em termos práticos para a engenharia, os resultados de absorção são consideravelmente próximos. Isto pode ser observado tanto pelo acréscimo percentual das médias, quanto quando as médias são avaliadas segundo os critérios do boletim informativo do CEB-192¹ (1989 apud CASCUDO, 1997), que associa o percentual de absorção de água a qualidade dos concretos

¹ COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETÓN (CEB). Bulletin d'Information, n. 192, Paris, 1989.

analisados, conforme divisão apresentada no gráfico. Segundo esta associação os concretos CR, CE25 e CE50, podem ser classificados como concretos de qualidade média pois apresentam percentual de absorção entre 3% e 5%. Enquanto, valores de absorção abaixo de 3% caracterizam um concreto de qualidade boa, acima de 5% a qualidade é pobre.

Não obstante ao discutido, é evidente o aumento da porosidade aberta do concreto mediante a substituição parcial da areia por escória. Isto posto, pode-se compreender que a absorção total do concreto se deu em função da incorporação de uma fase mais porosa, dada as características da escória. Ao secar os concretos a 105°C, toda água absorvida em seu interior é removida, incluindo a água presente no interior dos grãos de escória; à medida que é realizada a imersão dos corpos de prova, estes são saturados e todos os vazios apresentados por eles são preenchidos por água, o que igualmente engloba os poros presentes na escória. Em termos de resistência à compressão, este efeito pôde ser observado quanto à absorção d'água pelo agregado na zona de transição, diminuindo a porosidade local.

5.3.2.3. Resistividade elétrica superficial

Os resultados das análises de resistividade elétrica dos concretos nas idades de 7, 14, 28 e 91 dias foram submetidos à análise de variância tomando como efeitos avaliados o teor de substituição da areia e a idade de cura dos concretos. Cabe ressaltar que o grau de umidade presente nos poros dos concretos não foi um fator avaliado, dado que as mesmas condições de umidade foram mantidas para todos durante a cura e a execução das medidas. Os resultados são exibidos na Tabela 30.

O modelo da análise de variância mostrou-se significativo, com elevado coeficiente de determinação. Para o qual, todos os efeitos avaliados são variáveis estatisticamente significativas para explicar o comportamento dos concretos quanto a resistividade elétrica. A idade de cura corresponde ao fator mais significativo na variação da resistividade do concreto, quando comparado aos teores de escória utilizados no concreto. Tendo um maior número de idades avaliadas a evolução da resistividade ao longo do tempo demonstra de maneira mais clara a influência do tempo de cura.

Tabela 30 - Resultados da análise de variância realizada com os dados individuais da resistividade elétrica.

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	p	Resultado
Modelo	44448,62	1	44448,62	25697,62	3,95	0	Significativo
Idade	3081,73	3	1027,24	593,89	2,71	0	Significativo
Teor de substituição	635,00	2	317,50	183,56	3,10	0	Significativo
Idade* teor	73,75	6	12,29	7,11	2,21	0,00003	Significativo
Erro	164,32	95	1,73				
Total	48403,42	107,00	45807,39				
R: 0,98 R ² : 0,96							

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que o efeito que relaciona o teor de substituição e a idade de cura (idade*teor) se mostrou significativo na resistividade elétrica do concreto. Tal fato demonstra que o efeito teor de escória é significativo e é afetado pela idade de cura do concreto de maneira que com o aumento da idade o efeito é mais significativo, como é possível verificar aos 91 dias, quando o concreto CE50 tem a maior amplitude em relação ao CR (Figura 82).

Em face das médias globais de todas as idades, foi realizada a comparação múltiplas das médias, pelo teste Duncan, exibida na Figura 71, com a divisão em grupos estatisticamente iguais. Em virtude da influência do teor de substituição de areia, para todas as idades avaliadas, de 7, 14, 28 e 91 dias, identificadas no gráfico com cores distintas, não houve o agrupamento dos concretos entre si, de modo que, nas quatro idades os concretos foram divididos em grupos individuais, nos quais se encontram: Grupo 1 – CR, Grupo 2 – CE25 e Grupo 3 – CE50.

Observa-se o aumento da resistividade ao longo do período de cura dos concretos para todas as dosagens em função das alterações microestruturais do concreto ocasionados pelo desenvolvimento das reações de hidratação e densificação da matriz cimentícia. No entanto, quando comparadas ao concreto de referência, em todas as idades analisadas, acompanhando o aumento do teor de escória nos concretos, se deu a redução da resistividade elétrica superficial das demais dosagens. De modo que a escória tornou o concreto menos resistivo. Os concretos CE25 apresentaram uma redução da resistividade entre 8 a 10%, enquanto o concreto CE50 apresentou o pior comportamento, com quedas de resistividade variando entre 22 a 28%, em comparação com o concreto de

referência. De modo geral, a resistividade elétrica do concreto é utilizada na tentativa de descrever a capacidade do concreto de resistir à movimentação de íons no interior de sua microestrutura, a fim de identificar as suas propriedades condutoras.

Figura 71 - Médias de resistividade elétrica dos concretos, nas idades de 7, 14, 28 e 91 dias.

Fonte: Autoria própria.

Assim sendo, os resultados de resistividade elétrica dos concretos com escória de aciaria podem ser compreendidos sob duas ópticas principais: quanto à porosidade do concreto e quanto a condutividade elétrica da solução aquosa nos poros do concreto. O concreto com uma microestrutura porosa, com maior grau de poros interconectados, resulta em maior permeabilidade e consequentemente em concretos menos resistivos.

Como visto a partir da absorção de água dos concretos, por uma estimativa da estrutura de poros abertos do concreto, em geral, os concretos com escória mostraram-se mais porosos, em comparação com os concretos de referência de modo que há uma maior facilidade à passagem de corrente elétrica no concreto.

Outra provável explicação está relacionada às alterações iônicas na solução do poro. Como a resistividade elétrica é influenciada pela difusividade de íons na estrutura porosa do concreto, uma maior concentração de íons na solução aquosa dos poros do concreto significa uma menor resistividade. Nesse sentido, as escórias podem contribuir com a

capacidade da solução do poro em conduzir corrente elétrica devido ao movimento relativo de íons presentes na solução, principalmente pelo aporte de íons de cálcio oriundos tanto de CaO , quanto de Ca(OH)_2 , considerados eletrólitos fortes² por possuírem alta capacidade de dissociação em solução, o que dá origem a uma solução de alta condutividade ao fornecer íons como os OH^- , Ca^{2+} (ATKINS; JONES; LAVERMAN, 2018). Ademais, deve-se ressaltar que a escória possui um baixo teor de álcalis (K^+ e Na^+), cujos valores de condutividade elétrica da solução geram grande influencia, quando em presença destes, demonstrando, assim, que a concentração iônica na solução aquosa dos poros do concreto é influenciada pelos íons anteriormente citados.

Ainda que as dosagens contendo escória tenham reduzido a resistividade elétrica quando comparados à dosagem de referência, cabe ressaltar que os valores obtidos aos 91 dias são superiores a 20 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$, conforme apresentado no gráfico, valor a partir do qual a probabilidade de corrosão dos concretos é considerada desprezível, segundo boletim informativo CEB-192 e conforme a norma AASHTO TP 95, que apresenta a relação entre a resistividade elétrica e a capacidade de resistência dos concretos à penetração de íons cloreto, aos 91 dias os concretos apresentam baixa penetrabilidade de íons cloreto em sua estrutura porosa por apresentarem resistividade entre 21 - 37 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$.

5.3.2.4. Velocidade de propagação de onda ultrassônica

Como apresentado na Tabela 31, o modelo da análise de variância para os resultados da análise de velocidade de propagação de onda ultrassônica, nas idades de 7, 14, 28 e 91 dias, mostrou-se significativo, com coeficiente de determinação igual a 0,68, sendo os efeitos avaliados, idade e teor de substituição, variáveis estatisticamente significativas e influentes no comportamento dos concretos.

² Um eletrólito forte é uma substância que está presente quase totalmente na forma de íons em solução, tais como bases fortes, que correspondem a íons hidróxidos e óxidos fornecidos pelos óxidos de metais alcalinos e alcalino-terrosos, como o óxido de cálcio e o hidróxido de cálcio (ATKINS; JONES; LAVERMAN, 2018).

Tabela 31 - Resultados da análise de variância para os dados individuais da velocidade de pulso ultrassônico.

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	p	Resultado
Modelo	2,56. 10 ⁹	1	2,56. 10 ⁹	112560	3,94	0,0	Significativo
Idade	236312,03	3	78770	35	2,71	0,0	Significativo
Teor de substituição	207310,8	2	103655	46	3,10	0,0	Significativo
Idade* teor	2626,04	6	437,7	0	2,1	0,98	Não significativo
Erro	214029,8	94	2277				
Total	660278,6	105	185140,7				
R: 0,82 R ² : 0,68							

Fonte: Autoria própria.

A Figura 72 exibe o gráfico que relaciona a velocidade de pulso ultrassônico ao longo das idades, com base nos resultados de comparação múltipla de médias. Com base nos resultados apresentados no gráfico, para todas as idades avaliadas, de 7, 14, 28 e 91 dias, identificadas no gráfico com cores distintas, verifica-se a divisão dos concretos em dois grupos, isto significa que nas quatro idades os concretos CR e CE25 compuseram o Grupo 1, enquanto o concreto CE50, o Grupo 2.

Figura 72 - Médias da velocidade de pulso ultrassônico dos concretos.

Fonte: Autoria própria.

É notório que em função do aumento da idade de hidratação são obtidas velocidades de propagação mais altas, uma vez que ao longo do tempo há o desenvolvimento de uma matriz cimentícia sólida e a propagação de onda na estrutura sólida do concreto ocorre mais rapidamente em função das alterações microestruturais do concreto ocasionados pelo desenvolvimento das reações de hidratação e densificação da matriz.

A qualidade dos concretos pode ser classificada segundo a norma BS EN 12504-4:2000 que demonstra a qualidade do concreto segundo os valores obtidos de VPU, conforme exibido na Tabela 1. Para tal, os concretos em todas as idades e para todas as dosagens são considerados excelentes.

Apesar de divididos em grupos distintos, os concretos apresentaram médias globais notoriamente semelhantes. No entanto, estatisticamente diferentes e, assim, um perfil de tendência pode ser observado, à medida que há o acréscimo do teor de escória nos concretos, verifica-se a redução da velocidade de propagação.

Este efeito é prontamente compreendido quando se discute a substituição da areia por um material de superior capacidade de absorção, ou seja, com porosidade superior. Quando emitido um pulso de onda ultrassônica em uma das extremidades do concreto, seu percurso se dará em um tempo mais curto quanto mais denso for o concreto, para isso considera-se o concreto como um todo, incluindo os seus agregados. Se os agregados apresentam porosidade superior, menor será a facilidade com que o pulso se propaga, podendo se considerar que os vazios atuem como barreiras ao seu deslocamento, de modo que menor será a sua velocidade de propagação.

Ao se verificar a existência de uma relação entre a velocidade de propagação de onda ultrassônica e a absorção de água por imersão, Figura 73, nota-se uma elevada correlação linear (R^2 igual a 1) entre os resultados dos concretos estudados. Observa-se que entre as duas variáveis obtêm-se uma correlação negativa, pois à medida que é aumentada a porosidade do concreto, e assim a absorção total de água, a velocidade de propagação do pulso é reduzida. Exatamente o efeito anteriormente discutido.

Figura 73 - Correlação entre absorção de água e velocidade de pulso ultrassônico dos concretos.

Fonte: Autoria própria.

5.3.2.5. Carbonatação acelerada

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado ao longo de 28 dias, com medidas nas idades de 7, 14 e 28 dias. A profundidade de carbonatação medida para os corpos de prova obtida na primeira idade, aos 7 dias, foi considerada desprezível para todas as dosagens, conforme exibido na Figura 74.

Figura 74 - Medida da profundidade de carbonatação aos 7 dias.

Fonte: Autoria própria.

A cor avermelhada na superfície do corte representa o concreto não carbonatado, dado que não ocorreu a viragem da fenolftaleína, pois o pH do meio se manteve superior a 9,5. Verifica-se que a difusão dos CO_2 no interior do concreto não ocorreu com

velocidade que provocasse a carbonatação interna dos mesmos, disso se entende a ocorrência das etapas de transporte em solução do CO_2 através da matriz cimentícia, a dissolução da portlandita e a precipitação do CaCO_3 .

Como é possível observar na Figura 75, após 14 dias na câmara de ensaio os concretos começaram a apresentar um discreto avanço da frente carbonatação. As regiões incolores que circundam a superfície de corte do corpo de prova representam a região carbonatada, dada a redução do pH do meio. A partir desta idade foi possível medir a profundidade de carbonatação dos concretos, ainda que com uma certa dificuldade devido à estreita região observada. No entanto, é notório que o tempo de exposição é um fator de influência.

Figura 75 - Medida da profundidade de carbonatação aos 14 dias.

Fonte: Autoria própria.

Após 28 dias, Figura 76, as amostras de concreto apresentam profundidade de carbonatação relativamente mais nítidas, entretanto, não distribuídas de maneira uniforme. Não obstante tenha sido executado o procedimento de pré-condicionamento segundo normalizado pela ISO 1920-12, este pode não ter sido suficiente para que se desse a distribuição homogênea da umidade no interior do concreto.

Figura 76 - Medida da profundidade de carbonatação aos 28 dias.

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 32 são apresentados os resultados obtidos na ANOVA dos valores de profundidade de carbonatação nas idades de 7, 14 e 28 dias.

Tabela 32 - Resultados da análise de variância realizada com os dados individuais de carbonatação.

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	p	Resultado
Modelo	1462,14	1	1462,14	1779,12	3,92	0,0	Significativo
Idade	966,59	2	483,29	588,07	3,07	0,0	Significativo
Teor de substituição	8,19	2	4,09	4,98	2,44	0,0082	Significativo
Idade* teor	18,89	4	4,72	5,75	2,44	0,00028	Significativo
Erro	106,02	129	0,82				
Total	2561,83	138,0	1955,08				
R _{mod} : 0,95 R ² _{mod} :0,90							

Fonte: Autoria própria.

A análise mostrou que o modelo é significativo, com valor de F_{cal} superior do que o F_{tab}, e alto valor do coeficiente de determinação do modelo, R²_{mod} = 0,9, o que significa que 90% da variação dos dados é explicado por ele.

Segundo o modelo, todos os fatores avaliados resultaram estatisticamente significativos, sendo a idade o mais influente na profundidade de carbonatação, tendo em sequência o fator teor de substituição, como é possível verificar inclusive pela análise de comparação múltipla de médias, dado que o efeito da incorporação de escória é diferente em função da idade do concreto, Figura 77.

Figura 77 - Médias da profundidade de carbonatação concretos, nas idades de 14 e 28 dias.

Fonte: Autoria própria.

Apesar de previamente submetidos a análise e exclusão de valores espúrios, se observou uma certa dispersão quanto à profundidade de carbonatação apresentada pelos concretos. Quando comparados, aos 14 dias, nota-se que o concreto CE25 apresentou uma profundidade de carbonatação 4% inferior ao CR, se mantendo estatisticamente iguais, enquanto o CE50 teve um acréscimo de 28%.

Aos 28 dias, CE25 e CE50 apresentaram superior profundidade de carbonatação, equivalente a 31% e 24%, respectivamente, em relação ao CR. Devido a elevada dispersão dos valores obtidos, a discussão acerca de uma relação direta entre os concretos é dificultada, de modo que se torna possível afirmar apenas que existe uma tendência de elevação da profundidade de carbonatação com o aumento do teor de escória, como é possível verificar aos 28 dias.

Em face dos resultados de profundidade de carbonatação acelerada, após 28 dias, pôde-se avaliar a vida útil dos concretos estudados sem aprofundar a discussão no mérito dos fenômenos de corrosão dos concretos, mas tomando as informações de profundidade carbonatada para se realizar uma análise complementar.

Essa avaliação considera o efeito da carbonatação como uma patologia limitante para o seguro emprego do concreto com armadura. Dado que a carbonatação é um dos principais fenômenos de indução de corrosão das armaduras, compreende-se que quando a frente carbonatada atinge a armadura, ou seja, se iguala à espessura de cobrimento do

concreto (25mm), se inicia o processo de propagação da corrosão, tornando a armadura altamente vulnerável (TUUTTI, 1982). A vida útil dos concretos foi aferida empregando o modelo de Tuutti (1982), obtida segundo as Equações 12 e 13:

$$k_c = ec / (t)^{1/2} \quad (12)$$

$$VU = (ec/k_c)^2 \quad (13)$$

Para as quais, k_c = coeficiente de carbonatação natural médio obtido para cada concreto [$\text{mm/ano}^{0,5}$]; ec = espessura de cobrimento, igual a 25 mm; t = tempo de exposição a carbonatação [anos]; VU = vida útil [anos].

Na Figura 78, o gráfico apresenta os resultados da estimativa da vida útil dos concretos em função da profundidade carbonatada.

Figura 78 - Estimativa de vida útil dos concretos estudados.

Fonte: Autoria própria.

Pela análise de vida útil, claramente se observa a diferença entre o concreto de referência e os concretos com incorporação de escória. O concreto CR apresenta vida útil estimada em 123 anos, enquanto os concretos com escória apresentam 68 e 84 anos, para CE25 e CE50, respectivamente. Ou seja, o período entre a iniciação da corrosão, pela

transposição do agente agressivo na camada de cobrimento, e da propagação da corrosão, com formação de óxidos e hidróxidos oriundos da armadura que geram fissuração do concreto e a perda de aderência aço-concreto é reduzido pela presença de escória, o que acarreta a diminuição da capacidade funcional da estrutura.

Isto posto, vale ressaltar que o objetivo da análise de projeção da vida útil dos concretos diante da profundidade de carbonatação foi demonstrar de maneira acessória características tecnológicas para a avaliação da durabilidade dos mesmos quanto a este fenômeno estudado.

5.3.2.6. Análise da solução do poro

Além de auxiliar na discussão a respeito dos resultados de carbonatação, a análise da solução do poro teve como finalidade dar respaldo à compreensão do comportamento dos concretos quanto à sua resistividade elétrica e quanto a resistência à migração de íons cloreto em seu interior.

Na Tabela 33 são exibidos os resultados do potencial hidrogeniônico e da condutividade elétrica obtidos pela análise da solução do poro dos concretos CR, CE25 e CE50, sob duas condições de análise: 1) não carbonatado (NC) e após 28 dias de carbonatação acelerada (C). Inicialmente, o objetivo era avaliar comparativamente a solução do poro em todas as idades analisadas (7, 14 e 28 dias), entretanto, as finas espessuras de camadas carbonatadas aos 14 dias impossibilitaram a extração de amostras, bem como aos 7 dias.

Tabela 33 - Valores do pH e da condutividade elétrica da solução do poro dos concretos com e sem carbonatação.

Concreto	Condição	pH	Condutividade [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
CR	NC	12,36	6,74
	C	10,08	0,53
CE25	NC	12,38	6,95
	C	10,87	0,62
CE50	NC	12,39	7,24
	C	10,86	0,7

Fonte: Autoria própria.

Quando comparados os valores de pH da solução intersticial dos concretos sem carbonatação, verifica-se que alterações pouco significativas foram geradas pelo emprego de escória, de modo que se obteve apenas um leve aumento do pH. Esse acréscimo pode ser justificado pelo aumento do Ca(OH)_2 na solução do poro, liberado pela escória, o que provoca o aumento do pH da solução intersticial.

Após a carbonatação, entretanto, tornaram-se evidentes as modificações no pH do líquido intersticial, provocadas pela ação do CO_2 gasoso e pelo consequente consumo da reserva alcalina, conforme mais bem verificado sob a forma de gráfico na Figura 79. Vale ressaltar que após a carbonatação não houve grande diferença entre o pH dos concretos com escória e o de referência.

Apesar de discreto, é possível notar que os concretos CE25 e CE50 possuem valores superiores de condutividade elétrica quando comparados ao CR. Observa-se que o concreto com maior teor de substituição apresenta a maior condutividade elétrica, igual a $7,2 \mu\text{S/cm}$, e equivalente a 7,4% superior ao concreto de referência.

Figura 79 - Valores de pH, à esquerda, e de condutividade elétrica da solução do poro, à direita, para os concretos com e sem carbonatação.

Fonte: Autoria própria.

Os resultados são altamente coerentes com os obtidos para a resistividade elétrica dos concretos, que apontaram a redução da resistividade com o incremento do teor de escória, dado que a condutividade pode ser entendida como o inverso da resistividade. A condutividade elétrica da solução do poro dos concretos foi alterada em função de dois

principais fatores, sendo estes o aumento da concentração iônica na solução e a condutividade dos íons presentes, conforme apresentado na Tabela 34.

Posteriormente à carbonatação, a condutividade elétrica dos concretos é reduzida drasticamente, mas ainda se mostra superior para o concreto CE50. A redução da condutividade é resultado da redução da concentração de íons dissolvidos na solução do poro em função da precipitação dos mesmos sob a forma de composto mais estáveis (como carbonatos) e, por conseguinte, colmatagem dos poros superficiais e redução da porosidade dos concretos na camada carbonatada, dado que os carbonatos ocupam parcialmente os vazios capilares.

Tabela 34 - Concentração dos íons presentes na solução.

Concreto	Condição	[OH ⁻]	[Ca ²⁺]	[SO ⁴⁻]	[Na ⁺]	[K ⁺]
		[mol/L]				
CR	NC	2,3.10 ⁻²	4,6.10 ⁻³	9,6.10 ⁻⁴	1,3. 10 ⁻⁴	1,02. 10 ⁻⁴
	C	1,2.10 ⁻⁴	1,3.10 ⁻³	4,2. 10 ⁻⁴	-	-
CE25	NC	2,4.10 ⁻²	6,6.10 ⁻³	4,1. 10 ⁻⁴	1,3. 10 ⁻⁴	1,3. 10 ⁻⁴
	C	7,41.10 ⁻⁴	2,9.10 ⁻³	3,5. 10 ⁻⁴	-	-
CE50	NC	2,5.10 ⁻²	1,70.10 ⁻²	4,2. 10 ⁻⁴	1,7. 10 ⁻⁴	1,5. 10 ⁻⁴
	C	7,24.10 ⁻⁴	1,2.10 ⁻³	3,5. 10 ⁻⁴	-	-

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os valores exibidos na Tabela 34, destaca-se o aumento do teor de cálcio na solução do poro, que inicialmente estaria presente no material sob a forma de óxido de cálcio e de hidróxido de cálcio, formas solúveis em água, que conferem valores de condutividade elétrica bastante expressivos à solução.

Quanto à quantidade de íons OH⁻ em solução, verifica-se um acréscimo sutil à medida que há o incremento de escória nos concretos, fato que justifica a alteração pouco significativa no pH da solução intersticial dos concretos. Quanto ao teor de álcalis dos concretos, não foi observado um efeito expressivo quanto ao uso de escória, dado que a escória de aciaria apresentou em sua composição baixos teores de álcalis (Na, K). Em função dos teores de álcalis serem muito próximos ao limite do equipamento (fotômetro

de chamadas) antes da carbonatação, não foi possível obter o valor dos mesmos pós-carbonatação, dada a redução destes teores.

Como efeito da carbonatação, a concentração de CaO e íons OH^- diminuiu consideravelmente, atingindo uma ordem de grandeza de 10^{-4} para o OH^- , fato que demonstra claramente a redução de íons dissolvidos na solução do poro dos concretos após a carbonatação.

5.3.2.7. Migração de cloretos no estado não estacionário

A análise da resistência a migração de cloretos dos concretos foi realizada após 91 dias de cura do concreto e os resultados foram submetidos à análise de variância tomando como efeito avaliado o teor de substituição da areia. Os resultados são exibidos na Tabela 35.

Tabela 35 - Resultados da análise de variância para os dados individuais do coeficiente de migração de cloretos.

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	p	Resultado
Modelo	1116,23	1	1116,23	1381,49	5,99	0,0	Significativo
Teor de substituição	12,30	2	6,15	7,61	5,14	0,023	Significativo
Erro	4,85	6	0,81				
Total	1133,38	9	1123,19				
R: 0,85 R ² :0,72							

Fonte: Autoria própria.

É verificado na Tabela que os resultados da ANOVA evidenciaram como significativo o modelo e o efeito teor de substituição, para justificar o distinto comportamento dos concretos quanto à resistência à migração de cloretos. O resultado da análise de comparação múltipla de médias Duncan é exibido na Figura 80.

Nesse caso, nos gráficos gerados, os valores de desvio-padrão foram encobertos pelos valores limites dos intervalos de confiança (95%), por serem inferiores a estes, não sendo, por isso, exibidos no gráfico.

São apresentados ainda a classificação dos concretos quanto à sua resistência à penetração de íons cloro, pela separação das linhas horizontais, conforme proposto por

Nilsson, Ngo e Gjrv³ (1998, apud TEODORO, 2016) quanto à resistência à penetrao de cloretos avaliada a partir dos resultados do ensaio prescrito pela NTBUILD 492. Segundo esta classificao, os concretos CE25 e CE50 apresentam resistência à penetrao entre alta e moderada, enquanto o concreto de referência, resistência moderada.

Figura 80 - Médias do coeficiente de migrao de cloretos.

Fonte: Autoria própria.

De maneira oposta ao que vem sendo observado, os resultados indicam que os concretos compostos de escória apresentam um coeficiente de migrao inferior quando comparados ao de referência, que para ambos, CE25 e CE50, equivalem a uma reduo de 19%.  vlido ressaltar que em um concreto com coeficiente de migrao mais baixo a velocidade de migrao dos ons de cloro no seu interior ser igualmente inferior.

Os resultados do coeficiente de migrao de cloretos dos concretos com escória de aciaria LD ligeiramente inferiores ao concreto de referência, diferem dos resultados das demais propriedades relacionadas, tais como a resistividade elétrica superficial, que se mostrou declinante à medida em que se realizou o acréscimo de escória, o que torna o

³ NILSSON, L.-O.; NGO, M. H.; GJRV, O. E. High-performance repair materials for concrete structures in the port of Gothenburg. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE UNDER SEVERE CONDITIONS - ENVIRONMENT & LOADING, 2.; 1998. **Proceedings ...** London, 1998. p. 1193-1198.

resultado da migração de cloretos, por sua vez, controverso, dada a maior facilidade à condução elétrica de íons nos concretos de escória, como apresentado na Tabela 33.

Tal comportamento pode ser atribuído pela fixação dos íons cloro pela escória e/ou por compostos hidratados resultantes de reações superficiais da escória ou pela formação do sal de Friedel, composto estável denominado como cloroaluminato de cálcio hidratado, a partir das reações entre íons cloro e compostos da escória, tal como sugerido em outras pesquisas.

5.3.2.8. Avaliação da microestrutura e composição mineralógica de fases após ataque por cloretos por MEV e DRX.

A fim de verificar a fixação do cloreto a partir da formação de Sal de Friedel nos concretos atacados, foram realizadas análises por difratometria de raios X nos concretos atacados CR, CE25 e CE50, e no concreto não atacado de referência CR, para que este servisse como parâmetro comparativo das fases constituintes dos concretos.

Como citado anteriormente, o Sal de Friedel é um cloroaluminato de cálcio hidratado, correspondente à fase hidrocalomita, composto que ocorre, principalmente, nas posições angulares (2θ) entre $11,16^\circ$ e $11,33^\circ$, distância interplanar basal igual a $7,9\text{\AA}$. A decisão de analisar o concreto de referência não atacado se deu devido a algumas fases cristalinas de aluminatos de cálcio hidratado também ocorrem na mesma região no difratograma, o que poderia confundir os resultados da análise por DRX.

Os difratogramas individuais são apresentados no APÊNDICE O e P. Os difratogramas evidenciaram grande semelhança entre os concretos. Nos quais foram identificadas a presença de quartzo (SiO_2), portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$, periclácio (MgO), gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), silicato de cálcio hidratado [tobermorita ($\text{Ca}_5(\text{OH})_2\text{Si}_6\text{O}_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)], fases não hidratadas do cimento [alita (C_3S)], a calcite (CaCO_3), fase característica do agregado graúdo [albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)] para todas as dosagens com e sem ataque, sendo estas fases plausíveis de serem verificadas em uma pasta de cimento hidratada.

A principal diferença se deu pela identificação da fase hidrocalumita (Sal de Friedel) nos concretos com ataque de cloretos. Na Figura 81 é exibido o difratograma de raios X comparativo dos concretos que foram atacados por cloretos e do concreto CR não atacado para possibilitar a distinção entre o sal de Friedel e a possível ocorrência de aluminatos

identificáveis na faixa descrita para o concreto sem ataque. No gráfico, a linha tracejada, indica a fase cristalina de referência da hidrocalumita próximo ao ângulo 2θ igual a $11,2^\circ$.

Verificou-se que não há a ocorrência de nenhuma fase cristalina no intervalo angular especificado para o concreto CR não atacado por cloretos. De modo que, apesar de bastante discreta, foi possível observar a presença de hidrocalumita tanto na amostra de referência quanto nas dosagens contendo escória após o ataque, o que demonstra certa capacidade de fixação de cloretos por estes materiais. No entanto, como a análise foi empregada de maneira qualitativa não foi possível aferir em que proporção essa fixação ocorre. De modo que apenas admite-se que as fases cristalinas identificadas no concreto atacado podem ser correspondentes ao sal de Friedel.

Figura 81 - Difratograma comparativo dos concretos, com foco no intervalo angular da hidrocalumita.

Fonte: Autoria própria.

Para corroborar os resultados obtidos por difratometria de raios X quanto à ocorrência do Sal de Friedel nos concretos atacados com cloreto, foram realizadas análises por microscopia eletrônica de varredura para a avaliação de compostos hidratados na pasta de cimento com base na análise morfológica, complementada por microanálises, utilizando microsonda EDS.

As evidências apontadas por difratometria foram também possíveis de verificar por MEV, pelo qual se percebe a formação de precipitados que, de acordo com a composição química obtida pela análise de EDS, se assemelham ao sal de Friedel. Embora a hidrocalumita seja uma fase cristalina que apresente uma morfologia muito bem definida

quando cristalizada em condições favoráveis para a sua formação, quando formada após a hidratação da pasta de cimento, em ambiente confinado e sob diferentes condições, a hidrocalumita pode assumir uma morfologia diferente da comumente encontrada, o que traz certas dificuldades para a análise. Após extensiva busca, dada a precipitação pontual dos sais de Friedel, em amostras do concreto CR, CE25 e CE50, foram observados compostos precipitados que podem ser o cloroaluminato de cálcio hidratado, conforme exibidos nas Figuras 82 a 84.

Figura 82 - Micrografias obtida do concreto CR, com evidência do composto precipitado indicativo de sal de Friedel, segundo composição química por EDS.

Fonte: Autoria própria.

Figura 83 - Micrografias obtida do concreto CE25, com evidência de compostos precipitados indicativos de sal de Friedel, segundo composição química por EDS.

Fonte: Autoria própria.

Figura 84 - Micrografias obtida do concreto CE50, com evidência de compostos precipitados indicativos de sal de Friedel, segundo composição química por EDS.

Fonte: Autoria própria.

A análise por EDS aponta em todas as amostras a presença de carbono em razão do recobrimento das mesmas com uma fina camada carbono. Mesmo havendo a presença de silício, nenhuma fase contendo Ca, Al, Si e Cl foram identificadas por difratometria de raios X, sendo ademais, a hidrocalumita a única fase identificada com a presença de Cl.

A ocorrência do silício pode ser tanto resultado da substituição parcial do alumínio no cloroaluminato de cálcio hidratado, como pode ser em função da profundidade de radiação que penetra na superfície da amostra, o que pode gerar interferências relacionadas à composição de partículas adjacentes às de interesse, e da matriz de cimento hidratada que contenham silício, tais como o C-S-H ou o próprio SiO_2 . O mesmo resultado foi observado por Khater (2010), Talero (2012) e Teodoro (2016) no que tange a composição do sal de Friedel, que a partir da microanálise por EDS foram evidenciados, de maneira geral, a presença de cloro, cálcio, silício, alumínio, sódio e magnésio.

Embora não seja possível diferenciar que o sistema com escória de aciaria tenha capacidade de fixação de cloreto superior ou inferior, em comparação ao do concreto de referência pela formação de sal de Friedel, a capacidade de fixação da escória não pode ser descartada devido a observada redução do coeficiente de migração dos cloretos contendo escória, obtida no ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário em oposição ao aumento da condutividade dos concretos.

5.3.3. Ensaio de envelhecimento

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de envelhecimento acelerados e natural das argamassas oriundas dos concretos CR, CE25 e CE50, quanto às análises visuais, medidas de expansão, resistência à tração e compressão e análises de DRX, FRX e termogravimetria.

5.3.3.1. Envelhecimento por imersão

Medidas periódicas de expansão foram realizadas ao longo de 10 semanas e após esta idade foram obtidas apenas informações visuais. As barras de argamassa de concreto permaneceram imersas em água natural a 80 °C, com pH do meio inicialmente mantido na faixa de 7,0, garantindo a neutralidade. No entanto com o passar dos dias, pela dissolução do Ca(OH)_2 das argamassas de concreto, deu-se a elevação do pH da solução, em uma faixa de 8,5 a 10, conforme Figura 85.

Figura 85 - Alterações do pH ao longo das semanas do ensaio de envelhecimento por imersão.

Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 86 a 88, é exibida a evolução do processo de expansão observado nas barras de argamassa e a sua deterioração ao longo do ensaio. Como é possível observar nas imagens, logo nos primeiros dias verifica-se a influência dos componentes da escória, Figura 86.

Apesar da portlandita ser o hidrato mais solúvel da pasta de cimento, apenas nas barras contendo 50% de escória, originadas do concreto CE50 e, assim, contendo um teor superior de óxido de cálcio, foi observada a lixiviação da cal presente nas barras e a formação de eflorescências esbranquiçadas sobre a superfície dos corpos de prova. A eflorescência branca formada na superfície das barras corresponde à precipitação do carbonato de cálcio, proveniente tanto do contato da solução rica em íons Ca^{2+} com o CO_2 atmosférico, quanto da carbonatação da cal ainda presente nas barras.

O processo teve início com a dissolução progressiva da cal presente na escória, inicialmente apenas nas argamassas com maior teor de escória, evoluindo para as barras originadas do concreto CE25. Observa-se que após a etapa de lixiviação, através da porosidade das argamassas, tem-se a hidratação da cal livre provocando a formação de fissuras na superfície da argamassa em função do ganho de volume concernente a esse processo de hidratação e o destacamento de finas camadas da matriz de cimento. Faz-se relevante recordar aqui que a formação da portlandita confere um aumento volumétrico de quase 100% do volume inicial da cal, enquanto a hidratação do MgO acarreta um aumento de quase 120%. Estes fenômenos têm como decorrência o aumento da

porosidade e da permeabilidade e, conseqüentemente, a redução das propriedades mecânicas do material.

Figura 86 - Imagens que demonstram a deterioração das barras de argamassa entre 1 e 3 semanas. (a) e (b) eflorescência branca na superfície das argamassas CE50 e (c) CE25, observadas nas duas primeiras semanas; destacamento da argamassa nas amostras (d) CE50 e CE25 (e) e (f).

Fonte: Autoria própria.

Prosseguindo o ensaio, os efeitos da hidratação se tornaram mais graves. Nessa conformidade, as tensões expansivas levaram ao aumento do número de fissuras e à propagação das mesmas, de modo que camadas mais espessas de argamassa se destacaram dos corpos de prova, principalmente nas extremidades externas das barras, que sob à luz da ciência dos materiais são considerados defeitos interfaciais do material e assim regiões em que ocorre a concentração de tensões, o que facilita a perda de coesão do sólido.

Figura 87 - Imagens da deterioração das barras de argamassa entre 3 e 7 semanas. (a), (b) (c), (d) e (e) destacamento da argamassa CE50 e CE25; (f) detalhes da formação de calcita; (g) novos pontos de expansão e (h) visão geral das barras após oito semanas de ensaio.

Fonte: Autoria própria.

Ainda que inicialmente tenha-se obtido um resultado de maior relevância para as argamassas CE50, após a terceira semana de hidratação, as argamassas CE25 também apresentaram os mesmos efeitos, em menor intensidade, enquanto as argamassas de referência se mantiveram inalteradas. Este resultado indica que o aumento do teor de escória causa danos mais precoces e mais severos à microestrutura das argamassas. Não obstante a evolução dos fenômenos de hidratação observados desde a primeira semana de ensaio, novos pontos de expansão surgiram em diferentes posições ao longo das barras durante todo o período observado.

A começar da oitava semana, a degradação das argamassas de tornou altamente severa. Com o aumento da tensão gerada pela expansão, deu-se a conexão das fissuras e a desagregação da massa sólida, de maneira que uma das barras de CE50 aos 53 dias rompeu devido a expansão do agregado. Com dez semanas de ensaio, duas barras de CE50 já haviam rompido, ocorrendo na semana seguinte a fratura da terceira barra CE50 e de uma CE25. Fato que inviabilizou totalmente a obtenção das medidas de expansão das argamassas de concreto, que haviam sendo realizadas apenas para as barras de CR e CE25,

dado que as de CE50 apresentavam comprimento linear superior ao que equipamento de medição, e certa fragilidade que impossibilitava o seu manuseio.

As análises visuais foram interrompidas ao final de treze semanas, evidenciando o rompimento de todas as argamassas de CE50, de uma de CE25 e a inalterabilidade das argamassas de referência, que apresentaram apenas uma leve lixiviação superficial em função do contato com a água por período prolongado.

Figura 88 - Imagens da deterioração das barras de argamassa entre 9 e 13 semanas. (a) e (b) aumento da propagação das fissuras; (c) e (d) rompimento de duas barras CE50; (e) rompimento de todas as barras CE50; (f) visão geral das barras após onze semanas de ensaio, com rompimento de uma barra CE25; (g) detalhes da formação de calcita e (h) visão geral das barras após 13 semanas.

Fonte: Autoria própria.

Quanto à expansão linear apresentada pelas barras de argamassa, o resultado das medidas é exibido na Figura 89, pela qual é possível verificar a maneira como se deu a sua evolução em comparação ao limite de expansão (0,19%) normalizado pelo ensaio de reatividade álcali-agregado (NBR 15577-4), que apesar de ocorrer por efeitos distintos, permite classificar o agregado como um material expansivo potencialmente de reativo.

De modo geral, é correto considerar que a expansão apresentada pelas argamassas pode ser dividida em quatro fases: (i) a fase de expansão inicial, em que a expansão aumentou de 0 para 0,01% nos primeiros dias, causada principalmente pela expansão higrotérmica do material em função da imersão em água quente; (ii) a fase de expansão constante, para a qual a taxa de expansão apresentou pouca variação, passando de 0,012% a 0,02% e permanecendo praticamente inalterada até os 21 dias; (iii) a fase de propagação da expansão, em que a taxa de expansão aumentou rapidamente de 0,02% para 0,09% e (iv) fase de alta expansão, que culminou no início da desintegração das argamassas, a partir de 53 dias para as argamassas CE50 e de 56 dias para as argamassas CE25.

Figura 89 - Expansão linear das barras de argamassa.

Fonte: Autoria própria.

Embora ao longo do ensaio as argamassas de referência tenham apresentado uma pequena variação de seu comprimento linear, estes não são comparáveis aos valores obtidos para as argamassas contendo escória. Em linhas gerais, as argamassas de referência apresentaram variações de 0,005 a 0,04%, ao passo que as contendo escória

variaram entre 0,009 a 0,28% e 0,007 a 0,26% para as argamassas CE25 e CE50, respectivamente.

Vale ressaltar que as máximas expansões não foram observadas na mesma data para ambas argamassas, para a CE50 foi aos 53 dias de ensaio e, posteriormente, para CE25 aos 56 dias, resultado que indica que a escória de aciaria apresenta baixa estabilidade e que o aumento do teor de escória provoca a deterioração de maneira antecipada e mais severa do material.

Aos 56 dias foi observada para uma das barras de argamassa de referência a redução do seu comprimento linear, que acredita-se tratar de uma retração química comumente observada ao longo do processo de hidratação de materiais cimentícios, uma vez que o volume molar dos hidratos gerados é inferior à soma do volume molar dos compostos anidros e do volume de água disponível para a hidratação. Deve-se ressaltar que trata-se de um fenômeno não patológico e que, assim, não traz prejuízos à integridade do material (NONAT, 2014).

5.3.3.2. Envelhecimento cíclico

As barras de argamassa de concreto foram submetidas a 10 ciclos de imersão/emersão. Durante três dias as barras eram mantidas em água natural a 80 °C, com pH inicial do meio mantido na faixa de 7,0, que ao final da imersão evoluía para uma faixa de 10 - 11, e na sequência eram emergidas e secas em estufa ventilada a 80 °C.

De modo semelhante ao ensaio de envelhecimento acelerado, a deterioração das barras foi acompanhada e documentada por imagens. Entretanto, a deterioração das barras de argamassa de concreto foi significativamente inferior, quando comparada a obtido no ensaio anterior, como pode-se verificar nas Figuras 90 e 91.

Novamente, como observado na Figura 90, o primeiro fenômeno observado corresponde a lixiviação da cal e a formação de eflorescências sobre a superfície dos corpos de prova, claramente observados a partir da segunda semana de ensaio, apenas para barras de argamassa CE50. São igualmente observadas a formação e a propagação das fissuras, originadas pelo processo de expansão essencialmente nas extremidades e arestas das barras.

Figura 90 - Imagens da deterioração das barras de argamassa CE50 entre 2 e 6 semanas. (a), (b) e (c) destacamento superficial da argamassa; (d) destacamento de argamassa e propagação de fissuras na aresta da barra; (e) e (f) visão geral das barras após seis semanas de ensaio, com destacamento de argamassa em diversas posições dos corpos de prova; (g) segregação da extremidade de uma das barra.

Fonte: Autoria própria.

À medida que se conduzia a execução dos ciclos, resultados mais expressivos foram observados, quanto ao destacamento de camadas de argamassas, à desintegração de arestas das barras, bem como, a formação de novos pontos de expansão em diferentes posições ao longo das barras durante todo o período observado. Todos os fenômenos constatados até a nona semana foram característicos das argamassas CE50; a datar desta semana alguns efeitos evidentes foram notados nas argamassas CE25, como a perda pontual de camadas de argamassa, levando a exposição dos agregados e à geração de fissuras na superfície das barras.

Notadamente, ao final do ensaio, as barras de argamassa do ensaio de ciclagem sofreram impactos visuais inferiores ao do método acelerado, Figura 91. Tal fato pode se dar pelas características dimensionais do corpo de prova, sendo as barras de imersão/emersão mais robustas comparadas as outras.

Figura 91 - Imagens da deterioração das barras de argamassa entre 7 e 10 semanas. (a), (b) e (c) destacamento de argamassa e segregação de massa sólida na aresta da barra; (d) mesmos efeitos evidenciados pela primeira vez para as argamassas CE25 (e) visão geral das barras após dez semanas de ensaio, prontas para o ensaio de tração.

Fonte: Autoria própria.

Outro fator relevante está na secagem das barras que ao serem saturadas com água promovem a rápida dissolução da cal, reduzindo as reações expansivas no interior das argamassas, uma forma clara de constatar essa afirmação é devido ao aumento do pH da solução ao final de cada ciclo, conforme expresso Figura 92.

Figura 92 - Alterações do pH ao longo das semanas de ensaio de ciclagem e temperatura da solução.

Fonte: Autoria própria.

Finalizadas as 10 semanas de imersão/emersão das barras de argamassa de concreto, foram realizados ensaios de tração na flexão e de compressão, conforme NBR 13279. Os resultados foram submetidos a análise estatística a fim de observar as diferenças estatisticamente significativas dos valores obtidos. Os resultados da análise de variância estão exibidos nas Tabelas 36 e 37.

Tabela 36 - Resultados da análise de variância para os valores individuais da resistência à tração das argamassas de concreto.

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	p	Resultado
Modelo	401,07	1	401,1	821,5998	7,71	0,000009	Significativo
Teor de substituição	11,52	2	5,76	11,7983	6,94	0,021009	Significativo
Erro	1,96	4	0,49				
Total	414,55	7	407,32				
R: 0,78 R ² : 0,62							

Fonte: Autoria própria.

Pode-se verificar que o modelo da análise de variância foi significativo, com coeficiente de determinação igual a 0,62. Do mesmo modo, o efeito avaliado, teor de substituição, é uma variável estatisticamente significativa para explicar alterações dos valores obtidos de resistência à tração na flexão, para um nível de confiança de 95%.

A análise da influência do teor de agregado miúdo substituído ser significativa reconhece o efeito da expansão dos constituintes da escória na argamassa, fato que infere a influência do aumento do teor de escória na resistência à flexão das argamassas, corroborando os resultados obtidos visualmente durante os ciclos de envelhecimento.

Pelos resultados do teste de Duncan, por comparação múltipla de médias, os resultados foram divididos em dois grupos distintos, como é exibido na Figura 93.

O agrupamento mostra-se coerente quando se observam os resultados da variação percentual das resistências obtidas em relação a da argamassa do concreto CR, em que para ambas, argamassas de CE25 e CE50, foram verificadas reduções significativas de resistência, correspondentes a 16% e 28%, respectivamente, apesar de estatisticamente CR e CE25 serem semelhantes.

Figura 93 - Médias de resistência à tração das argamassas de concreto, com intervalo de confiança de 95%.

Fonte: Autoria própria.

Ainda que a exposição do concreto a ciclos de imersão/emersão tenda a produzir microfissuras devido a variações de temperatura e umidade, observa-se, conforme resultados anteriormente apresentados, que as dosagens contendo escória levaram a formação de fissuras internas e superficiais nas argamassas, devido a reações expansivas, reações responsáveis pela geração de tensões de tração suficientes para iniciar a fissuração das argamassas, não suficientes para provocar a propagação e a ruptura, mas sim, para reduzir a resistência dos corpos-de-prova, fenômenos não observados na argamassa CR.

Quanto à análise de variância para os resultados individuais de resistência à compressão, exibidas na Tabela 37, se constata que o modelo da análise de variância foi significativo, com coeficiente de determinação igual a 0,62. De maneira semelhante a resistência à tração, o efeito avaliado de teor de substituição se mostrou uma variável estatisticamente significativa e quanto maior o percentual de escória no concreto maior será o seu efeito na resistência à compressão.

Tabela 37 - Resultados da análise de variância realizada com os valores individuais da resistência à compressão das argamassas de concreto.

Efeito	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	p	Resultado
Modelo	35706,15	1	35706,15	2797,98	4,84	0,0	Significativo
Teor de substituição	224,81	2	112,41	8,81	3,98	0,0052	Significativo
Erro	140,38	11	12,76				
Total	36071,34	14	35831,32				
R: 0,78 R ² : 0,62							

Fonte: Autoria própria.

Realizou-se a comparação múltipla das médias para os valores da resistência à compressão, com o objetivo de agrupar as médias que não diferem significativamente entre si, e este é exibido na Figura 94. Em virtude da semelhança estatística apresentada pelas médias das argamassas de CR e CE25, novamente os resultados foram divididos em dois grupos, permanecendo em um grupo isolado a argamassa de CE50. As argamassas exibiram queda de 5% e 18% na resistência a compressão para as dosagens CE25 e CE50, respectivamente.

Figura 94 - Médias de resistência à compressão das argamassas de concreto, com intervalo de confiança de 95%.

Fonte: Autoria própria.

A formação de microfissuras que se caracterizam na formação de aberturas na matriz cimentícia atuam como pontos de concentração de tensões quando se inicia a aplicação de um carregamento.

Tal efeito pode ser compreendido dado que as reações expansivas geram tensões de tração e fissuração, o que tende a diminuir a aderência do agregado à matriz e em casos severos pode até gerar o destacamento da argamassa ou do concreto, e assim, reduzir a resistência do compósito, uma vez que a resistência se encontra na fase sólida do material, prejudicada pelas fissuras geradas e pela perda de aderência do agregado a pasta.

Nota-se que as quedas de resistência à tração e à compressão não ocorrem na mesma intensidade, posto que a resistência à tração é mais afetada do que a resistência à compressão. Fato explicado pelo fechamento das fissuras sob carregamentos de compressão, e em oposição, quando da ação de esforços de tração do material há a rápida propagação das fissuras geradas. Vale ressaltar também que além da redução da resistência mecânica do material a presença de fissuras atua como uma via de penetração e de transporte de agentes agressivos para o interior do concreto, colocando o material em uma condição de grande vulnerabilidade.

5.3.3.3. Envelhecimento natural

Ao longo de 180 dias, as barras de argamassa foram mantidas em cura ao ar, em ambiente abrigado da exposição direta do sol e de chuva, sob ação das condições climáticas do ambiente, conforme apresentado na Figura 95

Figura 95 - Temperatura e umidade do ar medidos ao longo dos 180 dia de ensaio.

Fonte: Autoria própria.

. Ao longo deste período nenhuma alteração visual foi observada nas barras de argamassa de concreto, considerando que os corpos de prova não foram expostos a condições de agressividade ambiental, o tempo de cura pode ter sido insuficiente para se observar o desenvolvimento de patologias.

Após o período estimado, as barras de argamassa foram avaliadas quanto a resistência à tração na flexão e à compressão, conforme NBR 13279. Os resultados foram submetidos a análise de variância para que se pudesse verificar as diferenças estatisticamente significativas dos valores obtidos, tal qual exibidos nas Tabelas 38 e 39.

Tabela 38 - Resultados da análise de variância realizada com os valores individuais da resistência à tração das argamassas de concreto.

Efeito	SQ	GL	MQ	F_{cal}	F_{tab}	p	Resultado
Modelo	940,04	1	940,04	4498,74	5,99	0,0	Significativo
Teor de substituição	2,55	2	1,28	6,11	5,14	0,04	Significativo
Erro	1,25	6	0,21				
Total	943,84	9	941,52				
R: 0,82 R ² : 0,67							

Fonte: Autoria própria.

Pode-se verificar que o modelo da análise de variância foi significativo, bem como o teor de substituição, é uma variável estatisticamente significativa para explicar alterações dos valores obtidos de resistência à tração na flexão. A análise da influência do teor de agregado miúdo substituído ser significativa reconhece o efeito da expansão dos constituintes da escória na argamassa, fato que infere a influência do aumento do teor de escória na resistência à flexão das argamassas, corroborando os resultados obtidos visualmente durante os ciclos de envelhecimento.

Segunda análise por comparação múltipla de médias, os resultados foram divididos em dois grupos distintos, como é exibido na Figura 96.

Figura 96 - Médias de resistência à tração das argamassas de concreto, com intervalo de confiança de 95%.

Fonte: Autoria própria.

De modo semelhante, para os resultados individuais de resistência à compressão foram submetidos a análise de variância conforme exibida na Tabela 39. Observa-se que apesar do modelo da ANOVA apresentar significância estatística, o R^2 foi muito baixo, 0,12. Isso significa dizer que pouco mais de 10% das alterações podem ser explicadas pelo modelo adotado. A pequena diferença entre o F_{cal} e o F_{tab} evidencia o baixo grau de significância. Isso dificulta o uso desse modelo na presente discussão. Verifica-se também que o fator teor de substituição avaliado pela ANOVA não alterou de maneira significativa a resistência à compressão das argamassas de concreto.

Tabela 39: Resultados da análise de variância para os valores individuais da resistência à compressão das argamassas de concreto.

Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	Ftab	p	Resultado
Modelo	34496,89	1	34496,89	835,28	4,54	0,0	Significativo
Teor de substituição	87,79	2	43,90	1,06	3,68	0,37	Não significativo
Erro	619,50	15	41,30				
Total	35204,18	18	34582,08				
R: 0,35 R ² : 0,12							

Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, não foi considerada que houvesse uma diferença estatística entre as médias de resistência obtidas pelas argamassas, permanecendo todas as argamassas em um único grupo, de acordo com o resultado apresentado na Figura 97.

Embora não se tenha observado evidências visuais do efeito do uso da escória na deterioração das barras de argamassa, pelos resultados de resistência à tração compreende-se que o efeito produzido se restringiu a uma alteração em escala microestrutural, de maneira que possivelmente microfissurações geradas na microestrutura das argamassas tendem a reduzir a resistência mecânica do material, principalmente quando do maior teor de substituição é observado. Possivelmente, conforme observado na literatura, mais significativo este efeito será quanto maior for o tempo de cura/exposição do material (WANG; WANG; ZHUANG, 2017).

Figura 97 - Médias de resistência à tração das argamassas de concreto, com intervalo de confiança de 95%.

Fonte: Autoria própria.

5.3.3.4. Avaliação da composição química, mineralógica e análise térmica das argamassas após ensaios de envelhecimento

Após os ensaios de envelhecimento, as argamassas de concretos foram avaliadas por FRX, DRX e análise térmica, a fim de observar as alterações sofridas pelo material em função de cada condição de envelhecimento, conforme é possível observar na Tabela 40.

Tabela 40 - Composição química das argamassas após envelhecimento acelerado.

Óxidos analisados [%]	CR	CE25	CE50
SiO ₂	74,47	53,81	61,54
TiO ₂	0,14	0,39	0,28
Al ₂ O ₃	2,27	5,19	5,08
Fe ₂ O ₃	1,69	6,33	4,77
MnO	-	0,61	0,42
MgO	0,94	3,11	2,12
CaO	13,66	21,98	17,71
Na ₂ O	0,23	0,72	0,74
K ₂ O	0,53	0,86	0,8
P ₂ O ₅	-	0,35	0,23
SO ₃	0,71	0,81	0,7
LOI	6	6	6

Fonte: Autoria própria.

Os principais componentes das argamassas correspondem aos óxidos de silício, alumino, cálcio e ferro, com teores superiores de ferro para as amostras contendo escória. Observa-se também um acréscimo no conteúdo de MgO para as argamassas de CE25 e CE50. Enquanto o teor de álcalis permanece praticamente inalterado em todas as amostras.

Quanto as fases mineralógicas, Tabela 41, torna-se evidente a substituição da areia por escória em função da redução do teor de quartzo nas argamassas, bem como da identificação de fases contendo ferro, tais como a hematita e a magnetita, à medida que se dá a incorporação de escória.

Verifica-se, para todas as amostras, a presença de hidróxido e carbonato de cálcio e quando comparados os teores, de modo geral, os carbonatos se apresentam em quantidades ligeiramente superiores, dada a evolução do processo de envelhecimento. Entretanto, apesar do que se esperava obter, os teores de Ca(OH)₂ e CaCO₃ são

semelhante entre as argamassas de referência e das argamassas contendo escória. Ainda que a calcita se apresente na argamassa CE50 em quantidade superior, bem como a portlandita na CE25, acredita-se que essa não diferenciação possa estar relacionada as limitações da análise, principalmente no que tange o processo de amostragem, dado que a formação de produtos de expansão se deu de maneira pontual.

Tabela 41 - Fases minerais cristalinas identificadas nas argamassas após ensaio de imersão.

Fases	Fórmula química	CR	CE25	CE50
Hematita	Fe_2O_3	<LQ	0,95	1,49
Magnetita	Fe_3O_4	<LQ	0,85	0,69
Ortoclásio	KAlSi_3O_8	1,39	3,77	2,42
Muscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$	1,01	2,71	1,86
Biotita	$\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$	1,34	7,31	<LQ
Quartzo	SiO_2	64,93	33,02	46,73
Oligoclásio	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	3,92	20,4	15,22
Calcita	CaCO_3	10,31	8,75	10,4
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	<LQ	0,57	<LQ
Silicato tricálcico	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	<LQ	0,95	0,79
Silicato dicálcico	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	4,66	7,8	9,77
Actinolita	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	<LQ	<LQ	0,61
Apatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$	0,51	0,66	0,61
Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	9,3	10,25	7,3

Nota: LQ = limite de quantificação (0,5%).

Fonte: Autoria própria.

Quanto a análise térmica, na Figura 98 são exibidas as curvas TG e DTG, respectivamente, após envelhecimento acelerado por imersão das argamassas de concreto CR, CE25 e CE50. A partir dessas curvas e dos valores que as compõe foram calculados a perda de massa relativa à água quimicamente combinada no hidróxido de cálcio e a massa relativa a liberação de CO_2 .

Conforme observado na Figura 98, a argamassa com menor perda de massa corresponde a CE25, enquanto a CE50 apresentou maior perda de massa, principalmente entre as temperaturas de 400°C a 600°C, característico da desidroxilação da portlandita.

Figura 98 - Curvas de perda de massa das argamassas, à esquerda, e de DTG, à direita, após ensaio de imersão.

Fonte: Autoria própria.

Ao tentar avaliar o efeito do ensaio de envelhecimento nas reações expansivas das argamassas de concreto, uma particularidade do material em estudo gerou certas atribuições. Quando analisada apenas a escória (GUMIERI,2002; BELHADJ et al., 2012) numa faixa de temperatura acerca de 250 a 350°C é observada a desidratação do $\text{Mg}(\text{OH})_2$, no entanto, ao analisar materiais cimentícios, tais como pastas ou argamassas, na mesma faixa discute-se a desidratação característica de silicatos e aluminatos hidratados, os produtos de hidratação do aglomerante.

No que tange essa coincidência, uma interpretação mais cuidadosa se deu pela análise das curvas de DTG das amostras. Dado que a argamassa CR corresponde a dosagem do concreto de referência, isento da incorporação de escória de aciaria LD, as comparações foram feitas em função do seu resultado obtido. E pode-se verificar que há uma alta semelhança entre as três curvas, inclusive na região que corresponderia a presença de $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Compreendeu-se também que a presença de periclásio e brucita seriam evidenciadas nas análises de difratometria de raios X realizadas para as argamassas, o que não ocorreu.

Os teores de água quimicamente combinada relativos ao C-S-H, ao hidróxido de cálcio e à liberação de CO_2 foram calculados com base na perda de massa efetiva de cada argamassa. A partir dos quais foi possível definir o teor de C-S-H + aluminatos, de hidróxido de cálcio e de carbonatos nas argamassas, os resultados são apresentados na Tabela 42.

A argamassa do CE50, possui um teor correspondente a hidratos C-S-H e aluminatos superior à argamassa de referência e a CE25, fato que pode indicar a ocorrência de uma quantidade superior de silicato de cálcio hidratado e aluminatos hidratados na argamassa. Este resultado corrobora as deduções quanto ao desenvolvimento de reações superficiais na interface agregado de escória – matriz de cimento levantadas na análise mecânicas dos concretos (item 5.3.1.2).

Tabela 42 - Valores relativos ao teor C-S-H e aluminatos, hidróxido de cálcio e de carbonatos após ensaio de imersão.

Argamassa	C-S-H + aluminatos [%]	Ca(OH) ₂ [%]	CaCO ₃ [%]	Massa residual a 1000°C
CR	7,27	7,83	5,25	89,30
CE25	5,99	7,96	3,89	90,55
CE50	8,39	7,84	7,20	87,19

Fonte: Autoria própria.

Quanto ao hidróxido de cálcio, os valores se mantêm idênticos para todas as amostras. No entanto, verifica-se que, quando comparadas as perdas de massa relativas a água quimicamente combinada no hidróxido de cálcio e à liberação de CO₂, há uma grande diferença entre ambas, o que indica que, em função do processo de envelhecimento, as condições de ensaio favoreceram as reações de carbonatação, que de maneira geral também foram observados pela análise mineralógica, sendo a amostra CE50 a mais rica em carbonato de cálcio, fato que se era esperado dado que as reações expansivas foram mais significativas e ocorreram anteriormente para esta.

Isto posto, compreende-se que a tentativa de acelerar o desenvolvimento das reações de hidratação dos compostos expansivos, mediante a imersão das argamassas em água quente, foi altamente eficiente para a amostras CE50, que demonstrou que maior será o teor de produtos expansivos, tais como, Ca(OH)₂ e CaCO₃, quanto mais elevado for o teor de escória. Evidenciando assim, que quanto maior o teor de escória maior será o seu impacto sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade do material.

Na Tabela 43 é apresentada a composição química obtida das argamassas após os ciclos de imersão/emersão. Verifica-se que a composição química das argamassas consiste basicamente em SiO₂, CaO, Al₂O₃, principais componentes observados em todas as

amostras, tendo ainda nas argamassas de CE25 e CE50 conteúdo superior de óxido de ferro.

Tabela 43 - Composição química das argamassas após ciclagem.

Óxidos analisados [%]	CR	CE25	CE50
SiO ₂	74,04	20,12	49,78
TiO ₂	0,14	0,36	0,37
Al ₂ O ₃	3,38	3,62	4,92
Fe ₃ O ₃	1,62	5,43	7,04
MnO	0,02	0,39	0,64
MgO	0,87	2,34	3,38
CaO	12,14	19,42	23,64
Na ₂ O	0,5	0,35	0,42
K ₂ O	0,9	0,62	0,72
P ₂ O ₅	0,07	0,24	0,33
SO ₃	1,63	2,23	3,24
LOI	4,47	4,68	5,62

Fonte: Autoria própria.

Verifica-se também uma perda ao fogo superior, principalmente para CE50, fato consistente com o procedimento empregado, uma vez que no fenômeno da carbonatação natural, dado pela emersão e exposição das barras ao ar atmosférico circulante na estufa, há a precipitação de carbonatos.

Conforme observado na Tabela 44, são exibidas as fases mineralógicas identificadas nas argamassas após os ciclos de imersão/emersão, algumas diferenças sutis podem ser observadas em relação ao obtido para as argamassas após ciclagem.

Novamente, observa-se a redução do teor de quartzo nas argamassas, e a presença de fases férricas em função da incorporação de escória no material, tais como a wustita e o ferroaluminato tetracálcico. Verifica-se também o aumento do conteúdo de silicato dicálcico, fase comumente encontrada na escória de aciaria LD. Cabe ressaltar neste ponto que comparado ao ensaio de imersão o conteúdo de de C₂S (2CaO.SiO₂) bem como C₄AF (4CaO. Al₂O₃. Fe₂O₃) é superior para o ensaio de ciclagem, o que pode indicar que durante a imersão a hidratação destas fases ocorreu de maneira mais eficiente.

Tabela 44 - Fases minerais cristalinas identificadas nas argamassas após ciclagem.

Fase mineral	Fórmula química	CR	CE25	CE50
Wüstite	FeO	<LQ	<LQ	3,4
Ortoclasio	KAlSi ₃ O ₈	2,4	4,27	5,98
Muscovita	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) _{1.8} F _{0.2}	0,93	2,85	1,82
Biotita	K(Mg,Fe) ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂	LQ	2,38	1,41
Quartzo	SiO ₂	67,85	41,03	27,79
Oligoclásio	NaAlSi ₃ O ₈	9,95	11,16	13,93
Calcita	CaCO ₃	9,93	12,66	19,94
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	<LQ	<LQ	0,62
Silicato tricálcico	3 CaO.SiO ₂	0,9	1,5	1,01
Silicato dicálcico	2 CaO.SiO ₂	1,04	5,19	6,25
Aluminato tricálcico	3 CaO.Al ₂ O ₃	LQ	LQ	0,52
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	0,59	1,96	3,02
Actinolita	Ca ₂ (Mg, Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	<LQ	1,28	1,1
Apatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃	<LQ	0,57	0,64
Portlandita	Ca(OH) ₂	4,34	12,29	8,77

Nota: LQ = limite de quantificação (0,5%).

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que há uma diferença significativa no conteúdo de hidróxido e carbonato de cálcio, de maneira que os carbonatos se apresentam em quantidades superiores, dada a evolução do processo de envelhecimento pelo contato do ar atmosférico visto que havia circulação de ar na estufa e que os corpos de prova permaneciam exposto ao ar por tempo prolongado (4 dias).

É marcante a evolução no teor de carbonato de cálcio para as argamassas contendo escória, em especial para a CE50, bem como o de portlandita na CE25, que apesar de também apresentar elevado teor de CaCO₃, o conteúdo de ambas as fases se manteve bastante semelhante. Tal fato pode auxiliar a compreender as ocorrências de manifestações patológicas de maneira mais acentuada para a argamassa CE50, pois devido ao conteúdo superior de escória, expansões adicionais originadas da carbonatação do Ca(OH)₂ geraram efeitos mais significativos na fissuração das argamassas.

Na Figura 99 são exibidas as curvas TG e DTG das argamassas após os ciclagem, em que se verifica a evolução das reações de envelhecimento. Analisando o gráfico de TG, verifica-se que a maior perda de massa foi obtida para as argamassas de CE50 enquanto as argamassas CR e CE25 obtiveram perdas semelhantes.

Figura 99 - Curvas de perda de massa das argamassas, à esquerda, e de DTG, à direita após ciclagem.

Fonte: Autoria própria.

É possível verificar também que a dissociação do anidrido carbônico do carbonato de cálcio ($> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) se deu com intensidade superior para a CE50, conforme exibido na Tabela 45.

Tabela 45 - Valores relativos ao teor C-S-H e aluminatos, hidróxido de cálcio e de carbonatos após ciclagem.

Argamassa	C-S-H + aluminatos [%]	Ca(OH) ₂ [%]	CaCO ₃ [%]	Massa residual a 1000°C
CR	5,08	6,84	4,41	92,09
CE25	5,62	8,58	3,28	92,30
CE50	6,48	8,56	5,78	90,28

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 46 é apresentada a composição química obtida das argamassas expostas ao envelhecimento natural, em que os principais componentes das argamassas são óxidos de silício, alumínio, cálcio, com teores superiores de ferro para as argamassas de CE25 e CE50. A perda ao fogo foi igualmente superior para CE50, fato consistente com superior conteúdo de cálcio e consequente carbonatação do mesmo em contato com CO₂ atmosférico, bem como quando comparada aos outros processos de envelhecimento, o envelhecimento natural provocou uma elevada perda ao fogo. Observa-se também um acréscimo no conteúdo de MgO e Al₂O₃ e a redução do SiO₂ para as argamassas de CE25 e CE50.

Tabela 46 - Composição química das argamassas após ciclagem.

Óxidos analisados [%]	CR	CE25	CE50
SiO ₂	75,5	63,88	52,72
TiO ₂	0,14	0,27	0,34
Al ₂ O ₃	2,18	3,65	4,97
Fe ₂ O ₃	1,63	3,96	5,76
MnO	-	0,35	0,42
MgO	0,88	1,94	2,89
CaO	12,38	16,94	21,5
Na ₂ O	0,27	0,41	0,51
K ₂ O	0,68	0,85	0,88
P ₂ O ₅	-	0,2	0,28
SO ₃	0,56	0,73	1,01
LOI	6,38	6,96	8,16

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 47 exibe as fases minerais identificadas nas amostras de argamassa após o período de exposição ao ambiente atmosférico. Verifica-se novamente a redução do quartzo em função da substituição da areia e, de maneira menos significativa do que nos demais processos de envelhecimento, foi evidenciada a presença de wustita apenas nas argamassas de CE50.

Tabela 47 - Fases minerais cristalinas identificadas nas argamassas após envelhecimento natural.

Fase	Fórmula química	CR	CE25	CE50
Wustita	FeO	<LQ	<LQ	1,48
Ortoclásio	KAlSi ₃ O ₈	1,22	2,83	0,64
Muscovita	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) _{1.8} F _{0.2}	0,7	0,66	5,61
Biotita	K(Mg,Fe) ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂	<LQ	<LQ	7,52
Quartzo	SiO _{2a}	68,68	57,45	37,31
Oligoclásio	NaAlSi ₃ O ₈	LQ	5,02	10,24
Calcita	CaCO ₃	15,13	16,13	18,88
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	<LQ	<LQ	0,52
Silicato tricálcico	3 CaO.SiO ₂	0,63	2,33	0,92
Silicato dicálcico	2 CaO.SiO ₂	4,51	4,06	0,92
Portlandita	Ca(OH) ₂	6,4	7,86	10,48

Nota: LQ = limite de quantificação (0,5%).

Fonte: Autoria própria.

Quanto a presença de hidróxido e carbonato de cálcio, de modo geral, os carbonatos se apresentam em quantidades mais elevadas, dado o desenvolvimento das reações de carbonatação natural. Entretanto, é possível observar o aumento do teor de hidróxido de cálcio à medida que se eleva a incorporação da escória nas dosagens, bem como se compreende que o elevado teor de Ca(OH)_2 nas argamassas está relacionado a eficiência do processo de envelhecimento.

Na Figura 100 são exibidas as curvas de TG e DTG demonstrando a evolução do processo de envelhecimento natural comandado principalmente pelas reações de carbonatação das argamassas. Conforme verificado nas curvas TG a evolução das reações confere uma perda de massa crescente ao longo do tempo, de maneira que a maior redução foi observada para as argamassas de CR e CE50.

Ao analisar o gráfico de DTG infere-se que o primeiro pico seja atribuído à decomposição do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) numa faixa de 30 °C a 145 °C, enquanto o segundo pico, entre 145 °C a 400 °C, é atribuído à decomposição das fases dos aluminatos. Na faixa de 400 °C a 610 °C verifica-se a desidratação do hidróxido de cálcio, e a partir desta temperatura (> 610 °C) é verificada a dissociação do CO_2 do CaCO_3 , pode-se verificar uma maior intensidade para CE50 (próximo a 700 °C).

Figura 100 - Curvas de perda de massa das argamassas, à esquerda, e de DTG, à direita, após envelhecimento natural.

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 48 são apresentadas as perdas de massa das argamassas em estudo, relativas ao teor de C-S-H + aluminatos, de hidróxido de cálcio e de carbonatos nas argamassas.

Tabela 48 - Valores relativos ao teor C-S-H e aluminatos, hidróxido de cálcio e de carbonatos após envelhecimento natural.

Argamassa	C-S-H + aluminatos [%]	Ca(OH) ₂ [%]	CaCO ₃ [%]	Massa residual a 1000°C
CR	7,17	10,14	7,47	88,74
CE25	6,11	9,09	6,69	90,13
CE50	6,28	9,28	8,91	89,30

Fonte: Autoria própria.

Verifica-se um ligeiro aumento no conteúdo de hidratos e aluminatos para as argamassas de CR, fato que pode ser compreendido pela reduzida disponibilidade de água, quando comparado aos demais processos de envelhecimento, o que pode ter dificultado a formação de produtos de hidratação oriundos da hidratação da escória. Verifica-se, no entanto, teor superior de carbonato de cálcio para as argamassas de CE50, resultado da carbonatação dos constituintes da pasta de cimento bem como do agregado de escória.

5.3.3.5. Análise comparativa dos teores de Ca(OH)₂ e CaCO₃

Apesar da difícil definição de qual técnica seria mais eficiente para quantificar a evolução das fases originadas pelo envelhecimento das argamassas, tomando por base o efeito teoricamente previsto pelos procedimentos empregados, optou-se pela utilização dos valores obtidos pela quantificação pelo método Rietveld. Deste modo, nas Figuras 101 e 102 são apresentados sumarizados os valores obtidos de portlandita e calcita nas argamassas de acordo com a quantificação realizada pelo método Rietveld. Foram utilizadas as nomenclaturas EA: envelhecimento acelerado por imersão, EC: envelhecimento por ciclagem e EN: envelhecimento natural.

É possível verificar que o envelhecimento acelerado por imersão em água a temperatura elevada promoveu o desenvolvimento das reações de hidratação da cal, elevando o teor de Ca(OH)₂, por acelerar a taxa das reações de hidratação do CaO ainda

presente nas amostras, fato verificado pelo teor de portlandita obtido, bem como pela degradação observada pela formação de fissuras e ruptura dos corpos de prova ao final do processo (ver Figura 88). Deve-se ressaltar, que o elevado teor de portlandita para a argamassa de CR é uma das principais consequências do processo de imersão pois como todas reações químicas, as reações de hidratação do cimento são influenciadas pelo aumento da temperatura que resulta no aumento da velocidade de reação de hidratação do cimento anidro e da formação de produtos de hidratação, sobretudo do hidróxido de cálcio.

De maneira oposta, o teor de carbonatos de cálcio formados ao longo do estudo foi o menos significativo quando comparado aos demais procedimentos, em função da baixa exposição dos corpos de prova ao ar atmosférico e à baixa influência do CO₂ em função do teor de água no interior do material, dado que quando os poros do material estão saturados a difusão do gás CO₂ é em torno de 10 000 vezes inferior na fase líquida do que na fase gasosa (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

Figura 101 - Teor de portlandita nas argamassas obtido pelo método Rietveld.

Fonte: Autoria própria.

Observando os resultados alcançados para o envelhecimento por ciclagem (imersão/emersão) verifica-se que ao serem repetidamente submetidas à molhagem por imersão em água, seguida por períodos de secagem em estufa, as argamassas tem a água que compõe a solução dos poros evaporada, tornando o material ávido por água, e assim quando imersas, reidratam e promovem a rápida hidratação da cal.

Outro importante fator relacionado a ciclagem está no fato de que com a evaporação da água, parte dos sais dissolvidos apresentam-se na forma de cristais, que

durante a etapa de imersão reidratam e tem o seu volume elevado, podendo exercer uma expansão na matriz cimentícia.

Posto isto, há que se destacar que as variações de umidade aceleraram as reações de hidratação da cal com consequente formação de portlandita, mas principalmente deram condições ao processo de carbonatação, elevando os teores de calcita nas argamassas.

À medida que se deu o processo de envelhecimento cíclico, verifica-se que houve a evolução das reações ocorridas entre CaO e Ca(OH)_2 com o CO_2 do ar presente no interior da estufa, evidenciando, em decorrência disto, superior presença da calcita.

O envelhecimento natural trata-se, sem mais delongas, principalmente da carbonatação natural do material de base cimentícia exposto a concentrações de CO_2 da atmosfera, a mesma a qual o material estaria se em condições de trabalho. A degradação das argamassas progride da camada superficial para a interna, de acordo com a facilidade de difusão do CO_2 através da matriz cimentícia, neste contexto pode-se destacar duas particularidades: a absorção de água das argamassas de concreto, que representa a porosidade aberta do material, e o teor de cálcio disponível nas mesmas disponíveis para hidratação e carbonatação.

Figura 102 - Teor de calcita nas argamassas obtido pelo método Rietveld.

Fonte: Autoria própria.

Fundamentando a discussão da absorção de água nos resultados obtidos para os concretos (ver Figura 80), observa-se que à medida que se eleva a incorporação da escória, eleva-se a absorção dos concretos, bem como eleva-se o teor de cálcio presente nas argamassas conforme verificado por fluorescência de raios X (Tabela 46). De modo que é notória a influência destes fatores no teor de calcita identificado nas argamassas,

principalmente para CE50. Analogamente, a umidade do ambiente teve influente papel no teor de portlandita, mais elevado para as dosagens contendo escória.

Todavia, o processo de carbonatação tem como característica reduzir a porosidade do material a partir da colmatação dos poros, isto se deve à diferença dos volumes molares dos produtos formados, visto que a portlandita apresenta volume molar igual a 33,2 cm³/mol, enquanto para a calcita é igual a 36,9 cm³/mol, o que representa um aumento de cerca de 11%, de modo que os carbonatos ocupam parte dos vazios capilares.

Isso pode se correlacionar ao fato de o processo acelerado por ciclagem ter produzido mais carbonatos que o envelhecimento natural para CE50, dado que a redução da porosidade ao longo do tempo reduz a difusão do CO₂ no interior do material.

5.3.3.6. Considerações sobre o mecanismo de expansão da escória

É notório que o fenômeno da expansibilidade das escórias de aciaria é majoritariamente incitado pela hidratação do óxido de cálcio livre e de modo minoritário, pelo óxido de magnésio livre, pelo polimorfismo do silicato dicálcico e oxidação e corrosão do ferro metálico. Sendo o principal responsável pela expansão da escória, na Figura 113 é apresentado um esquema do mecanismo de expansão e ruptura da matriz cimentícia geradas pela hidratação da cal livre.

No início do processo de hidratação da pasta de cimento, logo após a mistura do cimento com a água têm-se início as reações de hidratação dos constituintes do cimento anidro. Em presença de água, os aluminatos e silicatos de cálcio reagem de maneira relativamente rápida com a água, para dar origem aos produtos C-S-H, Ca(OH)₂ e aluminatos de cálcio hidratado.

A portlandita gerada ao longo da hidratação do cimento é precipitada concomitantemente ao C-S-H, conforme a equação simplificada abaixo (NONAT, 2014):

O Ca(OH)₂ precipita-se sob a forma de cristais hexagonais na pasta de cimento, nos poros e na interface entre agregados e pasta, de modo que seus cristais apresentam morfologia bastante definida. De maneira contrária, o Ca(OH)₂ oriundo da hidratação da escória é formada após a hidratação da pasta de cimento. A posterior hidratação da cal

livre presente na escória, bem como do MgO livre, está diretamente relacionada a elevada temperatura à qual é exposta, que resulta na formação de cristais de cal insolúveis, dado que o CaO formado é denso, de baixa porosidade e, conseqüentemente, menos reativo, o que o torna responsável pelas expansões após o endurecimento da pasta de cimento em concretos ou argamassas.

Por conseguinte, como representado na Figura 103, quando em um meio cimentício as partículas de escória, ricas em óxido de cálcio, em presença de umidade tendem a formar o Ca(OH)_2 em um ambiente considerado confinado, em função da já existente estrutura sólida da matriz cimentícia hidratada.

Figura 103 - Representação do mecanismo de expansão oriundo da hidratação da cal livre.

Fonte: Autoria própria.

A variação volumétrica da conversão do CaO em Ca(OH)_2 é extremamente indesejada nestas condições devido à falta de espaço para a acomodação dos cristais com superior volume molar, o que favorece o desenvolvimento de elevadas pressões de cristalização, causando a expansão da pasta de cimento e consequentemente a sua microssifuração multidirecional na regiões tensionadas, Figura 103 (2).

A fissuração da matriz se desenvolve uma vez que as pressões oriundas da cristalização da portlandita ultrapassam a resistência à tração da pasta. E à medida que a cristalização da portlandita progride, um número superior de fissuras é formado no material, ao passo que as já existentes se conectam as demais formando uma ampla rede de fissuras, Figura 103 (3). Expansões adicionais podem ser observadas juntamente à formação da portlandita em consequência da penetração do CO_2 do ar atmosférico na rede de poros ou através das fissuras geradas, levando a formação de uma camada de calcita na superfície da partícula.

Não obstante a escória apresentar reatividade inferior ao cimento, bem como a cal presente na escória não reagir simultaneamente a hidratação da pasta de cimento, mesmo nas idades iniciais pode-se observar o efeito da expansão, principalmente nos cantos dos elementos de argamassa ou concreto. Todavia os efeitos costumam se tornar realmente significativos após 28 dias de cura, mas são altamente influenciados pela temperatura, se tornando mais claros quanto mais elevadas forem as temperaturas durante a hidratação (BELHADJ et al., 2014; WANG; WANG; ZHUANG, 2017).

A ocorrência das fissuras gera um dano significativo no que tange o transporte de agentes agressivos do meio externo para o interior do concreto, o que torna a cinética de degradação do material consideravelmente elevada, além da perda de resistência mecânica do elemento.

Enquanto expostas à umidade, as partículas de escória contendo cal livre continuam a se hidratar, a taxas que dependem do tamanho das partículas de escória e dos cristais de CaO . O aumento das fissuras tem seu ponto crítico pela perda de massa do material provocada pelo destacamento de camadas de argamassa/concreto circundantes ao agregado, em função da alta conexão e abertura das fissuras. O destacamento observado no entorno do agregado reativo acelera assim o seu processo de carbonatação, Figura 103 (4).

6. CONCLUSÃO

No presente estudo foram avaliadas as propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos com substituição do agregado miúdo natural por escória de aciaria LD. Comparados ao agregado natural, as escórias se mostraram mais porosas, absorptivas e com baixa resistência ao desgaste superficial.

A técnica de extração por etilenoglicol foi utilizada para determinar o teor total de óxido de cálcio livre, que foi próximo a 4%, enquanto por difratometria de raios X o teor de CaO livre foi de cerca de 2%. Com base no teste acelerado de reação álcali-agregado, verificou-se a potencial da expansão da escória de aciaria LD em solução alcalina, diretamente relacionada aos teores de CaO livre e MgO livre presentes nos agregados de escória. De acordo com estes resultados, agregados de escória de aciaria LD com teor de CaO livre total superior a 4% apresentam elevada expansibilidade e podem levar à fratura do concreto quando utilizados como agregado miúdo.

As misturas de concreto com agregados de escória de aciaria obtiveram resistência à compressão superior à da mistura de referência, fato atribuído a alterações interfaciais na superfície do agregado de escória, foram elas: 1) desenvolvimento de reações de superfície, com formação de aluminatos e silicatos de cálcio hidratados, oriundos da composição mineralógica da escória, e 2) redução da relação a/lig na interface do agregado de escória, dada a sua absorptividade e consequente redução da porosidade local. Quanto à resistência à tração, não houve diferença significativa entre os concretos com e sem escória, o que acredita-se estar relacionada a idade de cura dos concretos avaliados (28 e 180 dias) que seria insuficiente para avaliar os efeitos patológicos relacionados a expansão da escória; entretanto, foi observado o decréscimo do módulo de elasticidade com a incorporação de agregados de escória, dada a baixa rigidez e elevada porosidade apresentada pela escória; bem como a redução da trabalhabilidade dos concretos em função da morfologia de suas partículas.

Pela incorporação da escória, os concretos se tornaram menos resistivos e verificada a condutividade elétrica da solução dos poros do concreto a presença de escória demonstrou influência nos valores obtidos, elevando-os em função do aporte de íons de cálcio na solução intersticial. Concretos com escória obtiveram valores de absorção de água e massa específica superiores, o que pode ser atribuído a alta absorção de água pelo

agregado de escória e pelo alto conteúdo de ferro em sua composição, respectivamente. Corroborando a absorção, concretos com escória tiveram a velocidade de pulso ultrassônico reduzida, dada a porosidade da escória.

A carbonatação acelerada dos concretos com escória foi superior, corroborando os resultados de absorção e condutividade, no entanto, contrário ao esperado, a resistência à migração de cloretos foi ligeiramente superior, indicando a ocorrência de fixação de cloretos nos concretos, fato confirmado pela identificação de sal de Friedel nos concretos por difratometria de raios X e microscopia eletrônica de varredura.

Em síntese, os agregados de escória promoveram desempenho satisfatório ou, em alguns casos, até superior nas propriedades dos concretos. No entanto, seu emprego foi limitado em função de suas características expansivas, que no pior caso observado, ao realizar o envelhecimento acelerado dos concretos por imersão em água, findados 70 dias, os corpos de prova romperam por expansão, enquanto os de referência se mantiveram íntegros. Quando submetidos a envelhecimento por imersão-emersão, os corpos de prova com escória sofreram fragmentação, deslocamento de argamassa e tiveram suas resistências à compressão e à tração reduzidas. Pelo envelhecimento natural, as argamassas de concreto apresentaram redução da resistência à tração, enquanto a resistência à compressão não foi significativamente influenciada, demonstrando que a não exposição do material a um meio agressivo e a um meio aquoso não favoreceu as reações de hidratação dos componentes expansivos da escória, favorecendo apenas as reações de hidratação da matriz cimentícia, evidenciado pelos resultados de resistência mecânica superiores ao do ensaio de ciclagem.

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que os resultados nas idades iniciais têm menor influência da expansão de escória, principalmente devido à baixa taxa de hidratação dos componentes expansivos da escória de aciaria LD (CaO e MgO livres). No entanto, o desenvolvimento de reações de expansão promove aumentos volumétricos expressivos que causam a formação de fissuras e, conseqüentemente, a redução da resistência mecânica. Isto mostra que a avaliação da resistência mecânica dos materiais cimentícios contendo escória deve ser realizada em idades mais avançadas, preferivelmente acima de 180 dias, diferentemente do que as normas vigentes costumam exigir.

Em face do desenvolvimento sustentável, a durabilidade de uma estrutura é um dos fatores mais importantes a se avaliar, uma vez que não há sustentabilidade se uma estrutura não tiver estabilidade e longevidade. Neste sentido, os agregados de escória não são indicados como agregados artificiais para a produção de concreto devido às patologias provocadas pelo seu emprego concernentes, principalmente, à instabilidade volumétrica gerada no concreto que levam a comprometimentos estruturais como a fissuração generalizada e à desagregação da matriz cimentícia em profundidades consideráveis.

7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Acredita-se que algumas questões envolvendo os estudos da durabilidade do concreto com o uso escórias ainda devem ser contemplados, tais como:

- Avançar na compreensão dos mecanismos de fixação de cloretos por parte de concretos com escória, a fim de compreender a relação composicional da escória com a ocorrência do sal de Friedel;
- Avaliar reações de superfície na interface do agregado de escória com a pasta de cimento;
- Compreender as interferências causadas pela composição da escória nos processos de carbonatação acelerada;
- Verificar o efeito de reações expansivas da escória em elementos robustos de concretos em idades mais longas.

REFERÊNCIAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **A Indústria do Cimento e o Desenvolvimento do Brasil**. São Paulo, 2014.

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Determinação da reação álcali-agregado pelo método acelerado**. São Paulo: ABCP, 2011. 5 p. (Série de texto técnico, Relatório nº:73908)

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12042**. Materiais inorgânicos - Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**. Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

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

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-4**. Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**. Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**. Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto: Determinação da Resistência à Compressão. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**. Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7227**. Cimento Portland - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**. Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 2002.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**. Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**. Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**. Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**. Agregado miúdo - determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51**. Agregado graúdo - Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**. Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2002.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

AKÇAOGLU, T. Determining aggregate size & shape effect on concrete microcracking under compression by means of a degree of reversibility method. **Construction and Building Materials**, v. 143, p. 376 – 386, 2017.

ALMEIDA, A. S. Métodos de mineração. In: TANNO, L. C.; SINTONI, A. (Coord.). **Mineração e município**: bases para planejamento e gestão dos recursos minerais. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológica, 2003.

ALVES, J. D. **Manual de tecnologia do concreto**. 3. ed. Goiânia: Editora UFG, 1993.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 161**. Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. Washington, 2017.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 95**. Standard Test Method for Surface Resistivity of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration,” American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1155**. Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-Situ Data. West Conshohocken, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1260**. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). West Conshohocken, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C151**. Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement. West Conshohocken, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C642**. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. Philadelphia, 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4792**. Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions. West Conshohocken, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E178 - 16a**. Standard Practice for Dealing With Outlying Observations. West Conshohocken, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G57**. Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. West Conshohocken, 2012.

ARRIBAS I. et al. Durability studies on steelmaking slag concretes. **Materials and Design**, v. 63, p. 168–176, 2014.

ATAHAN, H. N. et al. Effects of water–cement ratio and curing time on the critical pore width of hardened cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1196–1200, 2009.

ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L. **Princípios de química**. Tradução de Felix Nonnenmacher. Porto Alegre: Bookman Editora LTDA, 2018.

AVINASH, G. B. Study of concrete strength by using Blast furnace (BF) & Basic Oxygen Furnace (BOF) slag in replacement of fine Aggregate (natural sand). **International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science**, v. 2, p. 102 – 109, 2014.

AZARSA P., GUPTA R. Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: A Review. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 1, p. 1-30, 2017.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. **A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento**. Tradução de Oswaldo Cascudo. São Paulo: Ibracon, 2014.

BELHADJ, E. et al. Characterization and activation of basic oxygen furnace slag. **Cement & Concrete Composites**, v. 34, p. 34 – 40, 2012.

BELHADJ, E. et al. Properties of hydraulic paste of basic oxygen furnace slag. **Cement & Concrete Composites**, v. 45, p. 15 – 21, 2014.

BERTOLINO, L.C.; PALERMO, N.; BERTOLINO, A. V. F. A. Geologia. In: LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. **Manual de Agregados para Construção Civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. 2012.

BODOR, M. et al. Laboratory investigation of carbonated BOF slag used as partial replacement of natural aggregate in cement mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 55-66, 2016.

BOUKENDAKDJI, O. et al. Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2593 – 2598, 2009.

BRAND, A. S.; ROESLER, J. R. Steel furnace slag aggregate expansion and hardened concrete properties. **Cement & Concrete Composites**, v. 60, p. 1–9, 2015.

BRITISH STANDARD. **BS EN 12504-4**. Testing concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity. Londres, 2004.

CABRAL, A. E. B. et al. Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 55, p. 448-460, 2009.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 7ª Ed. Rio de Janeiro. LTC, 2007.

CARASEK, H. et al. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Revista Matéria**, v.21, p.714-732, 2016.

CARLES-GIBERGUES, A.; HORNAIN, H. **A durabilidade do concreto frente às reações expansivas de origem endógena**. Tradução de Helena Carasek. São Paulo: Ibracon, 2014.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. Goiânia: Editora UFG, 1997. 237 p.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 302 f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CHEN, J-S.; WEI, S-H. Engineering properties and performance of asphalt mixtures incorporating steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 148–153, 2016.

CHEN, X.; WU, S. Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 804–812, 2013.

CHIOSSI, N. J. **Geologia de engenharia**. São Paulo: Oficina de Textos, 3ª Ed. 2013.

COUTINHO, J.S. **Agregados para argamassas e betões**. Porto: Universidade do Porto. 1999.

CRYSTALLOGRAPHY365. Bright spark – Magnesium Oxide. Disponível em: <https://crystallography365.wordpress.com/2014/08/16/bright-spark-magnesium-oxide>. Acesso em: 20 set. 2018.

CUNHA, F. A.; CINCONTTO, M. A. Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-silica e álcali-silicato. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP - BT/PCC/498. São Paulo, 2008.

DAS, B. et al. An overview of utilization of slag and slugde from steel industries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, p. 40-57, 2007.

DING, Y. et al. Study on the treatment of BOF slag to replace fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 644–651, 2017.

DNPM - Departamento nacional de Produção Mineral. **Sumário mineral 2015**, v. 35. Brasília, 2015. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015>. Acesso em: 03 abr. 2017.

ENGSTRÖM F. et al. **Mineralogical Influence of Different Cooling Conditions on Leaching Behaviour of Steelmaking Slags**. In: INTERNATIONAL SLAG VALORISATION SYMPOSIUM, 1.; Leuven, 2009.

ESCADEILLAS, G.; HORNAIN, H. **A durabilidade do concreto frente a meios agressivos**. Tradução de Valdecir Angelo Quarcioni. São Paulo: Ibracon, 2014.

FARIA, R. A. F. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas e durabilidade de concretos com escória de aciaria elétrica (EAF) como agregado graúdo**. 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

FERNANDES, M.I.G. **Caracterização petrográfica, química e física de agregados graníticos em betões. Estudo de casos de obra.** 2005. 491 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2005.

FERREIRA G. E.; FONSECA JUNIOR C. A. F. Mercado de agregados no brasil. In: LUZ, A. B.; ALMEIDA S. L. M. **Manual de Agregados para Construção Civil.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. cap. 1, p. 7 – 33.

FRANKLIN-JOHNSON, E., FIGGE F., CANNING L. Resource duration as a managerial indicator for circular economy performance. **Journal of Cleaner Production.** v. 133. p. 589-598. 2016.

GAN, L. et al. Strength activity index of air quenched basic oxygen furnace steel slag. **Journal of iron and steel research,** v. 22, p. 219 – 225, 2015.

GAUTIER, M. et al. Basic oxygen furnace (BOF) slag cooling: Laboratory characteristics and prediction calculations. **International Journal of Mineral Processing,** v. 123, p. 94–101, 2013.

GEISELER, J. Use of steelworks slag in Europe. **Waste Management,** v. 16, p. 59 – 63, 1996.

GHOULEH, Z. et al. Production of carbonate aggregates using steel slag and carbon dioxide for carbon-negative concrete. **Journal of CO₂ Utilization,** v. 18, p.125–138, 2017.

GLOBALSLAG, Basics of slag production. Disponível em: <http://www.globalslag.com/magazine/articles/604-basics-of-slag-production>. Acesso em: 14 nov. 2016.

GOBBO, L. A. **Aplicação da difração de raios-x e método de Rietveld no estudo do cimento Portland.** 2009. 251 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. São Paulo. 2009.

GOMES, P. C. C. et al. Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados. **Ambiente Construído,** Porto Alegre, v.15, n. 3, p. 31-46, 2015.

GUIGNONE, G. et al. Avaliação da Penetração Acelerada de Cloretos em Concretos com Aditivo Impermeabilizante por Cristalização e Diferentes Relações Água/cimento. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE PATOLOGIA DA CONSTRUÇÃO, 2015, Lisboa.

GUMIERI, A. G. **Estudo da viabilidade técnica das escórias de aciaria do processo LD como adição de cimento.** 2002. 251 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

GUO, J., BAO, Y., WANG, M. Steel slag in China: treatment, recycling, and management. **Waste Management.** v. 78, p. 318–330, 2018.

HELAL, J.; SOFI, M.; MENDIS, P. Non-destructive testing of concrete: A review of methods. **Electronic Journal of Structural Engineering.** v.14, p. 97-105, 2015.

HEWLETT, P. C. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete.** 4th Ed. Burlington: Elsevier, 1998.

HORII, K. et al. Processing and reusing technologies for steelmaking slag. **Nippon Steel Technical Report,** v. 114, p. 123-129, 2013.

HOU, T-C et al. Effects of coarse aggregates on the electrical resistivity of Portland cement concrete. **Construction and Building Materials.** v. 133, p. 397–408, 2017.

IAB. Instituto Aço Brasil. **Relatório de sustentabilidade 2018.** Rio de Janeiro. 2018.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira, 2010. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00000957.pdf>. Acesso em 06 Jun. 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1920-12**. Testing of concrete -- Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete -- Accelerated carbonation method. Genebra, 2015.

IRRIGARAY, M.A. **Estimativa da resistência do concreto à compressão por meio da velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta do concreto**. 2012. 205 p. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

ISMAIL, I. et al. Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 1187–1201, 2013.

JIANG, Y.; LING, T.; SHI, C.; PAN, S. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 136, p. 187–197, 2018.

KAMBOLE, C. et al. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 618–631, 2017.

KHATER, H. M. Influence of metakaolin on resistivity of cement mortar to magnesium chloride solution. **Journal of Ceramics-Silikáty**, v. 54, p. 325 – 333, 2010.

KOSMATKA S. H.; PANARESE C.W.; KERKHOFF, B. **Design and control of concrete mixtures**. 14th ed. Illinois: Portland Cement Association. 2003.

KUMAR, D. S. et al. **Recycling steelmaking slags in cement**. Disponível em: <http://www.worldcement.com/documents/JSW%20Steel.pdf> . Acesso em: 8 Abr. 2016.

LENCIONI, J. W. **Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios**. 2011. 262 f. Tese (doutorado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2011.

LI, H. et al. Investigation on the potential of waste cooking oil as a grinding aid in Portland cement. **Journal of Environmental Management**, v. 184, p. 545-551, 2016.

LI, Q. et al. Evaluation of basic oxygen furnace (BOF) material into slag-based asphalt concrete to be used in railway substructure. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 593–601, 2016.

LIU, J.; JIANG, W.; LIU, X. **Impact of carbon quota allocation mechanism on emissions trading: An Agent-Based Simulation**. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2071-1050/8/8/826> . Acesso em: 22 Dez. 2016.

LUN, Y. et al. Mechanical mechanism for expansion and crack of mortars containing basic oxygen furnace slag sand. **Materials Research Innovations**, v. 19, p. 865-869, 2015.

LUZ, A. B.; ALMEIDA S. L. M. Normas técnicas e caracterização tecnológica dos agregados. In: LUZ, A. B.; ALMEIDA S. L. M. **Manual de Agregados para Construção Civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. cap. 6, p. 101 – 120.

MACHADO, M. L. P. et al. **Siderurgia para não siderurgista**. Vitória: Centro Federal de Educação Tecnológica do Estado do Espírito, 2003.

MARTINI, M. **Avaliação do potencial de expansão de agregados siderúrgicos através da difratometria de raios X e método de Rietveld**. 2015. 175 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo: São Paulo, 2015.

MASLEHUDDIN, M. et al. Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. **Construction and Building Materials**, v. 17, p. 105–112, 2003.

MAUTHOOR, S. et al. Characterisation of electric arc furnace slags as concrete aggregate in a small island developing state: A preliminary study. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 459–464, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete Microstructure, Properties and Materials**. The McGraw-Hill. 3rdEd. 2006.

MOTZ, H., GEISELER, J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. **Waste Management**, v. 21, p. 285-293, 2001.

MURPHY, J. N. et al. Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag. **Canadian metallurgical quarterly**, v. 36, p. 315-331, 1997.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Tradução de Ruy Alberto Cremoni. São Paulo: Bookman. 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Tradução de Ruy Alberto Cremoni. São Paulo: Bookman. 2010.

NONAT, A. **A hidratação dos cimentos**. Tradução de Maria Alba Cincotto. São Paulo: Ibracon, 2014.

NORVAL, D.; OBERHOLSTER, R.E. **Further processing and granulation of slags with entrained metal and high metal compound content, with specific reference to present manganese slag dumps as well as additions due to daily production**. Johannesburg, Southern African Pyrometallurgy, 2011.

NSA, Types of iron and steel slag. Disponível em: <http://www.slg.jp/e/slag/kind.html>. Acesso em: 15 set. 2016.

NT BUILD - NORDTEST METHOD. **NT BUILD 492** - Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Finland, 1999.

OLIVEIRA, V. C. H. C. **Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos estruturais**. 2015. 92 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

OLLIVIER, J.P.; TORRENTI, J.M. **A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte**. Tradução de Oswaldo Cascudo e Helena Carasek. São Paulo: Ibracon, 2014.

OWEN, D. The world is running out of sand. *Annals of Geology – The New Yorker*. 2017. Disponível em: http://www.newyorker.com/magazine/2017/05/29/the-world-is-running-out-of-sand?utm_medium=email&utm_source=newsletter&utm_term=170525&utm_campaign=ritholtz. Acesso em: 05 jun. 2017.

OZKAN, O.; SARIBIYINK, M. Alkali silica reaction of BOF and BFS wastes combination in cement. **Journal of civil engineering and management**, v. 19, p. 113 – 110. 2011.

PALANKAR, N. et al. Studies on eco-friendly concrete incorporating industrial waste as aggregates. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 4, p. 378–390, 2015.

PALANKAR, N.; SHANKAR, R. A.U.; MITHUN B.M. Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates. **Journal of Cleaner Production**. V. 129, p. 437-448, 2016.

PAN, S. Y. et al. Integrated and innovative steel slag utilization for iron reclamation, green material production and CO₂ fixation via accelerated carbonation. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 617 – 631, 2016.

PANG, B. et al. Utilization of carbonated and granulated steel slag aggregate in concrete **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 454–467, 2015.

PANZERA, T. H. et al. **Ultrasonic pulse velocity evaluation of cementitious materials**. Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials. 10.5772/17167. Cap. 17, p. 411-436.

PIATAK, N. M. et al. Characteristics and environmental aspects of slag: A review. **Applied Geochemistry**, v. 57, p. 236–266, 2015.

PINHEIRO NETO, J. C. et al. Revisão de estudos sobre a aplicação de escória de aciaria na pavimentação rodoviária. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 18., 2015, Foz do Iguaçu.

PINTO JUNIOR, L. A. B. **Fabricação de cimento portland contendo mistura de escória de aciaria LD e resíduo de granito**. 2012. 162 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

PRETORIUS, E.; OLTSMANN, H. **The reactions of CaO and MgO in steelmaking slags**. LWB Refractories, 2000. 41p.

QUADIR, M. et al. Comparative strength analysis of concrete by partial replacement of sand with basic oxygen furnace slag. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 5, p. 249 – 252. 2016

RAJAN, M. S. Study on strength properties of concrete by partially replacement of sand by steel slag. **International Journal on Engineering Technology and Sciences**, v. 1, p. 96 – 99. 2014.

RAVIKUMAR, H. et al. Experimental investigation on replacement of steel slag as coarse aggregate in concrete. **Journal of Civil Engineering and Environmental Technology**, v. 2, p. 58 – 63, 2015.

REDDY A. S. et al. Utilization of basic oxygen furnace (BOF) slag in the production of a hydraulic cement binder. **International Journal of Mineral Processing**, v. 79, p. 98–105, 2006.

ROUGEAU, P.; GUIRAUD, P. **A durabilidade no contexto normativo europeu**. Tradução de Geraldo C. Isaia. São Paulo: Ibracon, 2014.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 2006. 161p. Dissertação (Mestrado) Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

SANTOS, S. B.; BITTENCOUR, R. M.; GRAÇA, N. G. Concreto: Ciência e tecnologia. In: ISAIA, G. C. **Efeitos da temperatura sobre o concreto**. São Paulo: Ibracon, 2011. cap. 20, p. 705 - 731.

SHACKELFORD, J. F.; DOREMUS, R. H. **Ceramic and glass materials**. New York: Springer, 2010.

SHI, C.; QIAN, J. High performance cementing materials from industrial slags — a review **Resources. Conservation and Recycling**, v. 29, p. 195–207, 2000.

SINGH J.; ORDONEZ M. I. Resource recovery from post-consumer waste: important lessons for the upcoming circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 134, p. 342-353, 2015.

TAHA, R. et al. Use of local discarded materials in concrete. **International journal of sustainable built environment**, v. 3, p. 35–46, 2014.

TALERO, R. Synergic effect of Friedel's salt from pozzolan and from OPC co-precipitating in a chloride solution. **Construction and Building Materials**, v. 33, p. 164-180, 2012.

TEODORO, R. **Avaliação das características de diferentes metacaulins e sua influência na estrutura interna do concreto e em propriedades ligadas à durabilidade**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

TOSSAVAINEN, M. et al. Characteristics of steel slag under different cooling conditions. **Waste management**, v. 27, p. 1335–1344, 2007.

TSAKIRIDIS, P. E. et al. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, p. 805–811, 2008.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

WANG, G. et al. Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria. **Journal of Hazardous Materials**, v. 184, p. 555–560, 2010.

WANG, Q. et al. A discussion on improving hydration activity of steel slag by altering its mineral compositions. **Journal of Hazardous Materials**, v. 186 p. 1070-1075, 2011.

WANG, Q. et al. Effect of blended steel slag–GBFS mineral admixture on hydration and strength of cement. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 8–14, 2012.

WANG, Q; WANG, D.; ZHUANG, S. The soundness of steel slag with different free CaO and MgO contents. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 138–146, 2017.

WEBB, P. A.; ORR, C. **Analytical Methods in Fine Particle Technology**. 1^a ed. Norcross: Micromeritics Instrument Corporation. 1997. 301 p.

XIE, J. et al. Evaluation the deleterious potential and heating characteristics of basic oxygen furnace slag based on laboratory and in-place investigation during large-scale reutilization. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 78-87, 2016.

XIE, J. et al. Performance characteristics of asphalt mixture with basic oxygen furnace slag. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 796–803, 2013.

YANG, W. et al. Performance investigation and environmental application of basic oxygen furnace slag – Rice husk ash based composite cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 493–500, 2016.

YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. **Advances in Civil Engineering**, v. 2011, p. 1 – 13, 2011.

YU, X. et al. Performance of concrete made with steel slag and waste glass. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 737–746, 2016.

YUNXIA, L. et al. Methods for improving stability of steel slag as fine aggregate. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater**, v. 23, p. 737-742, 2008.

ZAGO, S. C. **Estudo do efeito da cristalinidade da escória de aciaria nas propriedades físico-químicas do cimento Portland CPIII**. 2015. 147 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

ZHANG, T. et al. Effects of size fraction on composition and fundamental properties. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3038-3043, 2011.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Método de dosagem pelo Módulo de Finura (Furnas)

O método de dosagem utilizado é denominado “Módulo de Finura” no qual se utiliza o módulo de finura da combinação dos agregados pois admite-se que o emprego de quaisquer dos agregados que tenham o mesmo módulo de finura, apesar de que possam ter diferentes porcentagens de tamanhos individuais, produzirão concretos com trabalhabilidade e consumo de água iguais ou semelhantes.

Para o início do estudo de dosagens, foram especificados alguns parâmetros que o concreto a ser dosado deveria apresentar, são estes o abatimento do tronco de cone, igual a 120 mm, classificado como concreto C100 e resistência à compressão para um f_{ck} de 30Mpa e f_{cj} de 36,6Mpa, aos 28 dias.

O estudo de dosagem teve início com a preparação das misturas ideais, a fim de definir inicialmente a porcentagem ideal de areia que torna o concreto satisfatório e mais econômico, visto que se buscou para cada mistura manter a mesma trabalhabilidade, obter o menor consumo de água e assim utilizar o menor percentual de areia que atendesse estas exigências. Para tal foram produzidos concretos com: 26%, 30%, 32%, 34 e 36% de areia, com relação 1:5 (relação entre cimento e agregados).

Nesta etapa o concreto ideal correspondeu ao concreto com 34%, pois com o aumento progressivo do teor de areia, este foi o que teve o menor consumo de água, o que favorece a resistência do concreto endurecido, mantendo a fluidez necessária.

A escolha do concreto com essas características se justifica pelo fato de que concretos com porcentagens de areia muito baixas produzirão concretos nitidamente ásperos, com um teor elevado de agregado graúdo. Contudo, à medida que se aumenta a porcentagem de areia, obtêm-se misturas de aspectos cada vez mais trabalháveis, até se atingir misturas com excesso de argamassa. Assim, a dosagem ideal, apresenta uma relação ideal entre menor relação a/c e melhor aspecto do concreto.

O concreto ideal com relação 1:5 e 34% de areia apresentou as seguintes características: V_{H_2O} : 6,63L e relação a/c: 0,46; abatimento do tronco de cone: 90mm, consumo de cimento: 373 kg/m³ e módulo de finura: 5,478.

Em face dos resultados, teve-se início a segunda etapa do método de dosagem, na qual são preparadas as denominadas misturas ótimas. Nesta etapa tomou-se, por precaução, a decisão de ajustar o módulo de finura, a fim de evitar que devido a possíveis variações características dos agregados, dado que a escória artificial de escória se caracterizava como um agregado de granulometria mais grosseira que a areia natural, o concreto se tornasse uma mistura áspera, com perda coesão e segregação de seus constituintes. Assim a nova dosagem teve o módulo de finura ajustado para 5,778 ($5,478+0,3$), obtendo a partir dos cálculos o novo teor de areia, equivalente a 38,5% e a/c: 0,488, para a relação 1:5.

Posteriormente ao ajuste, foram definidas novas relações em massa entre o cimento e o agregado total, sendo estas 1:3; 1:5 e 1:9, de modo que se manteve-se a relação $(\text{cimento} + \text{areia})/(\text{cimento} + \text{agregado total})$, designada por "k" e determinou-se as porcentagens de areia ótimas das demais relações, através da seguinte expressão: $k=(1+a)/(1+m)$, em que 'a' corresponde a razão entre o 'agregado total' e o 'percentual de areia', e m corresponde ao 'agregado total'. Obtendo-se assim três diferentes traços em massa seca de cimento: 1:5 (%a: 38,5); 1:9 (%a: 49,1) e 1:3 (%a: 31,7).

A dosagem dos três traços foi realizada, a partir das quais as seguintes informações foram definidas:

Tabela A1 - Características dos concretos produzidos para cada relação cimento/agregado estudada.

Relação cimeto/agregado	1:3	1:5	1:9
Cimento Equivalente [kg/m ³]	551	375	220
Água	194	163	149
Relação a/lig	0,352	0,435	0,677
Módulo Finura	5,577	5,283	5,084
% de areia em massa	31,70	38,50	43,10
% de areia em volume	32,0	38,8	43,5
Resistência à compressão 28 dias [MPa]	48,5	40,8	30,7

Fonte: Autoria própria.

As informações de resistência à compressão foram obtidas como uma resposta da hidratação dos concretos pelo período de 28 dias. Dispondo dos resultados apresentados na tabela, foram construídos as Curvas de Resistência à Compressão x Módulo de Finura;

Resistência à Compressão x Relação a/c; Percentual de Areia x Módulo de Finura; Água Unitária x Módulo de Finura e de Percentual de areia em volume x percentual de areia em massa, conforme imagens abaixo:

Figura A1 - Curvas de dosagem obtidas.

Fonte: Autoria própria.

Assim, para a dosagem estimada do concreto, ou seja, para a dosagem do concreto de referência (CR), adotou-se os seguintes parâmetros apresentados na tabela 2, com base na NBR 12655.

Tabela A2 - Parâmetros empregados para a dosagem do traço de referência.

Parâmetros	Valores
Desvio-padrão [MPa]	4
Resistência característica do concreto à compressão -fck [MPa]	30,0
Resistência média do concreto à compressão -fcm [MPa]	36,6
Idade de Controle [dias]	28,00
Traço em peso - 1:	6,57
Cimento Equivalente [kg/m ³]	292
Água Unitária [kg/m ³]	158
Relação a/c eq	0,54
Areia Natural [kg/m ³]	767
Brita 25mm [kg/m ³]	1151
Módulo de Finura	5,2
Aditivo Sikament PR [kg/m ³]	1,17
Percentual de argamassa com ar	57,4
Percentual de argamassa sem ar	54,4
% Areia em massa	40,0
% Areia em volume	40,3

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B - Difratometria de raios X da escória de aciaria LD.

Figura B1 - Difratograma de escória de aciaria LD.

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE C - Análise petrográfica da escória.

As lâminas petrográficas contendo partículas de escória foram analisadas em microscópio óptico petrográfico, marca Zeiss, modelo Axios-Kop, pela obtenção de fotomicrografia em luz polarizada e luz natural. A composição mineralógica da escória obtida por exame microscópico corresponde ao quartzo, feldspatos representados por labradorita e microclínio em fragmentos isolados de tamanhos variados e sem alterações aparentes; carbonato, espilélio, biotita, brucita, anfibólio e opacos, tais como hematita e magnetita, conforme exibido nas figuras C1 a C3.

Nas figuras C1 (A) e (B) são apresentados o aspecto geral da lâmina evidenciando a ocorrência de (1) fragmentos de minerais opacos; (2) material semelhante a quartzo microcristalino sendo substituído por carbonato e (3) agregado de quartzo deformado com extinção ondulante.

Figura C1: Exame microscópico com aspecto geral da lâmina contendo partículas de escória.

Fonte: Autoria própria.

Na figura C2(A) é exibida a ampliação do fragmento da figura 1B que contém agregado de quartzo com extinção ondulante (3) obtida em luz natural. Enquanto na figura C2(B), obtida em luz polarizada, é exibido o fragmento de material semelhante a quartzo microcristalino (1) sendo substituído por carbonato nas bordas como é possível visualizar pela alteração da coloração (2).

Figura C2 - Fotomicrografia das partículas que contém (a) quartzo com extinção ondulante, (b) possível quartzo microcristalino.

Fonte: Autoria própria.

Na figura C3 são apresentadas as fotomicrografia (A) obtida em luz natural e (B) em luz polarizada de fragmentos de material que sugerem a ocorrência de (1) quartzo microcristalino substituído nas bordas por (2) carbonato.

Figura C3 - Fotomicrografia das partículas que contém (a) quartzo com extinção ondulante, (b) possível quartzo microcristalino.

Fonte: Autoria própria.

De maneira geral, a lâmina delgada, impregnada com resina e confeccionada a partir da amostra de escória de aciaria LD, na granulometria de agregado miúdo, apresentou alguns cristais anédricos de minerais tais como quartzo, plagioclásio, anfibólio, olivina e biotita. Além de outros característicos de materiais adicionados ao longo do processo de geração do aço ou de produtos das reações desenvolvidas, tais como carbonatos e óxidos e hidróxidos de ferro, identificados por difração de raios X.

Verificou-se que o quartzo apresenta frequente extinção ondulante, o que evidencia uma deformação do quartzo provavelmente relacionado ao processo de cristalização, porém de baixo ângulo (entre 15 e 21°), figuras C1(A) e (B), e figura C2(A). Bem como, alguns fragmentos de escória apresentam material extremamente fino com características óticas de quartzo microcristalino, tal qual, exibido nas figuras C3 (A) e (B).

Com relação à potencialidade em promover reatividade da escória de aciaria LD utilizada nesta pesquisa para o uso como agregado, pode-se considerar que os fragmentos contendo quartzo microcristalino representam a única fase, identificada microscopia óptica, que apresenta esta suscetibilidade. Entretanto, por difração de raios X foram identificadas outras fases possíveis, como óxidos e hidróxidos de cálcio e magnésio.

APÊNDICE D - Resistência à compressão dos concretos.

Tabela D1 - Valores de resistência à compressão dos concretos nas idades de 28 e 180 dias.

Idade [dias]	Concreto	Res. à compressão [MPa]	Média [MPa]	Desvio padrão	CV [%]
28	CR	32,9	33,5	0,6	1,8
		33,4			
		34,1			
	CE25	32,1	33,6	1,5	4,5
		33,7			
		35,1			
	CE50	35,3	36,0	0,9	2,6
		35,7			
		37,1			
	CE75	34,3	36,1	1,6	4,5
		36,7			
		37,4			
180	CR	36,56	37,4	0,9	2,3
		37,47			
		38,30			
	CE25	35,8	37,7	1,9	4,9
		37,7			
		39,5			
	CE50	39,9	40,3	2,3	5,6
		40,6			
		44,1			
	CE75	39,2	41,0	1,6	4,0
		41,6			
		42,3			

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE E - Resistência à tração dos concretos.

Tabela E1 - Valores de resistência à tração dos concretos nas idades de 28 e 180 dias.

Idade [dias]	Concreto	Res. à tração [MPa]	Média [MPa]	Desvio padrão	CV [%]
28	CR	3,46	3,5	0,1	3,2
		3,62			
		3,27			
	CE25	3,72	3,6	0,3	8,1
		3,82			
		3,36			
	CE50	3,42	3,4	0,1	4,3
		3,64			
		2,8			
	CE75	3,22	3,1	0,3	9,0
		3,33			
180	CR	3,42	3,9	0,4	10,3
		3,95			
		4,2			
	CE25	3,43	3,8	0,4	11,1
		3,76			
		4,27			
	CE50	3,6	3,8	0,2	5,4
		3,89			
		4			
	CE75	3,34	3,6	0,3	8,8
		3,62			
		3,98			

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE F - Módulo de elasticidade dos concretos.

Tabela F1 - Valores do módulo de elasticidade dos concretos, nas idades de 28 e 180 dias.

Idade [dias]	Concreto	E [GPa]	Média [GPa]	Desvio padrão	CV [%]
28	CR	37,1	38,4	1,2	3,1
		38,7			
		39,4			
	CE25	36,5	36,7	0,2	0,5
		36,7			
		36,9			
	CE50	33,6	34,3	0,6	1,8
		34,4			
		34,8			
	CE75	34	34,8	0,9	2,7
		34,5			
		35,8			
180	CR	39,65	40,5	1,0	2,5
		40,32			
		41,65			
	CE25	37,5	38,7	1,5	4,0
		38,1			
		40,4			
	CE50	35,6	35,8	1,1	3,1
		36			
		37,7			
	CE75	36,4	38,1	2,5	6,5
		36,9			
		40,9			

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE G - Índice esclerométrico de blocos de concreto

Foi realizada a produção de peças de concreto para pavimentação com o emprego da escória, conforme NBR 9781. Foram produzidos blocos de concreto hexagonais, com 100 mm por lado. As peças foram mantidas na área externa do Laboratório de Durabilidade, pelo período de 180 dias, expostas a condição ambiental natural abrigada, conforme apresentado na figura G1.

Figura G1 - Área abrigada de envelhecimento natural e medidas da dureza superficial.

Fonte: Autoria própria.

Nestas peças foram realizadas análises de dureza superficial, pelo ensaio de esclerometria, normalizado pela NBR 7584, nas idades de 28, 91 e 180 dias. Foi utilizado o esclerômetro modelo Original Schmidt, tipo N/L, da marca PROCEQ, para faixa de resistência à compressão de 10 a 70 Mpa. Com o qual, a dureza superficial do concreto foi obtida pela realização de nove entalhes na superfície do elemento de concreto com distancias pré-estabelecidas para cada idade de análise, conforme ilustrado na figura G1.

Os resultados apresentados na figura G2, demonstram a redução da dureza superficial dos blocos de concreto em função do aumento do teor de escória, resultado que pode ser atribuído a baixa rigidez e resistência ao desgaste superficial da escória.

Figura G2 - Índice esclerométrico dos concretos aos 28, 91 e 180 dias, com intervalo de confiança de 95%.

Fonte: Autoria própria.

Tabela G1 - Valores médios por corpo de prova do índice esclerométrico.

	Índice esclerométrico - 28 dias					
	CR		CR25		CR50	
	32,6	31,1	32,6	31,1	26,3	25,2
	29,6	30,2	29,6	30,2	28,0	24,8
Média	30,9		30,9		26,1	
DP	1,3		0,6		0,3	
CV	4,2		1,9		1,0	
	Índice esclerométrico - 91 dias					
	33,0	35,3	28,6	33,2	26,0	26,8
	32,0	30,8	24,4	31,2	25,0	26,8
Média	32,8		29,3		26,2	
DP	1,9		1,4		0,0	
CV	5,8		4,7		0,0	
	Índice esclerométrico - 180 dias					
	33,0	36,1	30,9	30,6	29,3	27,5
	34,7	34,1	32,3	29,3	27,9	28,5
Média	34,5		30,8		28,3	
DP	1,3		0,9		0,7	
CV	3,7		3,0		2,4	

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE H - Absorção de água por imersão e índice de vazios dos concretos.

Tabela H1 - Valores de absorção de água e dos índices de vazios dos concretos, nas idades de 28 e 91 dias.

Idade [dias]	Concreto	Abs. H ₂ O [%]	Média	DP	CV	Índice vazios [%]	Média	DP	CV
28	CR	4,04	4,11	0,06	0,02	9,57	9,69	0,13	0,01
		4,11				9,67			
		4,17				9,83			
	CE25	4,18	4,28	0,13	0,03	9,95	10,16	0,29	0,03
		4,22				10,03			
		4,43				10,50			
	CE50	4,64	4,70	0,07	0,01	10,99	11,11	0,15	0,01
		4,68				11,07			
		4,78				11,28			
91	CR	3,32	3,3728	0,07	0,02	7,89	8,01	0,16	0,02
		3,34				7,94			
		3,45				8,19			
	CE25	3,39	3,41971	0,05	0,01	8,12	8,19	0,11	0,01
		3,39				8,14			
		3,48				8,32			
	CE50	3,79	3,86276	0,08	0,02	9,06	9,19	0,16	0,02
		3,85				9,15			
		3,94				9,37			

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE I - Resistividade elétrica superficial dos concretos.

Tabela I1 - Valores de resistividade elétrica superficial dos concretos, nas idades de 7, 14, 28 e 91 dias.

	Resistividade elétrica - 7 dias								
	CR			CE25			CE50		
CP1	14	14	15	13	13	14	11	11	11
CP2	15	15	15	14	14	14	11	12	12
CP3	16	16	17	14	15	15	12	13	13
Média [kΩ.cm]	15,2			14,0			11,8		
DP	1,0			0,7			0,8		
CV [%]	6,4			5,1			7,1		
	Resistividade elétrica - 14 dias								
CP1	19	19	20	17	17	18	14	14	14
CP2	20	20	20	18	18	18	14	14	15
CP3	20	21	21	19	19	19	16	16	16
Média [kΩ.cm]	20,0			18,1			14,8		
DP	0,7			0,8			1,0		
CV [%]	3,5			4,3			6,6		
	Resistividade elétrica - 28 dias								
CP1	24	24	24	21	22	22	18	18	19
CP2	24	24	26	22	23	23	19	19	19
CP3	26	27	28	23	23	25	19	21	21
Média [kΩ.cm]	25,2			22,7			19,2		
DP	1,6			1,1			1,1		
CV [%]	6,2			4,9			5,7		
	Resistividade elétrica - 91 dias								
CP1	30	31	31	26	27	27	22	22	22
CP2	31	31	32	27	28	29	23	23	23
CP3	32	35	35	30	31	35	24	24	25
Média [kΩ.cm]	32,0			28,9			23,1		
DP	1,8			2,8			1,1		
CV [%]	5,6			9,7			4,6		

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE J - Velocidade de pulso ultrassônico dos concretos.

Tabela J1 - Valores de velocidade de pulso ultrassônico dos concretos, nas idades de 7, 14, 28 e 91 dias.

	Velocidade de pulso ultrassônico - 7 dias								
	CR			CE25			CE50		
CP1	4831	4866	4890	4796	4831	4831	4773	4773	4773
CP2	4890	4890	4890	4890	4890	4890	4773	4796	4808
CP3	4890	4914	4950	4950	4950	4950	4831	4831	4831
Média [m/s]	4890,1			4886,4			4798,8		
DP	32,1			57,5			27,1		
CV [%]	0,7			1,2			0,6		
	Velocidade de pulso ultrassônico - 14 dias								
CP1	4866	4866	4866	4926	4926	4926	4807	4842	4855
CP2	4987	4987	4987	4950	4950	4950	4855	4855	4866
CP3	5013	5013	5076	4987	4987	4987	4866	4866	4901
Média [m/s]	4962,3			4954,3			4857,0		
DP	77,2			26,6			24,8		
CV [%]	1,6			0,5			0,5		
	Velocidade de pulso ultrassônico - 28 dias								
CP1	4890	4914	4950	4890	4950	4950	4831	4854	4866
CP2	4975	4975	5013	4950	4975	4987	4866	4890	4890
CP3	5013	5038	5076	4987	5013	5051	4890	4901	4926
Média [m/s]	4982,7			4972,6			4879,3		
DP	59,3			45,5			28,1		
CV [%]	1,2			0,9			0,6		
	Velocidade de pulso ultrassônico - 91 dias								
CP1	4950	4950	5013	4950	4950	4950	4890	4890	4926
CP2	5038	5051	5073	4950	4950	4988	4926	4926	4950
CP3	5076	5076	5076	5051	5116	5116	4950	4950	4950
Média [m/s]	5033,7			5002,3			4928,7		
DP	52,0			72,5			24,6		
CV [%]	1,0			1,5			0,5		

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE K - Profundidade de carbonatação dos concretos de referência.

Tabela K1 - Valores de profundidade de carbonatação dos concretos CR.

CR 14 dias	CP 1.1	CP 1.2	CP 2.1	CP 2.2
Profundidade 1	2,91	1,73	1,90	1,99
Profundidade 2	3,29	2,70	2,06	2,42
Profundidade 3	3,94	2,92	2,90	2,64
Profundidade 4	4,07	4,46	3,59	4,24
Profundidade Média	3,55	2,95	2,61	2,82
Profundidade 14 dias (mm)	2,99			
Desvio padrão	0,85			
CV (%)	0,28			
CR 28 dias	CP 1.1	CP 1.2	CP 2.1	CP 2.2
Profundidade 1	5,03	3,26	5,10	5,00
Profundidade 2	5,64	3,49	5,20	5,09
Profundidade 3	6,11	5,81	5,53	6,71
Profundidade 4	6,13	6,18	6,16	6,97
Profundidade Média	5,73	4,69	5,50	5,94
Profundidade 28 dias (mm)	5,46			
Desvio padrão	0,98			
CV (%)	0,18			

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE L - Profundidade de carbonatação dos concretos CE25.

Tabela L1 - Valores de profundidade de carbonatação dos concretos CE25.

CE25 14 dias	CP 1.1	CP 1.2	CP 2.1	CP 2.2
Profundidade 1	2,35	1,76	2,80	2,20
Profundidade 2	2,84	2,63	3,03	2,66
Profundidade 3	3,12	2,74	3,17	3,06
Profundidade 4	3,19	3,88	3,25	3,08
Profundidade Média	2,88	2,75	3,06	2,75
Profundidade 14 dias (mm)	2,86			
Desvio padrão	0,47			
CV (%)	0,17			
CE25 28 dias	CP 1.1	CP 1.2	CP 2.1	CP 2.2
Profundidade 1	6,32	6,56	4,03	5,24
Profundidade 2	6,47	7,45	6,47	7,63
Profundidade 3	7,52	7,52	6,56	8,09
Profundidade 4	9,64	10,23	7,48	10,17
Profundidade Média	7,49	7,94	6,14	7,78
Profundidade 28 dias (mm)	7,34			
Desvio padrão	1,61			
CV (%)	0,22			

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE M - Profundidade de carbonatação dos concretos CE50.

Tabela M1 - Valores de profundidade de carbonatação dos concretos CE50.

CE50 14 dias	CP 1.1	CP 1.2	CP 2.1	CP 2.2
Profundidade 1	3,17	2,91	2,46	2,65
Profundidade 2	3,23	3,25	3,35	3,45
Profundidade 3	3,27	4,34	3,86	4,57
Profundidade 4	5,80	4,75	4,57	5,29
Profundidade Média	3,87	3,81	3,56	3,99
Profundidade 14 dias (mm)	3,81			
Desvio padrão	0,94			
CV (%)	0,25			
CE50 (28 dias)	CP 1.1	CP 1.2	CP 2.1	CP 2.2
Profundidade 1	3,90	5,39	5,85	6,20
Profundidade 2	4,82	5,94	7,97	6,36
Profundidade 3	6,30	6,04	8,54	7,32
Profundidade 4	6,46	6,89	9,13	8,54
Profundidade Média	5,37	6,07	7,87	7,11
Profundidade 28 dias (mm)	6,60			
Desvio padrão	1,37			
CV (%)	0,21			

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE N - Coeficiente de difusão de íons cloreto dos concretos.

Tabela N1 - Valores do coeficiente de difusão de cloretos dos concretos.

Concreto	Coeficiente de difusão [10^{-12} m ² /s]	Média [10^{-12} m ² /s]	Desvio padrão	CV [%]
CR	11,13	12,79	1,5	11,5
	13,33			
	13,91			
CE25	9,96	10,33	0,3	3,1
	10,44			
	10,58			
CE50	9,96	10,29	0,4	4,0
	10,17			
	10,75			

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE O - Difratometria de raios X do concreto de referência sem ataque de cloretos.

Figura O1 - Difratograma do concreto CR não atacado por íons cloretos.

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE P - Difratometria de raios X dos concretos pós ataque de cloretos.

Figura P1 - Difrátograma dos concretos atacados por íons cloretos.

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE Q - Resistência à flexão das argamassas envelhecidas por imersão-emersão.

Tabela Q1 - Valores da resistência à flexão das argamassas após envelhecimento por imersão-emersão.

Concreto	Resistência à Flexão [MPa]	Média [MPa]	Desvio padrão	CV [%]
CR	8,1	8,8	0,9	10,0
	8,6			
	9,8			
CE25	5,4	7,4	1,8	23,9
	8,0			
	8,9			
CE50	5,8	6,4	1,6	25,0
	6,0			
	7,5			

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE R - Resistência à compressão das argamassas envelhecidas por imersão-emersão.

Tabela R1 - Valores da resistência à flexão das argamassas após envelhecimento por imersão-emersão.

Concreto	Res. Compressão [MPa]	Média [MPa]	Desvio padrão	CV [%]
CR	38,4	51,5	7,5	14,6
	52,9			
	53,6			
	55,4			
	57,4			
CE25	47,5	52,2	4,1	7,8
	49,1			
	52,5			
	54,3			
	57,7			
CE50	39,8	45,3	3,9	8,7
	44			
	45,5			
	46,6			
	50,6			

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE S - Resistência à flexão das argamassas envelhecidas naturalmente.

Tabela S1 - Valores da resistência à flexão das argamassas após envelhecimento natural.

Concreto	Resistência à Flexão [MPa]	Média [MPa]	Desvio padrão	CV [%]
CR	10,42	10,59	0,15	1,41
	10,65			
	10,70			
CE25	10,19	10,60	0,36	3,38
	10,81			
	10,81			
CE50	8,69	9,47	0,69	7,29
	9,70			
	10,01			

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE T - Resistência à compressão das argamassas envelhecidas naturalmente.

Tabela T1 - Valores da resistência à compressão das argamassas após envelhecimento natural.

Concreto	Res. Compressão [MPa]	Média [MPa]	Desvio padrão	CV [%]
CR	34,1	41,8	6,9	16,5
	36,8			
	40,2			
	42,3			
	43,7			
	53,9			
CE25	35,7	46,9	7,7	16,5
	40,1			
	47,0			
	50,6			
	51,0			
	56,8			
CE50	36,7	42,6	4,1	9,5
	39,0			
	42,9			
	44,3			
	45,5			
	47,4			

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE U - Difratometria de raios X das argamassas envelhecidas por imersão.

Figura U1 - Difratogramas das argamassas após envelhecimento por imersão

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE V - Difratometria de raios X das argamassas envelhecidas por imersão-emersão.

Figura V1 - Difratogramas das argamassas após envelhecimento por ciclagem.

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE W - Difractometria de raios X das argamassas envelhecidas naturalmente.

Figura W1 - Difratogramas das argamassas após envelhecimento natural.

Fonte: Autoria própria.

ANEXO

ANEXO A - Distribuição F de Snedecor.

Tabela A1 - Tabela de distribuição F de Snedecor, para o nível de significância de 5% ($p=0,05$). Para qual, os graus de liberdade do efeito avaliado estão no topo e os graus de liberdade do erro (resíduo), à esquerda.

Limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 5% de probabilidade.																				
GL	V1																			
V2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	40	60	120	240
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.0	243.9	244.7	245.4	245.9	248.0	251.1	252.2	253.3	253.8
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.329	19.353	19.371	19.385	19.396	19.405	19.412	19.419	19.424	19.429	19.446	19.471	19.479	19.487	19.492
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.785	8.763	8.745	8.729	8.715	8.703	8.680	8.594	8.572	8.549	8.538
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964	5.936	5.912	5.891	5.873	5.858	5.803	5.717	5.688	5.658	5.643
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735	4.704	4.678	4.655	4.636	4.619	4.558	4.464	4.431	4.398	4.382
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060	4.027	4.000	3.976	3.956	3.938	3.874	3.774	3.740	3.705	3.687
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637	3.603	3.575	3.550	3.529	3.511	3.445	3.340	3.304	3.267	3.249
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.688	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347	3.313	3.284	3.259	3.237	3.218	3.150	3.043	3.005	2.967	2.947
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137	3.102	3.073	3.048	3.025	3.006	2.936	2.826	2.787	2.748	2.727
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978	2.943	2.913	2.887	2.865	2.845	2.774	2.661	2.621	2.580	2.559
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854	2.818	2.788	2.761	2.739	2.719	2.646	2.531	2.490	2.448	2.426
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.753	2.717	2.687	2.660	2.637	2.617	2.544	2.426	2.384	2.341	2.319
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.671	2.635	2.604	2.577	2.554	2.533	2.459	2.339	2.297	2.252	2.230
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602	2.565	2.534	2.507	2.484	2.463	2.388	2.266	2.223	2.178	2.155
15	4.543	3.682	3.287	3.056	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544	2.507	2.475	2.448	2.424	2.403	2.328	2.204	2.160	2.114	2.090
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494	2.456	2.425	2.397	2.373	2.352	2.276	2.151	2.106	2.059	2.035
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.450	2.413	2.381	2.353	2.329	2.308	2.230	2.104	2.058	2.011	1.986
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.577	2.510	2.456	2.412	2.374	2.342	2.314	2.290	2.269	2.191	2.063	2.017	1.968	1.943
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.544	2.477	2.423	2.378	2.340	2.308	2.280	2.256	2.234	2.155	2.026	1.980	1.930	1.905
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.514	2.447	2.393	2.348	2.310	2.278	2.250	2.225	2.203	2.124	1.994	1.946	1.896	1.870
21	4.325	3.467	3.072	2.840	2.685	2.573	2.488	2.420	2.366	2.321	2.283	2.250	2.222	2.197	2.176	2.096	1.965	1.916	1.866	1.839
22	4.301	3.443	3.049	2.817	2.661	2.549	2.464	2.397	2.342	2.297	2.259	2.226	2.198	2.173	2.151	2.071	1.938	1.889	1.838	1.811
23	4.279	3.422	3.028	2.796	2.640	2.528	2.442	2.375	2.320	2.275	2.236	2.204	2.175	2.150	2.128	2.048	1.914	1.865	1.813	1.785
24	4.260	3.403	3.009	2.776	2.621	2.508	2.423	2.355	2.300	2.255	2.216	2.183	2.155	2.130	2.108	2.027	1.892	1.842	1.790	1.762
25	4.242	3.385	2.991	2.759	2.603	2.490	2.405	2.337	2.282	2.236	2.198	2.165	2.136	2.111	2.089	2.007	1.872	1.822	1.768	1.740
26	4.225	3.369	2.975	2.743	2.587	2.474	2.388	2.321	2.265	2.220	2.181	2.148	2.119	2.094	2.072	1.990	1.853	1.803	1.749	1.720
27	4.210	3.354	2.960	2.728	2.572	2.459	2.373	2.305	2.250	2.204	2.166	2.132	2.103	2.078	2.056	1.974	1.836	1.785	1.731	1.702
28	4.196	3.340	2.947	2.714	2.558	2.445	2.359	2.291	2.236	2.190	2.151	2.118	2.089	2.064	2.041	1.959	1.820	1.769	1.714	1.685
29	4.183	3.328	2.934	2.701	2.545	2.432	2.346	2.278	2.223	2.177	2.138	2.104	2.075	2.050	2.027	1.945	1.806	1.754	1.698	1.669
30	4.171	3.316	2.922	2.690	2.534	2.421	2.334	2.266	2.211	2.165	2.126	2.092	2.063	2.037	2.015	1.932	1.792	1.740	1.683	1.654
40	4.085	3.232	2.839	2.606	2.449	2.336	2.249	2.180	2.124	2.077	2.038	2.003	1.974	1.948	1.924	1.839	1.693	1.637	1.577	1.544
50	4.034	3.183	2.790	2.557	2.400	2.286	2.199	2.130	2.073	2.026	1.986	1.952	1.921	1.895	1.871	1.784	1.634	1.576	1.511	1.476
60	4.001	3.150	2.758	2.525	2.368	2.254	2.167	2.097	2.040	1.993	1.952	1.917	1.887	1.860	1.836	1.748	1.594	1.534	1.467	1.430
80	3.960	3.111	2.719	2.486	2.329	2.214	2.126	2.056	1.999	1.951	1.910	1.875	1.845	1.817	1.793	1.703	1.545	1.482	1.411	1.370
100	3.936	3.087	2.696	2.463	2.305	2.191	2.103	2.032	1.975	1.927	1.886	1.850	1.819	1.792	1.768	1.676	1.515	1.450	1.376	1.333
120	3.920	3.072	2.680	2.447	2.290	2.175	2.087	2.016	1.959	1.910	1.869	1.834	1.803	1.775	1.750	1.659	1.495	1.429	1.352	1.307
240	3.881	3.033	2.642	2.409	2.252	2.136	2.048	1.977	1.919	1.870	1.829	1.793	1.761	1.733	1.708	1.614	1.445	1.375	1.290	1.237

Fonte: Teodoro (2016).