

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**INFLUÊNCIA DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD NO DESEMPENHO DE
CONCRETOS COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO**

Autora: Tainá Varela de Melo

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Teresa Paulino Aguiar

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto

Belo Horizonte

2020

Tainá Varela de Melo

Influência da escória de aciaria LD no desempenho de concretos com baixo consumo de cimento

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil.

Orientadora: Profa. Dr^a. Maria Teresa Paulino Aguilar

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2020

M528i	<p>Melo, Tainá Varela de. Influência da escoria de aciaria LD no desempenho de concretos com baixo consumo de cimento [recurso eletrônico] / Tainá Varela de Melo. – 2020. 1 recurso online (71 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientadora: Maria Teresa Paulino Aguiar. Coorientador: Ricardo André Fiorotti Peixoto.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 65-71. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses. 3. Escoria - Teses. 4. Agregados (Materiais de construção) - Teses. 5. Concreto - Teses. 6. Cimento - Teses. I. Aguiar, Maria Teresa Paulino. II. Peixoto, Ricardo André Fiorotti. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 691(043)</p>
-------	---

Ficha catalográfica: Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG

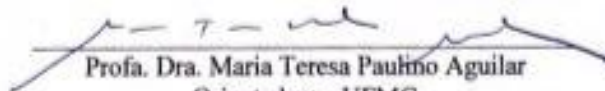
TAINÁ VARELA DE MELO

**"INFLUÊNCIA DA ESCORIA DE ACIARIA LD NO DESEMPENHO DE
CONCRETOS COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO"**


Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 14 de fevereiro de 2020

BANCA EXAMINADORA




Prof. Dra. Maria Teresa Paulino Aguiar
Orientadora - UFMG



Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto
Coorientador - UFOP



Prof. Dra. Adriana Guerra Gumjéri
UFMG



Prof. Dr. José Maria Franco de Carvalho
UEV

AGRADECIMENTOS

Acredito que tudo tem o seu tempo e jeito certo de acontecer. E além disso, a importância dos nossos objetivos está muito além do êxito, e sim nas trajetórias pelas quais passamos para alcançá-los. Agradeço à Deus por toda força e luz durante esse ano. Estou muito orgulhosa pelo resultado de todo meu empenho, e acima de tudo, grata por toda experiência e amizades que adquiri e consolidei nesse caminho.

Agradeço à minha família por depositarem uma confiança incondicional no meu trabalho e por cuidarem tão bem da minha mente e coração. Com certeza absoluta vocês foram e são meus maiores incentivares e confidentes. Essa conquista também é de vocês.

À Universidade Federal de Minas Gerais e a Universidade Federal de Ouro Preto, por me proporcionarem a oportunidade e toda infraestrutura necessária para desenvolver um trabalho de qualidade. Aos Professores, Servidores e Alunos de ambas as instituições por toda disponibilidade e empenho.

À minha orientadora Maria Teresa, por ter me acolhido com tanta dedicação e carinho. Você foi e é uma inspiração profissional e humana. Tenha certeza que encerro esse ciclo com um amadurecimento técnico e emocional muito maior do que quando iniciei.

Ao meu coorientador (orientador) Ricardo Fiorotti, por sempre ter me incentivado e confiado no meu potencial. Obrigada por toda orientação, preocupação e ajuda. O senhor me fez enxergar e valorizar todas as possibilidades que o trabalho com muita dedicação e capricho podem proporcionar.

Ao Grupo de Pesquisa Reciclos, ambiente de trabalho rodeado de profissionais que me inspiram, ajudam e incentivam diariamente. Esse trabalho não seria o mesmo sem vocês. Muito obrigada por tornarem esse ano, tão intenso e trabalhoso, mais leve.

Ao professor José Maria, por ser o primeiro profissional que impulsionou e cultivou o meu interesse pela pesquisa e vida acadêmica. Agradeço à toda sua disponibilidade, dedicação e amizade nesses últimos 3 anos.

À professora Adriana Gumieri, por toda disponibilidade e esforço nas aulas de Reologia, consolidando ainda mais a minha escolha de realizar o Mestrado na UFMG. E por aceitar contribuir com esse trabalho de forma tão minuciosa.

Ao Leandro Castro, meu parceiro de vida, por toda paciência, incentivo e amor durante esse ano. Obrigada por cuidar de mim e por compreender todos os sacrifícios necessários nesse período. Você foi fundamental!

Agradeço a todos os meus amigos que estiveram presentes nessa trajetória. Nada faria sentido sem o suporte que vocês se dispuseram a me dar. E as Repúblicas Artigo de Luxo e Pif Paf por serem fonte de amizade, distração e risadas. Obrigada por toda leveza!

Eu encerro esse ciclo muito orgulhosa de todo trabalho e trajetória. Com certeza todo o sacrifício e dedicação valeram a pena. Tenho ciência que estou apenas no início de uma jornada desafiadora, mas com confiança que tive uma base que me preparou para isso.

RESUMO

A produção de concreto, o material de construção mais consumido no mundo, está associada ao um consumo elevado de recurso naturais. Nesse cenário, a busca por materiais alternativos que substituam os agregados naturais e o cimento Portland se torna pauta importante no cenário da construção civil, impulsionando pesquisadores na busca por soluções. Por outro lado, a produção do aço gera escórias cuja destinação é muitas vezes inadequada. No entanto, esses subprodutos, por possuírem em sua composição elevadas quantidades de Ca, Si e Fe, na forma de silicatos e óxidos, apresentam similaridades com as matérias primas consumidas na produção dos concretos, como materiais cimentícios suplementares e agregados. Dessa forma, a escória tem grande potencial de aplicação em matrizes cimentícias, desde que critérios de desempenho mecânico e de durabilidade sejam atendidos. O presente trabalho se propõe a produzir e estudar concretos com baixo consumo de cimento com a utilização da escória de aciaria LD, com base em metodologia descrita na literatura, e analisar o seu desempenho com o uso desse subproduto como agregados graúdo, miúdo e material cimentício suplementar na matriz. O estudo possui uma abordagem de sustentabilidade e eficiência, uma vez que são desenvolvidos concretos com consumos de escória em até 96,5% em volume de sólidos, e avaliação da competência dos mesmos por meio de estudos de parâmetros físicos, químicos, mecânicos e de durabilidade. Foram estudados dois traços: um com agregados convencionais e outro com agregados de escória, ambos com um consumo de cimento inferior a 90 kg/m³ e com a mesma quantidade de finos de escória de aciaria LD como material cimentício suplementar. Os resultados indicaram que o traço com agregados de escória de aciaria se destacou ao alcançar uma intensidade de cimento de 2,47 kg/m³/MPa, enquanto o traço com agregados naturais alcançou 3,51 kg/m³/MPa. O desempenho desses concretos frente aos parâmetros de durabilidade e características microestruturais corroboraram com os ensaios físicos e mecânicos, inferindo um bom comportamento perante a agentes deletérios. A avaliação da ecoeficiência consolidou que utilização dos concretos propostos nesse trabalho pode implicar a uma redução de custo, elevado consumo de material reciclado e redução de impactos causados pelo consumo de agregados naturais e cimento.

Palavras chave: escória de aciaria LD, concreto com baixo consumo de cimento, agregados de escória, material cimentício suplementar.

ABSTRACT

The concrete production, the most consumed building material in the world, is associated with a high consumption of natural resources. In this scenario, the search for alternative materials that replace natural aggregates and Portland cement becomes an important issue in the civil construction scenario, driving researchers in the search for solutions. On the other hand, steel production generates slags whose destination is often inadequate. However, these by-products because they have high amounts of Ca, Si and Fe in their composition, in the form of silicates and oxides, have similarities with the raw materials consumed in the production of concretes, such as supplementary cementitious materials and aggregates. Thus, the slag has great potential for application in cementitious matrices, provided that criteria of mechanical performance and durability are met. The present work proposes to produce and study concretes with low cement consumption with the use of BOFS, based on methodology described in the literature, and to analyze their performance with the use of this by-product as coarse and fine aggregates and supplementary cementitious material. The study has a sustainability and efficiency approach, since concretes are developed with slag consumption of up to 96.5% in volume of solids and assessment of their competence through assessments of physical, chemical, mechanical and durability parameters. Two traits were studied: one with conventional aggregates and the other with slag aggregates, both with a cement consumption of less than 90 kg / m³ and with the same amount of LD slag fines as supplementary cementitious material. The results indicated that the mixture with steel slag aggregates stood out when reaching a cement intensity of 2.47 kg / m³ / MPa, while the mixture with natural aggregates reached 3.51 kg / m³ / MPa. The performance of these concretes in relation to the parameters of durability and microstructural characteristics corroborated with the physical and mechanical tests, inferring a good behavior towards harmful agents. The eco-efficiency assessment consolidated that the use of the concrete proposed in this work can imply cost reduction, high consumption of recycled material and reduction of impacts caused by the consumption of natural aggregates and cement.

Keywords: Blast oxygen furnace slag, low-cement concrete, slag aggregates, supplementary cementitious material.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	Concreto com baixo consumo de cimento.....	18
3.2	Uso da escória de aciaria na construção civil	20
3.2.1	Considerações gerais	20
3.2.2	Agregados de escória de aciaria	22
3.2.3	Escória de aciaria como material cimentício suplementar	24
3.2.4	Concretos com escória de aciaria	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1	Materiais	28
4.2	Métodos	29
4.2.1	Caracterização dos materiais.....	29
4.2.2	Beneficiamento e produção dos materiais.....	30
4.2.3	Determinação dos traços	32
4.2.4	Produção dos concretos	34
4.2.5	Caracterização física e mecânica do concreto no estado endurecido.....	34
4.2.6	Parâmetros de durabilidade do concreto	39
4.2.7	Análise microestrutural do sistema de poros.....	42
4.2.8	Avaliação da ecoeficiência dos concretos	43
5	DISCUSSÕES DE RESULTADOS	44
5.1	Caracterização química dos materiais	44
5.2	Caracterização física dos materiais.....	44

5.3	Morfologia dos agregados graúdos	46
5.4	Preparação dos materiais e moldagem dos corpos de prova	47
5.5	Caracterização física e mecânica do concreto no estado endurecido	49
5.5.1	Índice de vazios, absorção de água e massa específica.....	49
5.5.2	Velocidade de pulso ultrassônico.....	51
5.5.3	Frequência ressonante forçada	52
5.5.4	Resistência à compressão uniaxial	53
5.5.5	Resistência à tração por compressão diametral.....	56
5.6	Parâmetros de durabilidade do concreto.....	58
5.6.1	Resistividade Elétrica.....	58
5.6.2	Carbonatação Acelerada.....	59
5.7	Análise microestrutural do sistema de poros.....	61
5.8	Avaliação da ecoeficiência dos concretos	63
6	CONCLUSÕES	64
	BIBLIOGRAFIA.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processo de produção do aço.	21
Figura 2. Geração de coprodutos e resíduos por tipo.	21
Figura 3. Aplicação das escórias de aciaria e outras escórias.	22
Figura 4. Destinação e geração de coprodutos e resíduos.	23
Figura 5. Fluxograma das etapas do programa experimental proposto.	27
Figura 6. Agregados graúdos utilizados na pesquisa: a) Escória de aciaria LD e b) Gnaisse.	29
Figura 7. Fino grosseiro produzido pela autora.	32
Figura 8. Traço dos concretos estudados.	33
Figura 9. Conjunto do ensaio de velocidade pulso ultrassônico.	35
Figura 10. Conjunto do ensaio de frequência ressonante forçada.	36
Figura 11. Frequência ressonante média dos materiais.	37
Figura 12. Corpo de prova submetido à tração por compressão diametral.	38
Figura 13. Corpo de prova submetido à compressão simples.	39
Figura 14. Conjunto do ensaio de resistividade elétrica.	40
Figura 15. Modelo esquemático das variáveis envolvidas no ensaio.	40
Figura 16. Corpos de prova preparados para submissão à câmara de carbonatação.	42
Figura 17. Distribuição granulométrica dos finos utilizados na pesquisa.	45
Figura 18. Britas retidas na peneira 9.5 mm a) Brita gnaisse e b) Brita de escória de aciaria.	46
Figura 19. Materiais beneficiados separados nas frações do traço em recipientes independentes.	47
Figura 20. Medida do espalhamento do concreto.	48
Figura 21. Corpos de prova após desmoldagem.	48
Figura 22. Resultados obtidos no ensaio de índice de vazios, absorção de água por imersão e massa específica.	49

Figura 23. Concreto com agregados convencionais após 5 horas submerso em água à 100°C	50
Figura 24. Concreto com agregados de escória após 5 horas submerso em água à 100°C	50
Figura 25. Resultados obtidos no ensaio de velocidade pulso ultrassônico e valores do módulo de elasticidade	51
Figura 26. Resultados obtidos no ensaio de frequência ressonante forçada e valores de módulo de elasticidade	52
Figura 27. Resultados obtidos no ensaio de compressão simples	54
Figura 28. Corpo de prova com agregados convencionais após rompimento a compressão simples aos 28 dias de idade.....	55
Figura 29. Resultados obtidos no ensaio de tração por compressão diametral	56
Figura 30. Base de um corpo de prova com agregados convencionais rompido à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade	57
Figura 31. Seção diametral do concreto: a) Com agregados convencionais e b) Com agregados de escória de aciaria LD	57
Figura 32. Resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica	58
Figura 33. Concretos após o ensaio de carbonatação: a) Com agregados convencionais e b) Com agregados de escória de aciaria LD	59
Figura 34. Imagens inicial e final de uma das seções do concreto com agregado convencional no ensaio de porosidade superficial: a) Imagem tratada por scanner e b) Imagem binarizada.....	61
Figura 35. Imagens inicial e final de uma das seções do concreto com agregado de escória de aciaria LD no ensaio de porosidade superficial: a) Imagem tratada por scanner e b) Imagem binarizada.....	61
Figura 36. Resultados obtidos na análise do sistema de poros.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades físicas e químicas do cimento utilizado	28
Tabela 2. Normas de caracterização dos agregados utilizados na pesquisa.....	29
Tabela 3. Configuração do moinho de bolas empregado na pesquisa.....	31
Tabela 4. Configuração do moinho de alta eficiência empregado na pesquisa.....	32
Tabela 5. Classificação quanto à penetração de íons cloreto	41
Tabela 6. Resultados da análise química dos materiais utilizados na pesquisa	44
Tabela 7. Características físicas dos materiais utilizados na pesquisa	44
Tabela 8. Parâmetros granulométricos dos finos estudados.....	45
Tabela 9. Razão de poros e raio médio dos poros dos concretos avaliados	62
Tabela 10. Avaliação da ecoeficiência dos concretos estudados	63

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CP – Corpo-de- Prova

EA – Escória de Aciaria

IAB – Instituto Aço Brasil

LD – Linz-Donawitz

RSI – Resíduo Sólido Industrial

CAD – Concreto de Alto Desempenho

CBCC – Concreto com baixo consumo de cimento

ASTM – American Society for Testing and Materials

CPV – ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

MCS – Material cimentício suplementar

BOFS – Basic oxygen furnace slag

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das atividades industriais que mais consomem recursos naturais e representam uma parcela importante da economia brasileira (CBCS, 2018). No entanto, a escassez desses recursos, associado ao contexto do desenvolvimento sustentável tem incentivado a busca por soluções que tornem a construção ecoeficiente (GONÇALVES, FONTES, *et al.*, 2016).

A indústria da construção é apontada como responsável por 50% do consumo mundial de materiais, 40% da energia e por 50% da geração de resíduos (OIKONOMOU, 2005). Segundo a ANEPAC (2019), os agregados mais usuais são pedra britada, areia e cascalho, matérias primas mais consumidas no Brasil e no mundo. Face a essas situações e a escassez de materiais naturais, diferentes alternativas têm sido propostas, podendo-se destacar o uso de resíduos em substituição ao cimento e/ou agregados, de forma a se obter concretos com desempenhos iguais ou superiores aos convencionais (GUMIERI, 2002; CARVALHO, BORGES, *et al.*, 2017; ANDRADE, 2019).

Várias pesquisas sobre utilização de escória de aciaria como materiais de construção têm sido desenvolvidas por diversos autores. Destaca-se a aplicação deste material como agregados em substituição à areia e pedra britada em concretos e como material cimentício suplementar como substituto parcial do cimento (MASUERO, VILELA e DAL MOLIN, 2000; PEIXOTO, OLIVEIRA, *et al.*, 2008; ZHANG, YU, *et al.*, 2011; DINIZ, CARVALHO, *et al.*, 2017).

A fabricação do aço pode ser dividida em 3 grupos quanto ao seu processo de refino: LD (Linz-Donawitz) que faz uso do conversor de oxigênio elétrico, OH (Open Heart) que utiliza o forno Siemens-Martin e EAF (Eletric Arc Furnace) que faz uso do forno de arco elétrico (IAB, 2018). Dentre eles destacam-se o Linz-Donawitz (LD) e do Arco Elétrico (EAF). O processo Linz-Donawitz é utilizado no refinamento do lingote de ferro, já o processo do arco elétrico é usado na produção do aço a partir da sucata.

As escórias de aciaria LD e EAF em função de sua composição química, rica em Fe_2O_3 , CaO e MgO, precisa ser submetida a processos adicionais de estabilização do seu potencial de expansão (IAB, 2018; TRIPATHI e CHAUDHARY, 2016). Uma das formas mais eficazes de estabilização é a exposição às intempéries, que pode ser acelerada através do uso de ciclos de molhagem (TOFFOLO, 2015). A exposição das escórias de aciaria à intemperização e a

procedimentos de separação magnética, anteriormente ao seu beneficiamento, mostra-se eficiente na diminuição dos efeitos deletérios provenientes dos óxidos livres (SILVA, SOUZA, *et al.*, 2016; DINIZ, CARVALHO, *et al.*, 2017).

Dessa forma, o uso de escória de aciaria tratada é uma alternativa eficiente para reduzir o consumo de agregados naturais e o desenvolvimento de concretos com baixo consumo de cimento (CBCC). Além disso, os CBCC podem ter seu desempenho potencializado por meio de modelos de empacotamento de partículas e/ou materiais cimentícios suplementares (YOUSUFA, SANCHEZB e SHAMMEH, 2019; DAMINELI, KEMEID, *et al.*, 2010; CARVALHO, 2019).

As características físicas, como: distribuição granulométrica, textura superficial das partículas e índice de forma, influenciam diretamente na reologia do concreto, e consequentemente nas suas características no estado endurecido. Dessa forma, o arranjo das partículas na matriz é fundamental, uma vez que propicia o melhor empacotamento e, em conjunto com o fluido, determina as propriedades reológicas do material no decorrer do processo de mistura e no estado fresco (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

Como se trata de uma abordagem relativamente nova, o desempenho do CBCC estrutural a longo prazo ainda é pouco conhecido pela indústria da construção civil e por pesquisadores da área. Entretanto, o trabalho de Carvalho (2019) mostra que é possível produzir um concreto com boa resistência mecânica utilizando finos e agregados de escória de aciaria através de uma abordagem de máximo empacotamento das partículas.

Esse trabalho se propõe a avaliar os traços propostos por Carvalho (2019), com uma metodologia adaptada de mistura. O estudo abordará o protocolo de beneficiamento dos materiais utilizados, caracterização, produção dos concretos e avaliações relacionadas ao desempenho físico, mecânico, microestrutural e de índices de durabilidade dos corpos de prova.

2 OBJETIVOS

Objetivos Geral e Específicos

Avaliar a influência do uso da escória de aciaria LD no desempenho de concretos confeccionados com baixo consumo de cimento Portland.

Os objetivos específicos consistem em:

- Identificar a influência do uso da escória de aciaria LD, como materiais granulares e finos, nas características físicas/mecânicas do concreto de baixo consumo de cimento;
- Analisar a influência da escória de aciaria LD, como materiais granulares e finos, nos parâmetros de durabilidade dos concretos com baixo consumo de cimento;
- Avaliar a influência da microestrutura no desempenho dos concretos com baixo consumo de cimento;
- Analisar a ecoeficiência dos concretos com baixo consumo de cimento produzidos no trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Concreto com baixo consumo de cimento

Estima-se que até o ano de 2030, com a continuidade de desenvolvimento das grandes economias mundiais, o consumo de cimento terá um incremento de quase 80%, cerca de 5.000 milhões de toneladas/ano, quando comparado ao ano de 2008 (2011). Nesse contexto, existe uma pressão crescente na indústria da construção para a adoção de métodos ambientalmente mais sustentáveis para reduzir o consumo de materiais naturais. Um dos métodos mais eficientes nesse sentido é o uso de sistemas de baixo consumo de cimento, o chamado concreto de baixo consumo de cimento (CBCC), através de modelos de empacotamento de partículas e utilização de materiais cimentícios suplementares (YOUSUFA, SANCHEZB e SHAMMEH, 2019). Embora seja ecoeficiente, o uso de CBCC estrutural é algo novo e seu desempenho e sua performance a longo prazo ainda são relativamente desconhecidos.

O concreto do futuro conterà cada vez menos cimento Portland, em contrapartida mais materiais cimentícios suplementares ou mesmo adição de fílers serão utilizados largamente (AITCIN, 2000). Tal substituição é benéfica no ponto de vista econômico, reológico e de desenvolvimento de calor. No entanto, a resistência a compressão pode ser comprometida nas idades iniciais, devido a diminuição das propriedades cimentantes, esse fator é compensado pela redução considerável do consumo de cimento da matriz.

Os métodos usuais de dosagem de concretos convencionais mostram-se inadequados para a produção desses concretos ecoeficientes, visto que não incluem a possibilidade do uso de baixíssimas relações água/cimento, de materiais cimentícios suplementares e aditivos superplastificantes, ocasionando consumos excessivos de cimento (CREMONINI, DAL MOLIN, *et al.*, 1998).

Uma das formas mais usuais de reduzir o consumo de cimento é a utilização de aditivos superplastificantes (AITCIN, 2000). De acordo com Neville (2015), o uso de aditivo pode aumentar a densidade potencial da superfície das partículas, além disso, tal uso não gera efeitos sobre a fluência, módulo de elasticidade e retração, assim como não influenciam na durabilidade do concreto. Nesse contexto, além do uso de aditivos, faz-se necessária a elaboração de metodologias alternativas eficazes de redução do consumo de cimento sem comprometer negativamente o desempenho da matriz (CARVALHO, MELO, *et al.*, 2019; REBMANN, 2011).

Outra forma de contribuir no desenvolvimento de concretos com baixo consumo de cimento é utilizar materiais alternativos que possam manter o desempenho da matriz e substituir o cimento. Materiais cimentícios suplementares, incluindo as cinzas volantes, escória de alto-forno, sílica ativa, argilas calcinadas e pozolanas naturais, são comumente usados em matrizes cimentícias como substituição do clínquer no cimento ou uma porção do cimento no concreto (PELISSER, VIEIRA e BERNARDIN, 2017).

Hayles et al., (2018) desenvolveram concretos com baixo consumo de cimento utilizando agregados de concretos reciclados, sem adições químicas ou minerais. Uma abordagem relacionada intensidade de ligante vem sendo continuamente utilizada. Esse termo refere-se à relação do consumo de ligante em kg por m³ de concreto pela resistência a compressão em uma determinada idade (REBMANN, 2011; DAMINELI, 2013; CARVALHO, 2019). Uma mistura otimizada de 35 MPa foi desenvolvida com uma baixa intensidade de ligante de 9,2 kg/m³/MPa, referente a uma determinada resistência a compressão (HAYLES, SANCHEZ e NOËL, 2018).

Com uma abordagem de empacotamento e dispersão de partículas, utilização de fílers, adições minerais, e a escolha apropriada dos materiais, Rebmann (2011) obteve concretos com alta resistência e baixa utilização de cimento, com o consumo de 279 kg/m³ de cimento CP V – ARI atingiu resistências à compressão superiores a 50 MPa aos 28 dias, com intensidade de cimento de 5,58 kg/m³/MPa. Nesse contexto, concretos com baixo consumo de cimento podem alcançar características de durabilidade comparável ou até superior a concretos usualmente considerados como desempenho adequado (REBMANN, 2011; CARVALHO, 2019).

Com uma compreensão semelhante de empacotamento, o uso de agregados e de materiais cimentícios suplementares reciclados e baixo consumo de cimento, Carvalho (2019) alcançou com um consumo inferior a 90 kg/m³ de cimento CPV – ARI uma resistência à compressão de 37 Mpa aos 28 dias, com uma intensidade de cimento de 2,34 kg/m³/MPa. Nesse mesmo estudo, Carvalho (2019) elaborou dois traços de concreto com consumo inferior a 90 kg/m³, um com agregados naturais e finos de escória de aciaria LD e outro com as mesmas características, mas com a utilização de agregados de escória de aciaria LD, e alcançou respectivamente uma intensidade de cimento de 3,33 e 3,56 kg/m³/MPa.

A NBR 12655 (ABNT, 2006) estabelece o mínimo de consumo de cimento de 260 kg/m³ para concretos estruturais, enquanto a Norma Europeia indica o consumo mínimo de cimento referente a 240 kg/m³ para que os concretos estruturais não estejam submetidos ao risco de

corrosão (DAMINELI, KEMEID, *et al.*, 2010). Entretanto, Damineli et al (2010) sugerem que a performance dos indicadores de durabilidade não são afetados (retração e profundidade de carbonatação) ou até melhoram (penetração de cloretos e absorção de água), quando o consumo de cimento é reduzido dentro dos limites investigados pelas normativas.

3.2 Uso da escória de aciaria na construção civil

A escória de aciaria beneficiada pode ser usada como matéria-prima para inúmeros setores industriais. Dentre esses ramos, destaca-se o seu uso como agregados para pavimentações e na construção civil (TOFFOLO, 2015). Tal reaproveitamento diminuirá o uso de recursos naturais, reduzindo o acúmulo de resíduos em pátios e incrementando o desenvolvimento regional e tecnológico, além de agregar valores para esse coproduto do processo siderúrgico (OLIVEIRA, PEIXOTO e ALVES, 2007).

3.2.1 Considerações gerais

A fabricação do aço pode ser dividida em 2 grupos principais quanto ao seu processo de refino: LD (Linz-Donawitz) que faz uso do conversor de oxigênio elétrico e EAF (Eletric Arc Furnace) que faz uso do forno de arco elétrico. Posteriormente a todo processo de fabricação do aço, a escória é acomodada em um recipiente adequado e é transportada até o pátio, onde é despejada em baias de resfriamento. Durante essa etapa, ocorre a fragmentação da escória, que se dá devido ao choque térmico provocado pela aspensão de jatos de água. Em seguida ocorre o transporte desse material para ser estocado em pilhas nos pátios de beneficiamento (IAB, 2018).

Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004), normativa que classifica os resíduos sólidos, a escória de aciaria é classificada como um resíduo da classe II – não inerte e não perigoso. Na Figura 1, verifica-se todo o processo produtivo do aço, inclusive as etapas que são geradoras de escória de aciaria.

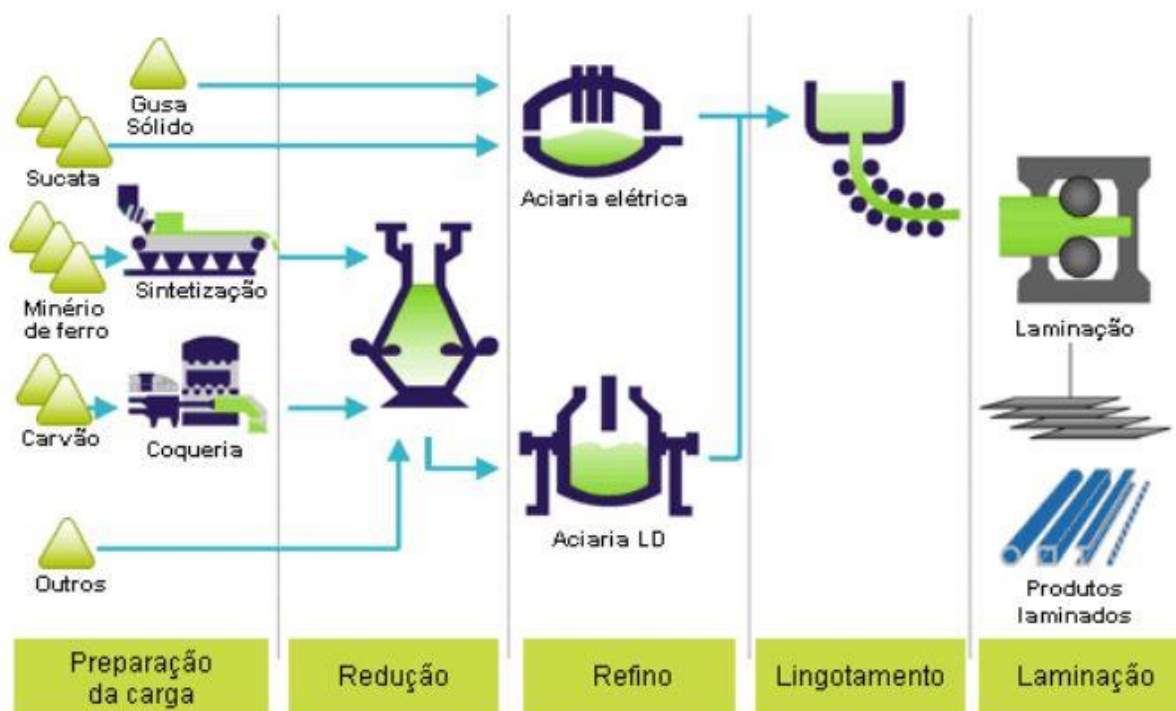


Figura 1. Processo de produção do aço.

Fonte: (IAB, 2018)

De acordo com o IBS (2009), a produção de aço no Brasil, é aproximadamente de 80% pelo processo LD e cerca de 20% através do processo EAF e apenas 1,9% pelo forno Siemens-Martin. No ano de 2017, a indústria siderúrgica mundial produziu cerca de 1,67 bilhões de toneladas de aço bruto, em particular o Brasil foi responsável pela fabricação de 34,4 milhões de toneladas. De acordo com o Instituto Aço Brasil (2014) são gerados cerca de 607 kg de resíduos para cada tonelada de aço produzido. Desse montante, 270 kg são de escórias de aciaria. Como se pode observar na Figura 2, a escória de aciaria refere-se a 28% dos coprodutos gerados pela indústria siderúrgica.

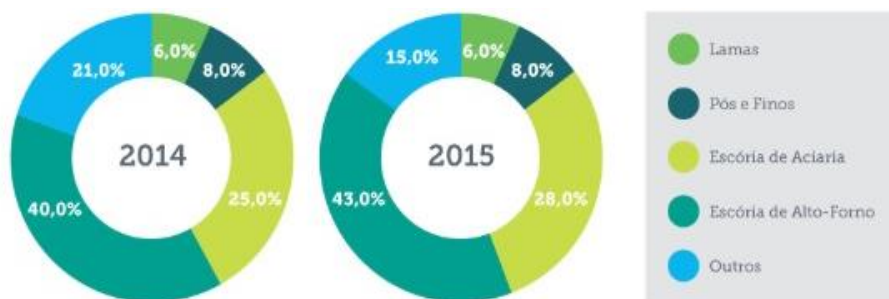


Figura 2. Geração de coprodutos e resíduos por tipo.

Fonte: (IABR, 2014)

Com relação a aplicabilidade de agregação de valor das escórias, a indústria siderúrgica concentra seu investimento de aplicação das escórias no setor da construção civil, como pode ser identificado na Figura 3.

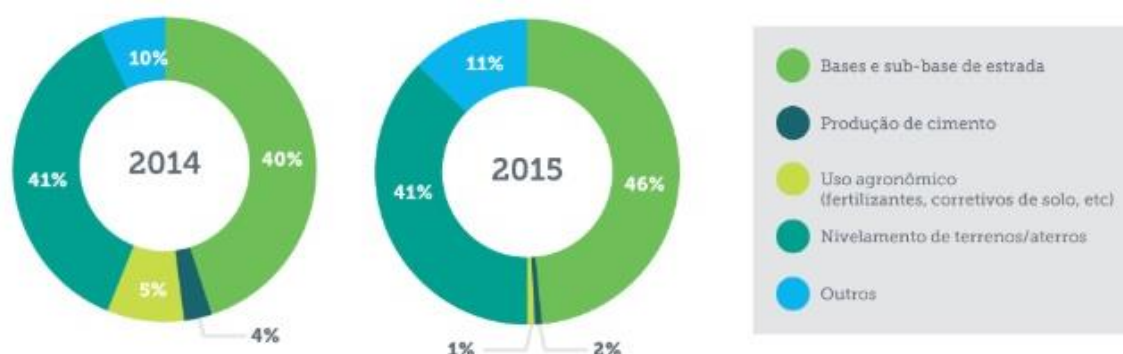


Figura 3. Aplicação das escórias de aciaria e outras escórias.

Fonte: (IABR, 2014)

Jianga et al. (2018) indicam diversas aplicações da escória de aciaria, tais como construção de estradas, concreto asfáltico, fertilizante agrícola e melhoria do solo. Contudo, uma melhor utilização para fins de valor agregado é através da sua incorporação no concreto como material cimentício suplementar, agregados miúdos e graúdos (JIANGA, LINGA, *et al.*, 2018).

3.2.2 Agregados de escória de aciaria

Agregados destinados para construção são definidos como materiais minerais, granulares e inertes, sendo seu uso direcionado principalmente em obras de infraestrutura e edificações em geral (ANEPAC, 2019). Tais agregados são obtidos de materiais rochosos variados, consolidados ou granulares, cominuídos naturalmente ou por processo industrial (ANEPAC, 2019).

De acordo com o Instituto Aço Brasil (2014), a tonelada da brita custava em média em 2014 cerca de R\$ 54,00, enquanto a escória de aciaria aplicada como agregado artificial (pedriscos: escória de aciaria com diâmetros entre 4 e 10mm e areia: escória de aciaria com diâmetros entre 0 e 4mm) em substituição aos agregados naturais (brita natural e areia natural), era comercializada por R\$ 5,00 a tonelada. A elevada geração de coprodutos e resíduos, aliada à viabilidade econômica do uso da escória de aciaria na construção civil, tornam-se uma alternativa viável de uso de resíduos para a indústria siderúrgica. A Figura 4 indica um estudo

do Instituto Aço Brasil de 2018 indica quantitativamente a geração e destinação desses materiais.

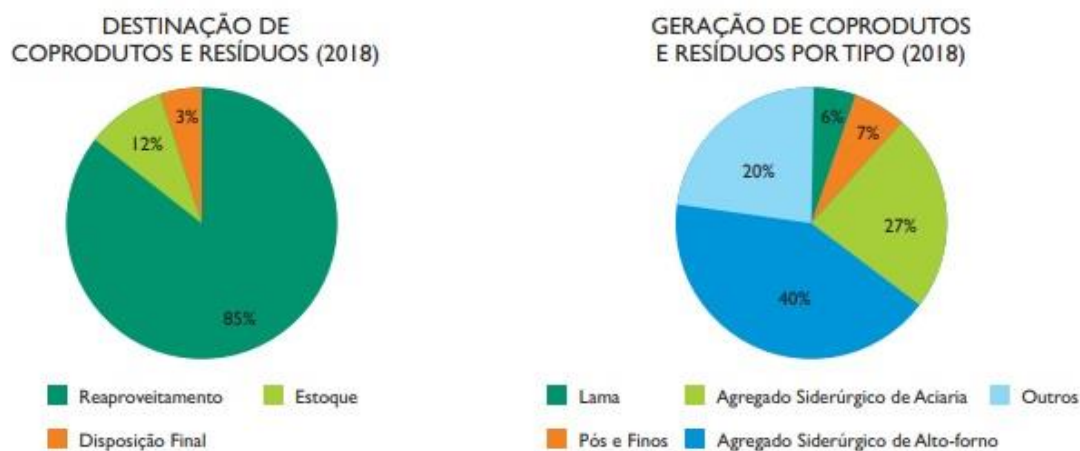


Figura 4. Destinação e geração de coprodutos e resíduos

Fonte: (IAB, 2018)

Considerando as alternativas em que as escórias de aciaria possam ser inseridas na cadeia produtiva da construção civil, é fundamental que se conheçam as características e o comportamento destes materiais, independentemente da rota de refino do aço (por arco elétrico ou Linz-Donawitz) os óxidos de ferro, silício e cálcio representam os componentes em maior proporção nas escórias de aciaria.

A escória de aciaria possui algumas características particulares como: boa resistência à abrasão, elevada massa específica e superfície rugosa, esses se devem as etapas do processo produtivo do aço (TOFFOLO, 2015). De acordo com Santos e Brito (2017), a água situada nos poros de agregados pode contribuir para hidratação lenta do cimento, desenvolvendo dessa forma a denominada “cura úmida interna”, que pode ser condicionada pelo volume dos poros desses agregados. Durante o processo produtivo do aço, fundentes como o calcário dolomítico e calcítico são adicionados, com o intuito de eliminar as impurezas do aço. Por esse motivo, as escórias apresentam teores relevantes de MgO e CaO, provenientes de tais fundentes. Como a dosagem desses fundentes varia de acordo com o processo produtivo, esse fato implica diretamente na composição química das escórias.

Os óxidos de magnésio e de cálcio presentes nas escórias de aciaria possuem elevada reatividade que em contato com a água se hidratam e formam produtos com volumes superiores aos precursores. De acordo com Machado (2000), a transformação do MgO em brucita ($Mg(OH)_2$) implica a um aumento de volume de aproximadamente 119%. Para mitigar a

expansibilidade das escórias, as mesmas devem ser submetidas a mecanismos de estabilização, através da exposição às intempéries (DINIZ, CARVALHO, *et al.*, 2017; SILVA, SOUZA, *et al.*, 2016). Uma alternativa para acelerar o processo de intemperização é a utilização de ciclos de molhagem e secagem (TOFFOLO, 2015).

Após esse processo de estabilização, concretos podem ser produzidos com escória de aciaria sem comprometimento de sua resistência perante as ações deletérias provenientes dos agentes expansivos, entretanto as partículas de aço ainda presentes no material de escória de aciaria podem comprometer a durabilidade (MANSO, POLANCO, *et al.*, 2006; SANTAMARÍA, ORBE, *et al.*, 2018). Já com relação às reações álcali-agregado, os concretos com agregados de escória de aciaria mostraram-se com expansões inferiores ao limite definido por norma para agregados deletérios de 0,2% (MANSO, POLANCO, *et al.*, 2006).

Nesse contexto, diversos estudos têm sido desenvolvidos por pesquisadores, que comprovam a viabilidade técnica e econômica do uso da escória de aciaria como materiais de construção. Em destaque vem o uso desse material como material cimentício suplementar como substituto parcial ao cimento Portland e como agregados em substituição à pedra britada e à areia em concretos (MASUERO, VILELA e DAL MOLIN, 2000; PEIXOTO, OLIVEIRA, *et al.*, 2008; ZHANG, YU, *et al.*, 2011).

3.2.3 Escória de aciaria como material cimentício suplementar

Os cimentos com adições, desenvolvidos com o aproveitamento de subprodutos de distintas atividades e matérias-primas alternativas, são elaborados no Brasil de forma pioneira há mais de 50 anos. Tal iniciativa vem sendo seguida atualmente por todo o mundo, atendendo às especificidades e os critérios de qualidade das normativas nacionais e internacionais.

Os materiais cimentantes suplementares (MCS) são materiais finamente cominuídos, utilizados em substituição parcial do clínquer diretamente na produção de cimentos, ou adicionados na produção de concretos (JUENGER e SIDDIQUE, 2015). Também denominados de adições minerais, podem ser classificados em três grupos referentes a sua influência físico química, sendo eles: materiais pozolânicos; materiais cimentantes e; fílers.

Estes materiais já vêm sendo empregados em substituição parcial ao clínquer pela própria indústria cimenteira, e algumas dessas adições são resíduos industriais como escória de alto-forno e cinzas volantes, utilizadas em teores de substituição muito significativos. As

principais motivações para o uso desses materiais em substituição ao clínquer são: redução do gasto energético provenientes do processo de produção, redução do calor de hidratação do concreto, e melhora das propriedades mecânicas e de durabilidade (GUMIERI, 2002).

Os resultados alcançados através da caracterização química, física e mecânica de matrizes, com o uso da escória de aciaria como material cimentício suplementar em substituições parciais ao cimento, expõem a viabilidade técnica da incorporação desse material (CARVALHO, MELO, *et al.*, 2019; QIANG, PEIYU, *et al.*, 2013). O elevado desempenho das matrizes com escória de aciaria é em parte justificado pela ação cimentante dos finos de escória, indicada pelo considerável teor de CaO. (WANG, YANG e YAN, 2013). Entretanto, a ação cimentante é realizada de forma mais lenta, e os melhores resultados são esperados nas idades tardias (DINIZ, CARVALHO, *et al.*, 2017). Esse fato corrobora com os resultados do estudo de Gumieri (2002) que indicam a maior formação de C_2S quando comparada ao C_3S na escória, em conjunto às reações cimentantes/pozolânicas que ocorrem mais lentamente.

Na avaliação de concretos com substituição parcial de 45% de escória ao cimento, Qiang, Peiyu, Jianwei, & Bo (2013) observaram um incremento de 87,5% da resistência a compressão ao comparar as idades de 10 dias e 100 dias. Nesse estudo, os concretos de referência tiveram um incremento de apenas 50%, o que enfatiza a ação cimentante da escória a longo prazo.

Estudos que utilizaram a escória de aciaria em frações finas em matrizes cimentícias, com granulometrias similares ao do cimento, obtiveram resistências similares as convencionais (WANG, YANG e YAN, 2013; SHI, CHEN, *et al.*, 2017). De acordo com Qiang e Peiyu (2010), durante o processo de hidratação da escória de aciaria, observa-se a formação de produtos de hidratação similares aos do cimento. Além disso, quanto mais finamente cominuída a escória de aciaria, maior será sua superfície específica, implicando a um incremento de sua reatividade.

A utilização destes materiais implica, além de benefícios ambientais, melhorias nas propriedades tecnológicas dos concretos. Há uma variedade de MCS sendo estudados, sendo que um dos focos principais tem sido a potencial utilização de resíduos na obtenção de novos MCS (JUENGER e SIDDIQUE, 2015). Algumas características de interesse são suas propriedades físicas, referentes a sua forma, área superficial e distribuição granulométrica; composição química e mineralógica (CARVALHO, 2019)

3.2.4 Concretos com escória de aciaria

A utilização da escória de aciaria como agregados e materiais cimentícios suplementares vem ganhando espaço no que compete ao desenvolvimento de concretos ecoeficientes com desempenhos similares aos dos concretos com materiais convencionais. Esse fato se deve às propriedades químicas e mecânicas da escória de aciaria, que incentiva a sua incorporação em concretos na forma de agregados ou como material cimentício suplementar.

Materiais tecnicamente competentes foram produzidos e relatados na literatura, destacando o uso de escórias de aciaria na substituição total ou parcial de agregados naturais em compósitos à base de cimento, incluindo concreto estrutural (BARROS, S'ANTANA, *et al.*, 2014; HERNANDEZ, CORTÉS e BUSTOS, 2015; HIDAYAH ROSLAN, ISMAIL, *et al.*, 2016). A viabilidade econômica do processamento e uso de escória de aciaria como agregados para construção civil e pesada também foi demonstrada (GONÇALVES, FONTES, *et al.*, 2016).

De forma geral, todas as propriedades mecânicas do concreto tendem a apresentar uma melhora com a substituição dos agregados. Diversos estudos observaram a resistência à tração e módulo de elasticidade crescente acompanhando resultados de compressão (ANASTASIOU, FILIKAS e STEFANI, 2014; SAN-JOSÉ, VEGAS, *et al.*, 2014). A incorporação de agregados graúdos de escória de aciaria em concretos de alto desempenho com adições minerais, tais como sílica ativa e escória granulada de alto forno, também geraram melhores resistências à compressão, sendo superiores aos convencionais.

Com relação às propriedades físicas dos concretos produzidos com escória de aciaria, os mesmos sempre possuem massa específica superior aos convencionais devido a elevada massa específica do agregado (SAN-JOSÉ, VEGAS, *et al.*, 2014; CARVALHO, BORGES, *et al.*, 2017). Nesse contexto observa-se o bom desempenho técnico de concretos com escória de aciaria LD, seja com o uso da escória como material cimentício suplementar e/ou como agregado, desde que seja controlada a expansão.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo da influência da escória de aciaria LD no desempenho de concretos com baixo consumo de cimento (96% em volume de escória de aciaria em substituição ao cimento Portland), conforme metodologia adaptada de Carvalho (2019), foi essencialmente experimental. Inicialmente foi realizada a caracterização física, química e morfológica dos agregados, seguida pelo processamento dos agregados e finos de escória. Posteriormente, foram produzidos e caracterizados os concretos compostos por agregados convencionais e agregados de escória de aciaria LD.

As etapas envolvidas estão descritas na Figura 5. Os trabalhos foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais e no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Ouro Preto.

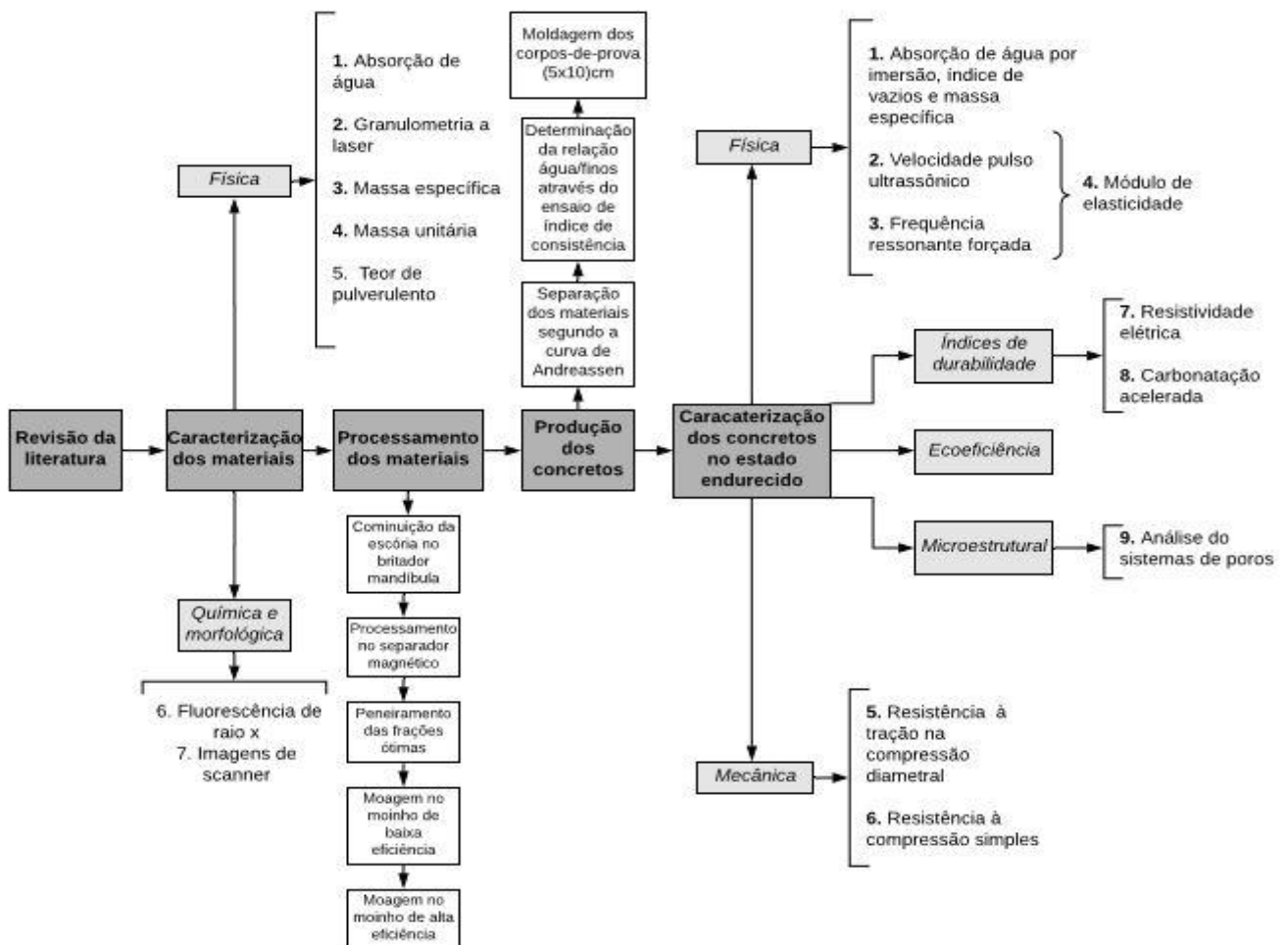


Figura 5. Fluxograma das etapas do programa experimental proposto

Fonte: Elaborado pela autora

4.1 Materiais

O aglomerante utilizado foi o cimento de alta resistência inicial CPV-ARI-MAX (Brennand cimentos, Sete Lagoas, MG), cuja composição fornecida pelo fabricante é apresentada na Tabela 1. Observa-se que este está em conformidade com as especificações da NBR 5733 (ABNT, 1991). Esse cimento foi escolhido por se tratar de um produto de elevado grau de pureza, ou seja, com reduzido teor de materiais cimentantes suplementares em sua composição (95-100% clínquer, 0-5% de filer calcário).

Tabela 1. Propriedades físicas e químicas do cimento utilizado

Parâmetro	Valor
Conteúdo de MgO, %	1,46
Conteúdo de SO ₃ , %	2,99
Conteúdo de CO ₂ , %	2,42
Resíduos insolúveis, %	0,97
Perda ao fogo, %	3,30
Área específica (Blaine), cm ² /g	4740
Massa específica, g/cm ³	3,04
Início de pega, min.	130
Fim de pega, min.	183
Resistência à compressão (1 / 3 / 7 / 28 dias), Mpa	(27,0 / 42,3 / 46,4 / 53,9)

Como agregado miúdo convencional, foi empregado uma areia natural quartzosa de rio, separado nas frações retidas nas peneiras 0,15 mm; 0,30 mm; 0,60 mm e 1,18 mm, proveniente da região de Ponte Nova, MG. Como agregado graúdo convencional foi utilizada rocha britada de origem gnáissica separado nas frações retidas nas peneiras 2,36 mm; 4,75 mm; 6,30 - 9,5 mm e 9,50 mm, proveniente de Ouro Preto, MG.

Para a produção dos agregados de escória e dos finos, foram utilizadas escórias de aciaria, do tipo LD (Linz-Donawitz) proveniente de João Monlevade, MG. Este material foi recebido e estocado no pátio do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Ouro Preto, onde ficou submetido a processo de intemperização em pilhas de aproximadamente 2 metros, por meio de ciclos de molhagem e secagem naturais por 4 anos.

O aditivo superplastificante escolhido é da marca McBauchemie, Powerflow 4000 e foi utilizado nesta pesquisa para atuar como redutor de água e melhorar a trabalhabilidade das matrizes produzidas. E a água potável utilizada foi fornecida pela Sema, na cidade de Ouro Preto.

4.2 Métodos

4.2.1 Caracterização dos materiais

Os agregados de aciaria LD, assim como os agregados convencionais, foram caracterizados conforme prescrições normativas aplicáveis relativas, apontadas na Tabela 2. Uma avaliação morfológica da escória foi realizada utilizando imagens do scanner HP Scanjet G4050 com resolução de 2400 dpi. Na Figura 6 são mostradas imagens referentes aos agregados graúdos utilizados na pesquisa, retidos na peneira 4.8.

Tabela 2. Normas de caracterização dos agregados utilizados na pesquisa

NORMAS			
Material	Areia quartzosa	Escória LD	Brita Gnaisse
Massa específica	NBR NM 52:2009 (ABNT, 2009)	NBR NM 53:2009 (ABNT, 2009)	
Massa unitária	NBR NM 45:2006 (ABNT, 2006)		
Teor de material pulverulento	NBR NM 46:2003 (ABNT, 2003)		
Absorção de água	-	NBR NM 53:2009 (ABNT, 2009)	

Fonte: Elaborado pela autora

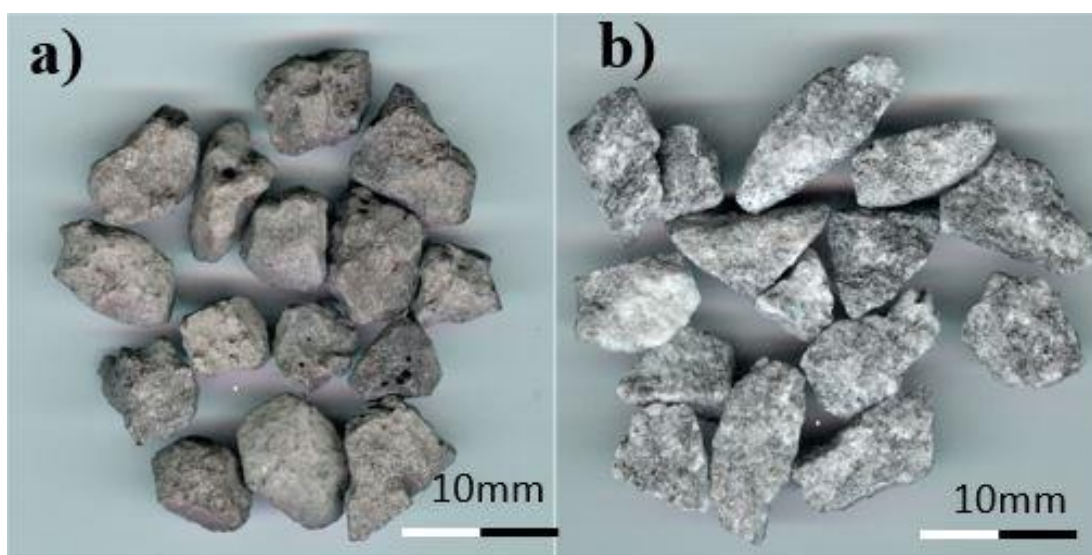


Figura 6. Agregados graúdos utilizados na pesquisa: a) Escória de aciaria LD e b) Gnaisse

Fonte: Elaborado pela autora

Para a caracterização química dos materiais empregados foi utilizada a técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), com o uso do equipamento PANalytical Epsilon3x. A análise

semiquantitativa foi feita empregando-se o banco de dados Omnian constante no *software* do fabricante do equipamento.

As distribuições granulométricas dos finos de escória, bem como do cimento, foram feitas utilizando-se a técnica de granulometria de laser. O equipamento empregado foi o analisador de partículas Bettersizer 2000 e o líquido utilizado foi álcool isopropílico. A massa específica dos materiais foi medida fazendo o uso da técnica do frasco de Le Chatelier, de acordo com metodologia NBR 16605 (ABNT, 2017).

4.2.2 Beneficiamento e produção dos materiais

4.2.2.1 Beneficiamento e produção dos agregados graúdos de escória de aciaria LD

Conhecido o quantitativo de material necessário para a produção dos concretos, estimados em função do traço, conforme proposto por Carvalho (2019), foram produzidos agregados em quantidade suficiente para esse fim, bem como para os procedimentos de caracterização física e química.

Os agregados graúdos foram produzidos de modo a se obter um material que satisfizesse as frações necessárias, para tanto os procedimentos utilizados foram:

- Separação da fração magnética por via seca em rolo magnético (Inbras CC Ø12 x 12, intensidade 5000 Gauss) e armazenamento das frações não-magnéticas.
- Cominuição do material retido na peneira 25 mm, proveniente da separação magnética, em britador de mandíbula.
- Peneiramento e separação das frações granulométricas de interesse.

O material obtido, após estes procedimentos, foi separado nas faixas 2,36-4,75 mm; 4,75 - 6,30 mm; 6,30 - 9,50 mm e 9,50 - 12,50 mm e pesado. O material excedente foi destinado à produção do agregado miúdo.

4.2.2.2 Produção dos agregados miúdos de escória de aciaria LD

Os agregados miúdos foram produzidos inicialmente a partir do material excedente da produção do agregado graúdo, de modo semelhante à metodologia apresentada para a produção do agregado graúdo. A separação das frações que compõem a faixa granulométrica foi feita por peneiramento e a montagem do material foi feita posteriormente de modo a se obter um material separado nas frações 0,15 a 0,30 mm; 0,30 - 0,60 mm; 0,60 - 1,18 mm e 1,18 - 2,36 mm. O material excedente foi descartado.

Foi necessário utilizar material em quantidade superior ao que foi descartado na produção do agregado graúdo, dessa forma, material adicional foi processado utilizando-se britador de mandíbula para o procedimento de cominuição e ser submetido a processo de separação magnética da fração metálica.

4.2.2.3 Produção dos agregados convencionais

Os agregados convencionais foram submetidos à peneiramento a fim de que todos estivessem com curva granulométrica idêntica aos agregados de escória de aciaria LD, conforme o traço proposto por Carvalho (2019). Desse modo, foi possível produzir concretos fisicamente semelhantes, no intuito de avaliar a influência da morfologia e composição do material nas suas propriedades.

4.2.2.4 Produção dos finos de escória

Os finos de escória foram produzidos a partir dos agregados miúdos obtidos, conforme descrito no item 4.2.2.2. Duas granulometrias distintas foram produzidas: (1) o Fino Grosseiro (FG), obtido por meio de moagem convencional em moinho de bolas (Marconi, MA500), cuja configuração está apresentada na Tabela 3; e (2) o Fino Refinado (FR), produzido a partir do fino grosseiro por meio de moagem adicional em moinho de alta eficiência (Retsch, PM100), conforme a configuração que está apresentada na Tabela 4. A Figura 7 refere-se a parte do fino grosseiro beneficiado.

Tabela 3. Configuração do moinho de bolas empregado na pesquisa

Configuração do moinho de bolas	
Material (jarro e esferas)	Aço inoxidável
Volume do jarro, cm ³	10 367
Volume útil, cm ³	3 422
Volume de material por ciclo de moagem, cm ³	1 740
Velocidade, rpm	200
Tempo de moagem, min.	180
Esferas (Quantidade / diâmetro, mm)	(7 / 22)
	(17 / 28)
	(34 / 31)
	(11 / 38)
	(16 / 41)

Tabela 4. Configuração do moinho de alta eficiência empregado na pesquisa

Configuração do moinho de alta eficiência	
Material (jarro e esferas)	Zircônia (YZrO ₂)
Volume do jarro, cm ³	250
Volume de material por ciclo de moagem, cm ³	80
Velocidade, rpm	400
Tempo de moagem, min.	45
Esferas (Quantidade / diâmetro, mm)	(99 / 10) (191 / 5)



Figura 7. Fino grosseiro produzido pela autora

Fonte: Elaborado pela autora

4.2.3 Determinação dos traços

A escolha do traço foi embasada no trabalho de Carvalho (2019) que adaptou o Método de distribuição de partícula de Andreassen, para construção da curva granulométrica e cuja a dosagem ótima de aditivo foi executada conforme a metodologia adaptada de Aitcin (2000). O método de Andreassen, consiste no cálculo do volume acumulado de partículas menor que D (CFPD), conforme indicado na Equação 1, sendo: D_L o diâmetro da maior partícula; D_s o diâmetro da menor partícula; e q o coeficiente de distribuição (adotado 0,2 para uma mistura trabalhável e compacta).

$$CPFT (\%) = 100 \left(\frac{D^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right)$$

Equação 1

Desse modo os agregados foram separados em frações de tamanho de partícula. Os agregados finos foram separados por peneiração na faixa de 0,15 à 0,30 mm; 0,30 - 0,60 mm; 0,60 - 1,18 mm e 1,18 - 2,36 mm. Da mesma forma, a fração graúda foi separada nas faixas 2,36-4,75 mm; 4,75 - 6,30 mm; 6,30 - 9,50 mm e 9,50 - 12,50 mm. Os traços escolhidos e estudados estão apresentados na Figura 8.

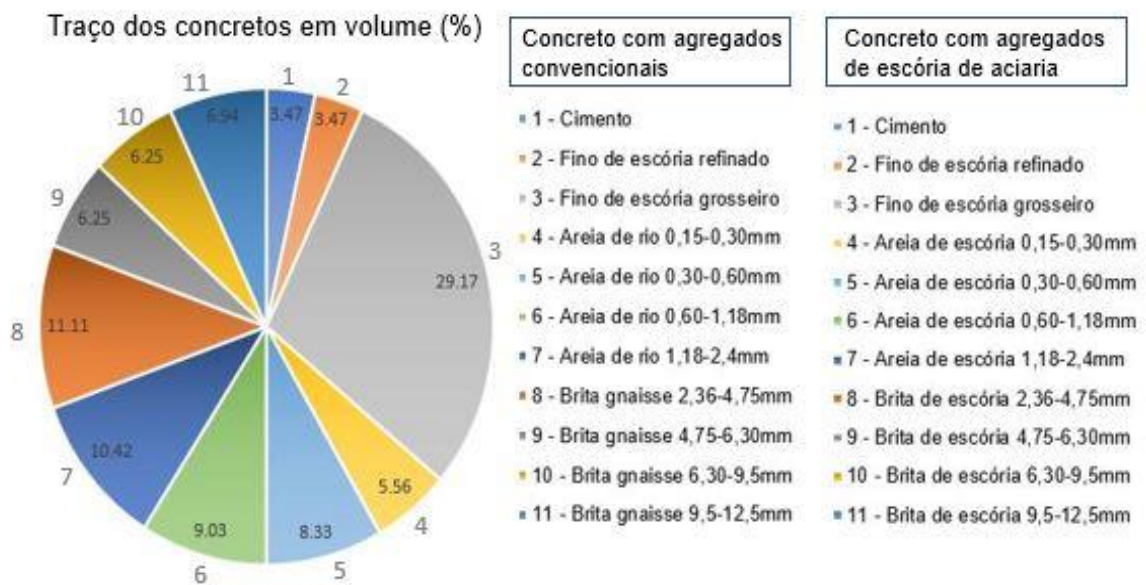


Figura 8. Traço dos concretos estudados

O traço desenvolvido possui uma relação água/sólidos ótima de $0,23 \pm 1$ em concretos com agregados convencionais e $0,24 \pm 1$ em concretos com agregados de escória, com o uso de 1% de aditivo da massa de finos. Essas condições implicam a uma condição de elevado empacotamento dos protótipos, resultando uma diminuição significativa de vazios e menor consumo de água.

Além da abordagem de elevada densidade de empacotamento, o traço estudado visa o maior consumo de materiais reciclados, afim de avaliar sua eficiência alcançado um consumo de material reciclado de até 96,5% em volume de sólidos e com consumo de cimento de 86,6 kg/m³.

4.2.4 **Produção dos concretos**

Para determinação do protocolo de produção do concreto foi utilizada a metodologia adaptada proposta por Carvalho (2019), que propõe a execução da mistura de forma manual e utilização dos agregados graúdos na condição saturada superfície seca. Os agregados miúdos foram secados em estufa a 105°C durante 24 horas e os agregados graúdos foram utilizados na condição saturada em superfície seca.

A ordem de preparo foi: agregado miúdo; finos de escória de aciaria; cimento; agregado graúdo, sendo que a cada incremento de material granular, houve uma homogeneização de um tempo médio de 30 segundos. Após a mistura, 100 ml de água com aditivo foram inseridos no sistema, durante um tempo médio de mistura de 2 minutos, e posteriormente cerca de 90 ± 5 ml foram adicionados cuidadosamente afim de alcançar uma consistência igual em ambos os traços. Em seguida foram realizados o ensaio de índice de consistência, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016), sendo fixado um espalhamento de 30 ± 1 cm para ambos os traços, visando manter as características reológicas do concreto fixadas independente das variáveis físicas dos agregados.

Todo o processo de produção do concreto teve como tempo máximo, por traço, o intervalo de 1 hora, evitando qualquer alteração no traço devido à pega do cimento. Os corpos de prova foram adensados em 3 camadas, com 10 golpes por camada, e curados por 7 e 28 dias em câmara úmida com umidade e temperatura controlada ($23 \pm 2^\circ\text{C}$ e 95%).

4.2.5 **Caracterização física e mecânica do concreto no estado endurecido**

4.2.5.1 **Massa específica, absorção de água e índice de vazios**

Foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos ($\text{Ø}50 \times 100$ mm) para cada traço para a caracterização física dos concretos. Para determinação da massa específica, absorção de água e índice de vazios aos 28 dias de idade, conforme métodos de ensaio prescritos pela NBR 9778 (ABNT, 2005). Os equipamentos utilizados foram a balança hidrostática, estufa (105 ± 5)°C e banho térmico (utilizado para fervura dos protótipos).

4.2.5.2 **Velocidade de pulso ultrassônico**

O método de ensaio para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de um componente de concreto, é prescrito pela NBR

8802 (ABNT, 2019). Desse modo, foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos (Ø50x100mm) para avaliação desse parâmetro. O ensaio foi realizado aos 28 dias de idade, sendo que a base e o topo dos corpos de prova foram polidos e recobertos por uma camada de vaselina para garantir e homogeneizar o contato entre as superfícies e o transdutor.

Para o ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) foi usado o equipamento TICO (Proceq), mostrado na Figura 9, com pulsos ultrassônicos de 54Hz e medições diretas.



Figura 9. Conjunto do ensaio de velocidade pulso ultrassônico

Fonte: Elaborado pela autora

Com base no resultado de VPU os concretos foram classificados quanto a sua qualidade/integridade. O concreto é classificado como excelente, bom, duvidoso e pobre para os respectivos intervalos de velocidade de pulso: >4500 m/s; 4500-3500 m/s; 3500-3000 m/s; e <3000 m/s (SAXENA e TEMBHURKAR, 2018; SAINT-PIERRE, PHILIBERT, *et al.*, 2016).

A Norma C597-09 (ASTM, 2019) propõe uma estimativa de determinação do módulo de elasticidade baseado na velocidade de onda, massa específica do elemento e coeficiente de Poisson do material por meio do uso da Equação 2.

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad \text{Equação 2}$$

Em que,

E é o módulo de elasticidade (MPa),

V é a velocidade Pulso Ultrassônica (m/s);

μ é o coeficiente de Poisson;

ρ é a massa específica (kg/m³);

4.2.5.3 Frequência ressonante forçada

A frequência ressonante forçada do material foi realizada no equipamento Erudite MKII *Resonancy Frequency Test System*, da C.N.S. *Electronics*. Com a frequência ressonante é possível o cálculo do módulo de elasticidade, através da utilização da normativa ASTM C-215 (2010). Em função das condições de contorno adotadas para solucionar a equação que relaciona módulo de elasticidade e frequência ressonante, é indicado que o corpo de prova tenha dimensões suficientemente grandes, ($\varnothing 100 \times 200$ mm). A Norma ASTM C-215 (2010) também prescreve que seja feito um número adequado de medidas de modo a minimizar a influência da heterogeneidade do material.

Com o intuito de otimizar o processo de beneficiamento e diminuir a quantidade dos materiais envolvidos no trabalho, o ensaio de frequência ressonante foi adaptado. Na Figura 10 é mostrado um corpo de prova cilíndrico ($\varnothing 50 \times 100$ mm) sendo submetido ao ensaio de frequência ressonante forçada através do aparelho Erudite.



Figura 10. Conjunto do ensaio de frequência ressonante forçada

Fonte: Elaborado pela autora

Nesse contexto foram moldados 3 corpos de prova (Ø50x100 mm) para cada traço e a frequência inserida no comando do equipamento para a realização do ensaio foi de 20 kHz, conforme apresentado na Figura 11.

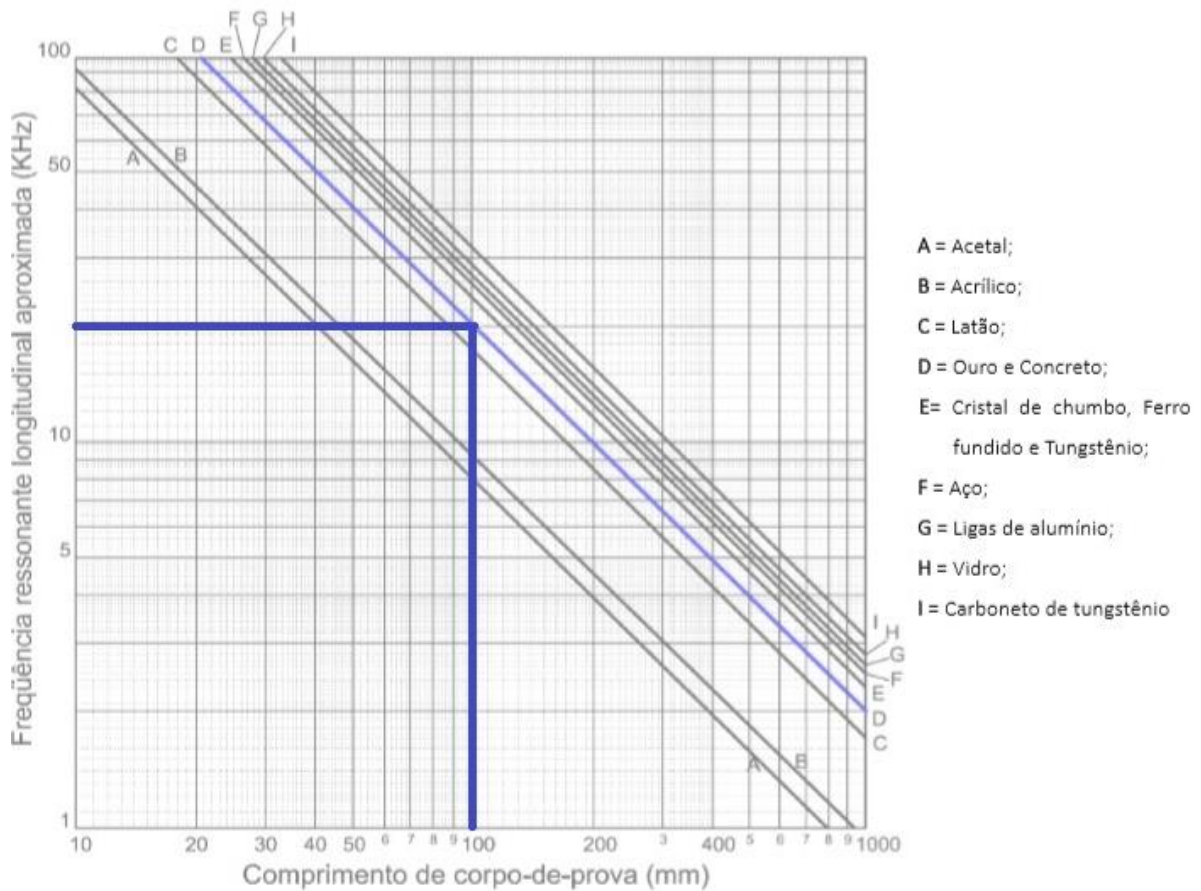


Figura 11. Frequência ressonante média dos materiais

Fonte: Manual Electronics, CNS (1995).

Com os resultados obtidos através ensaio de frequência ressonante forçada, calcula-se o módulo de elasticidade através da equação proposta pela Norma C215-08 (ASTM, 2010) a seguir na Equação 3.

$$E = CMn^2 \quad \text{Equação 3}$$

Em que,

E é o módulo de elasticidade (Pa);

M é a massa do corpo de prova (kg);

n é a frequência ressonante (Hz);

C é $1,6067 (L^3T/d^4) (m^{-1})$, para corpos de prova cilíndricos;

L é o comprimento do corpo de prova (m);

d é o diâmetro do cilindro (m);

T é o fator de correção.

4.2.5.4 Resistência à tração por compressão diametral

Foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos com dimensões ($\text{Ø}50 \times 100$ mm) por traço, os quais foram submetidos a ensaio de tração na compressão diametral, conforme metodologia prescrita pela NBR 7222 (ABNT, 2011). Os ensaios foram realizados com 7, 28 e 90 dias de idade, na prensa hidráulica EMIC, com célula de carga de 200 kN e velocidade de 0,3 MPa/s, sendo 4 corpos de prova ensaiados por idade. A Figura 12 indica um corpo de prova com dimensões ($\text{Ø}50 \times 100$ mm) sendo submetido à tração por compressão diametral.



Figura 12. Corpo de prova submetido à tração por compressão diametral

Fonte: Elaborado pela autora

4.2.5.5 Resistência à compressão uniaxial

Foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos por traço, com dimensões ($\text{Ø}50 \times 100$ mm), os quais foram submetidos a ensaio de compressão, conforme metodologia prescrita pela NBR 5739 (ABNT, 2018). Os ensaios foram realizados com 7, 28 e 90 dias de idade, na prensa hidráulica EMIC, com célula de carga de 200 kN e velocidade de 0,3 MPa/s, sendo 4 corpos de prova ensaiados por idade. A Figura 13 indicada mostra um corpo de prova com dimensões ($\text{Ø}50 \times 100$ mm) sendo submetido a compressão simples.



Figura 13. Corpo de prova submetido à compressão simples

Fonte: Elaborado pela autora

4.2.6 Parâmetros de durabilidade do concreto

4.2.6.1 Resistividade elétrica

A metodologia de ensaio para análise da resistividade elétrica volumétrica utilizada no Brasil é prescrita pela normativa NBR 9204 (ABNT, 2004). Nesse trabalho foi utilizada a metodologia adaptada pelo Laboratório de Caracterização de Materiais da UFMG, utilizando um aparelho composto por:

- gerador de Sinais da Politerm de modelo FG-8102;
- um Banco de Resistências;
- um Osciloscópio da Tektronix TDS 1012B;
- duas placas de cobre;

Os componentes e montagem do aparelho são mostrados em seguida pela Figura 14.

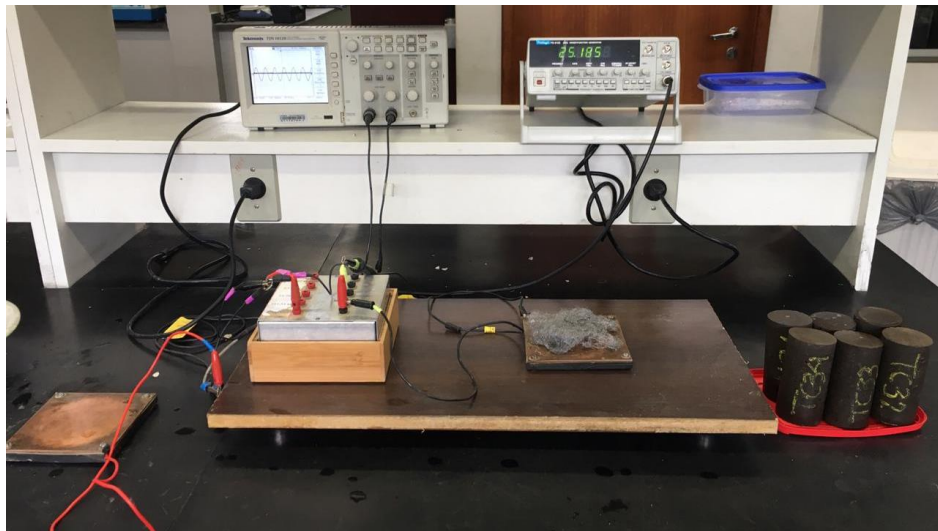


Figura 14. Conjunto do ensaio de resistividade elétrica

Fonte: Elaborado pela autora

Essa metodologia é uniaxial volumétrica onde o corpo de prova de concreto foi submetido a dois eletrodos (duas placas quadradas de cobre de espessura referente a 2 mm e arestas de 100 mm). Uma corrente alternada de frequência aproximada de 40 Hz foi aplicada e foram medidas as quedas dos potenciais entre os eletrodos.

Para determinação da resistividade elétrica, foram medidas a seção transversal, e o comprimento do material. Quanto maior a seção transversal, menor a resistência, devido a facilidade da passagem dos elétrons pelo material. A Figura 15 indica as variáveis envolvidas no corpo de prova durante a realização do ensaio.

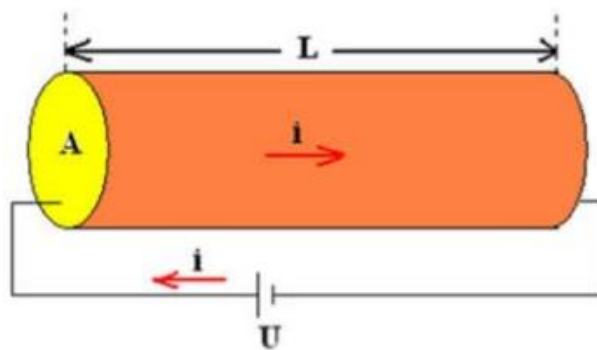


Figura 15. Modelo esquemático das variáveis envolvidas no ensaio

Fonte: Silva 2015

Assim, relacionando as grandezas determinadas do corpo de prova e com o resultado obtido pelo aparelho, pôde-se determinar a resistividade elétrica pela Equação 4.

$$\rho = \frac{(A \cdot R)}{L} \quad \text{Equação 4:}$$

Onde que:

R é a resistência elétrica (Ω/m);

ρ é a resistividade elétrica específica do material ($\Omega.m$);

L é o comprimento (m);

A é a área de seção transversal (m^2).

Foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos, com dimensões ($\varnothing 50 \times 100$ mm), e partir dos resultados obtidos nos ensaios aos 28 dias de idade, pôde-se inferir o risco de corrosão da armadura, devido a penetração de íons de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5. Classificação quanto à penetração de íons cloreto

Resistividade do concreto (Ohms/m)	Classificação quanto à penetração de íons
< 52	Alto
52 – 104	Moderado
208 – 2070	Médio
> 2070	Desprezível

Fonte: AASHTO TP 119 15 adaptado

4.2.6.2 Carbonatação acelerada

Foi realizado o ensaio de carbonatação acelerada fazendo o uso da câmara de carbonatação - SCO 26H ShellLab®, tendo como parâmetro a norma de desempenho de habitações, NBR 15575 (ABNT, 2013). Foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos por traço, com dimensões ($\varnothing 50 \times 100$ mm), para a análise deste. Como parâmetros do ambiente da câmara de carbonatação foram adotados: atmosfera com 8% de CO_2 , umidade relativa 50% e temperatura de $25^\circ C$, conforme metodologia utilizada por Andrade (2019). Para medida da profundidade de carbonatação foi empregada fenolftaleína como marcador.

A normativa NBR 15575 (2013) determina que para avaliação da durabilidade perante a carbonatação, faz-se necessário expor os concretos nas condições citadas durante 160 dias à uma atmosfera rica em CO_2 , na câmara de carbonatação, o que corresponde aproximadamente à 50 anos de exposição natural. Neste trabalho foi estudada uma exposição de 64 dias à um ataque de CO_2 , que é equivalente a 20 anos de exposição natural, sendo utilizado esse resultado como parâmetro de durabilidade.

Para a análise da carbonatação os corpos de prova foram recobertos com uma camada de fita “*silver tape*”, ao longo do comprimento e na base. O conjunto, corpo de prova e fita, foi selado externamente com camada adicional de parafina, expondo à atmosfera rica em CO₂ apenas a face superior, viabilizando os processos de carbonatação preferencialmente segundo a face exposta do corpo de prova, considerando o comprimento de 10 cm para frente de carbonatação (ANDRADE, 2019). Na Figura 16 são mostrados corpos de prontos para serem inseridos na câmara de carbonatação.



Figura 16. Corpos de prova preparados para submissão à câmara de carbonatação

Fonte: Elaborado pela autora

Para determinação da profundidade de carbonatação, foi utilizado método colorimétrico, empregando-se solução de fenolftaleína 1% (meio alcoólico), conforme prescrições da norma CPC-18 (RILEM, 1988). Para tal procedimento, o CP é fraturado ao longo do comprimento. Após a fratura, foi feita a aspersão da solução de fenolftaleína sobre a superfície, e a partir da diferença de tonalidade, rosa quando não houver carbonatação (pH alto) e sem coloração (pH baixo) quando houve carbonatação.

4.2.7 Análise microestrutural do sistema de poros

Para o avaliação microestrutural dos concretos, foi realizado o ensaio de análise do sistema de poros, cuja técnica avaliou o teor de poros na seção, de acordo com Mendes *et al* (2017). O protocolo do ensaio consiste no mapeamento e quantificação do número de poros identificados em uma seção com alto contraste de cor, a partir da contabilidade de pixels brancos e pretos, utilizando um algoritmo no software Scilab®.

Para sua execução, os corpos de prova 50x100 mm foram seccionados em 3 partes iguais, perpendicularmente à sua altura, com auxílio de uma serra diamantada em corte via úmida. Posteriormente as faces foram polidas com lixa d'água números 80 e 400. No momento em que a face se demonstrou-se lisa e homogênea, a área foi pintada com um pincel preto e recoberta por um material pulverulento de cor branca para ressaltar os poros, uma vez que o software necessita de um alto contraste entre os poros e a matriz.

As seções foram registradas digitalmente com scanner HP Scanjet G4050, com resolução de 2400 dpi, e tratadas por software de edição de imagens. O tratamento das imagens consistiu na seleção das regiões quadradas do centro do corpo de prova e transformá-las em imagens em preto e branco.

4.2.8 Avaliação da ecoeficiência dos concretos

A avaliação da ecoeficiência nesse estudo foi apresentada através da relação dos seguintes parâmetros: resistência mecânica, consumo de cimento e consumo de resíduo (DAMINELI, 2013). E correlacionando o desempenho mecânico à compressão e a quantidade de cimento consumida, obtêm-se a denominada intensidade de cimento, conceito utilizado por pesquisadores para determinar a eficiência de concretos com baixo consumo de cimento (DAMINELI, 2013; REBMANN, 2011; CARVALHO, 2019).

5 DISCUSSÕES DE RESULTADOS

5.1 Caracterização química dos materiais

Na Tabela 6 são apresentados os resultados das análises químicas dos materiais utilizados no projeto obtidos por FRX.

Tabela 6. Resultados da análise química dos materiais utilizados na pesquisa

Composto	Escória LD	Areia de Rio	Brita Gnaisse
SiO ₂	13,40%	59,60%	69,30%
Al ₂ O ₃	3,60%	31,30%	15,90%
Fe ₂ O ₃	31,30%*	4,70%	1,60%
CaO	36,20%	0,50%	2,60%
MgO	5,00%	-	0,70%
K ₂ O	-	1,70%	2,80%
SO ₃	0,30%	1%	-
MnO	3,70%	0,10%	-
Cr ₂ O ₃	0,008	-	-

**após separação magnética*

Os dados obtidos mostraram-se condizentes com o reportado pela literatura (CARVALHO, BORGES, *et al.*, 2017; ANDRADE, 2019; AZEVEDO, 2019). Cabe ressaltar que a análise química da escória indica uma quantidade significativa de CaO, o que sugere a presença de silicatos de cálcio e consequente ação cimentante, conforme citado em literatura (TRIPATHI e CHAUDHARY, 2016).

5.2 Caracterização física dos materiais

Os resultados obtidos na caracterização física dos agregados convencionais e reciclado são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Características físicas dos materiais utilizados na pesquisa

Material	Areia quartzosa	Escória LD	Brita Gnaisse
Massa específica (g/cm ³)	2,681	3,77	2,643
Massa unitária (g/cm ³)	1,532	1,945	1,558
Teor de material pulverulento (%)	0,79	3,62	2,34
Absorção de água (%)	-	1,54	1,28

Os agregados naturais apresentaram resultados de massa específica, massa unitária, teor de material pulverulento e absorção de água em concordância com os limites prescritos pela NBR 7211 (ABNT, 2005). A escória apresentou massa específica e unitária superior comparadas com os agregados naturais. Devido a sua característica superficial porosa, a escória possui uma absorção de água superior à brita gnaisse.

Os resultados da análise granulométrica obtida pela técnica do espalhamento do feixe de laser dos dois finos de Escória LD produzidos (grosseiro e refinado) e do cimento são apresentados na Tabela 8 e na Figura 17 por meio das porcentagens passantes (D90, D50 e D10).

Tabela 8. Parâmetros granulométricos dos finos estudados

Parâmetro	Fino grosseiro	Cimento	Fino refinado
D90 (µm)	126,9	36,91	39,59
D50 (µm)	27,23	10,95	8,55
D10 (µm)	1,863	1,743	1,109

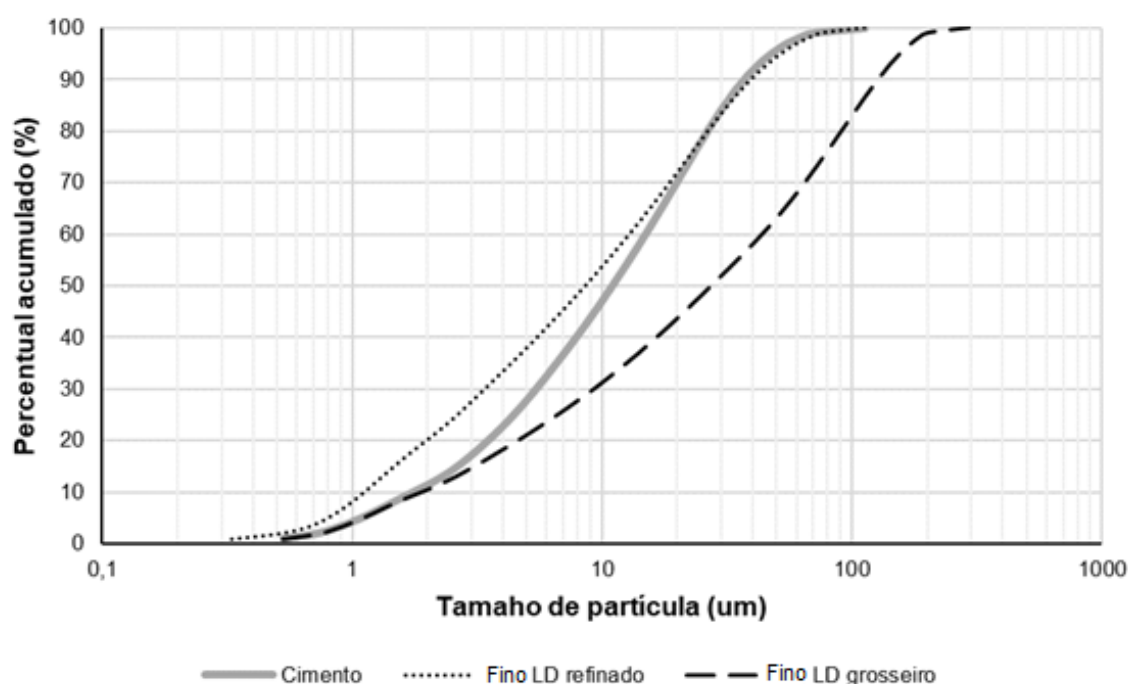


Figura 17. Distribuição granulométrica dos finos utilizados na pesquisa

Observa-se que os finos de escória LD alcançaram finuras respectivamente maior e menor que a do cimento estudado, atendendo ao objetivo da etapa de produzir um material que abrangesse uma faixa mais ampla que a distribuição granulométrica do cimento. Tal granulometria provavelmente influenciará na qualidade da nucleação proporcionada pelo efeito

fíler dos finos de escória e conseqüentemente na ação cimentícia dos mesmos (WANG, YANG e YAN, 2013; DINIZ, CARVALHO, *et al.*, 2017).

5.3 Morfologia dos agregados graúdos

As morfologias características dos agregados obtidas por meio de imagens feitas por scanner. São apresentadas a brita gnaisse e de escória em escala real, respectivamente na Figura 18.

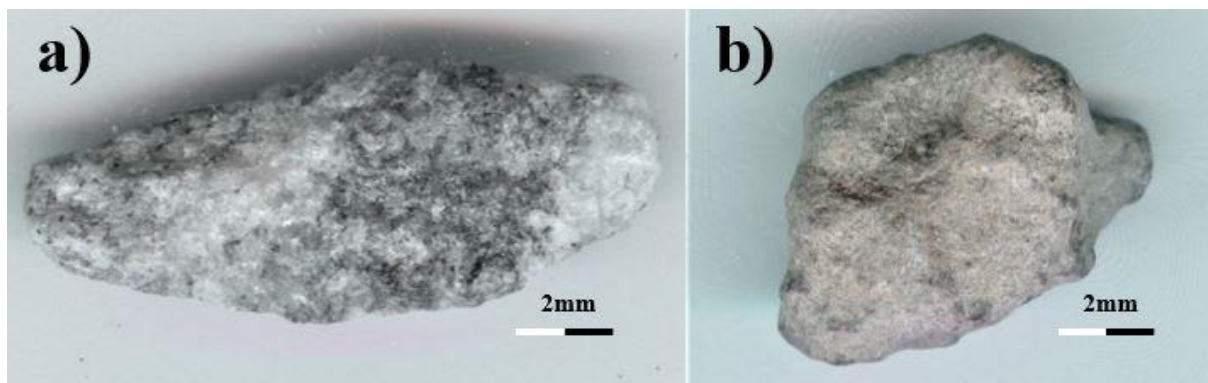


Figura 18. Britas retidas na peneira 9.5 mm a) Brita gnaisse e b) Brita de escória de aciaria

Através da análise das imagens de diversos grãos de brita gnaisse e escória de aciaria LD, com o uso de medições e tratamento de imagens, pôde-se concluir que a brita gnaisse possui forma característica lamelar e a escória possui forma característica cúbica. Desse modo, pode-se inferir que o formato cúbico da escória proporciona maior mobilidade a matriz cimentícia, melhor capacidade de ocupar vazios e promover maiores densidades de empacotamento. Além disso, tais características podem implicar a uma menor propensão de formação de zonas de transição interface enfraquecidas. Outro fato, que poderia potencializar a contribuição da morfologia é a elevada resistência a abrasão da escória, quando comparada a brita gnaisse (PANG, ZHOU e XU, 2015).

Nas imagens também podem ser identificadas a regularidade e uniformidade da superfície da brita gnaisse, em contrapartida a escória se mostra irregular e porosa. Essas características estão em conformidade com a literatura (BARROS, S'ANTANA, *et al.*, 2014) (BISKRI, ACHOURA, *et al.*, 2017) e com os resultados de caracterização dos materiais, que indicaram uma elevada absorção de água da escória quando comparada a brita gnaisse.

A água aprisionada nos poros e nas irregularidades dos agregados de escória pode ser liberada no decorrer da vida do concreto, proporcionando uma hidratação lenta da matriz, implicando a uma maior geração de produtos de hidratação a longo prazo, e conseqüente

aumento de resistência mecânica nas maiores idades. Por se tratar de um fenômeno autogerado e de cura do concreto, o mesmo pode ser denominado de cura autógena ou cura úmida interna (SANTOS e BRITO, 2017).

5.4 Preparação dos materiais e moldagem dos corpos de prova

Os materiais beneficiados foram divididos em recipientes independentes separados com cada fração granulométrica determinada pelo traço proposto por Carvalho (2019), como pode ser observado na Figura 19.



Figura 19. Materiais beneficiados separados nas frações do traço em recipientes independentes

Após a homogeneização dos materiais, no concreto fresco, foi determinada a consistência a fim de se manter o mesmo comportamento reológico dos concretos. Todos os concretos alcançaram espalhamento de $300\text{mm} \pm 10\text{mm}$. A relação água/ finos para os concretos com agregados convencionais foi de 0,65 e com agregados de escória 0,67, enquanto a relação água/sólidos foi 0,23 e 0,24 respectivamente. A Figura 20 apresenta a medida do espalhamento em um concreto de escória de aciaria.



Figura 20. Medida do espalhamento do concreto

O método de moldagem e adensamento mostrou-se eficiente, uma vez que os concretos não apresentaram brocas, poucos poros aparentes e boa uniformidade ao longo da matriz. Essa afirmação pode ser verificada através da Figura 21.



Figura 21. Corpos de prova após desmoldagem

5.5 Caracterização física e mecânica do concreto no estado endurecido

5.5.1 Índice de vazios, absorção de água e massa específica

Os resultados do ensaio de índice de vazios, absorção de água e massa específica dos concretos aos 28 dias são apresentados na Figura 22.

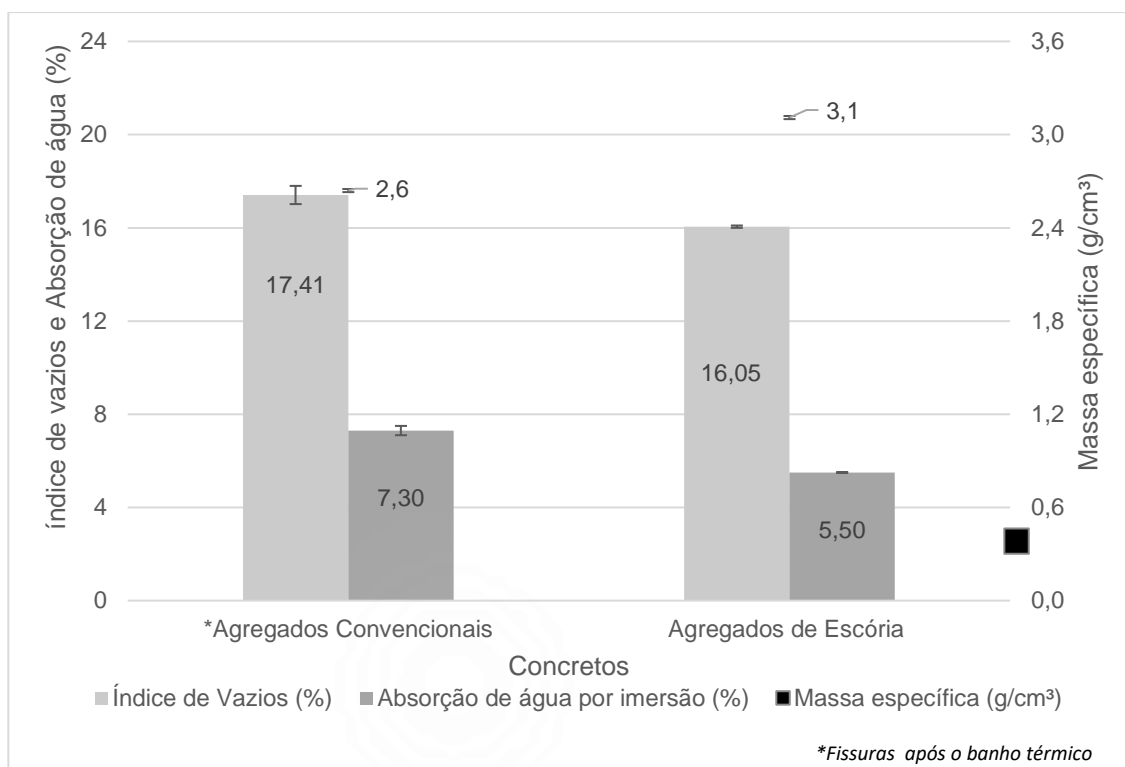


Figura 22. Resultados obtidos no ensaio de índice de vazios, absorção de água por imersão e massa específica

Os resultados indicam que o concreto com agregados de escória alcançou maior massa específica, ao passo que o concreto com agregados convencionais atingiu menor massa específica, fatos que corroboram com o estudo de Carvalho (2019). Esses estão associados a maior massa específica dos agregados de escória quando comparados aos convencionais. Tais resultados inferem a um bom desempenho mecânico de ambos os concretos.

Após ficarem submersos em banho térmico por 5 horas à 100°C, conforme protocolo prescrito pela normativa NBR 9778 (ABNT, 2005), os três corpos de prova com agregados convencionais apresentaram fissuras na extremidade superior de acordo com a moldagem, como está apresentado na Figura 23.

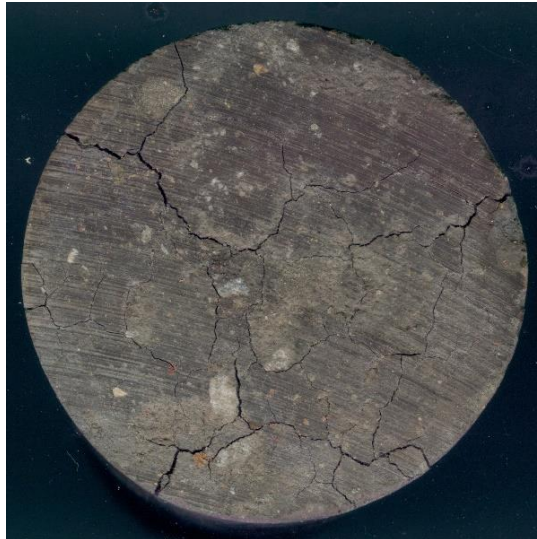


Figura 23. Concreto com agregados convencionais após 5 horas submerso em água à 100°C

Essa anomalia pode estar relacionada às características morfológicas dos agregados convencionais, que não proporcionou um adequado intertravamento com a pasta de finos, devido a sua forma lamelar, indicada no item 5.3. Os 3 concretos com agregados de escória se mantiveram aparentemente íntegros mesmo após serem submetidos as mesmas condições de submersão e temperatura, como é indicado na Figura 24.

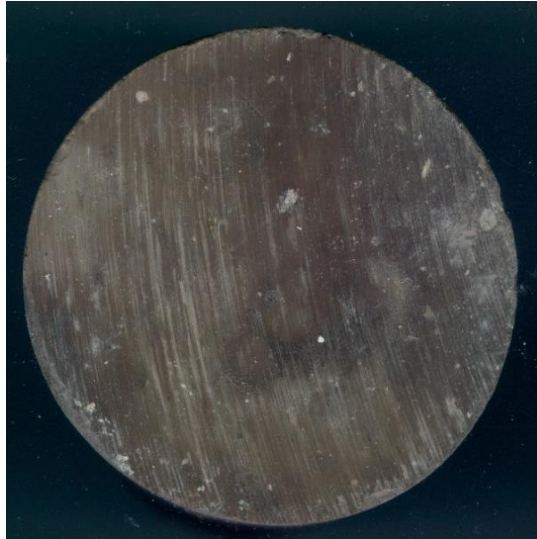


Figura 24. Concreto com agregados de escória após 5 horas submerso em água à 100°C

Com a medição das dimensões dos corpos de prova antes e depois do ensaio, pôde-se observar que as fissuras estão relacionadas a um processo de expansão, que foi verificado no aumento dos diâmetros dos corpos de prova com agregados convencionais. Esse comportamento seria justificado pela morfologia da escória, que é envolvida de forma mais

eficiente pela pasta de finos, garantido melhor acomodação dos grãos e por consequência, o impedimento do surgimento de fissuras decorrente do aumento da temperatura.

5.5.2 Velocidade de pulso ultrassônico

Os resultados de velocidade de pulso são condizentes com o estudo de Pang, Zhou, & Xu (2015), que afirmam que quando se aumenta o percentual de substituição dos agregados por escória, percebe-se também o aumento da velocidade de pulso ultrassônico dos concretos produzidos com agregados de escória. Isto ocorreria pois segundo Mehta & Monteiro (2014) e Mendes, et al. (2017) a porosidade e a forma com o que os vazios estão conectados, interferem diretamente o valor da velocidade de pulso ultrassônico. Os resultados obtidos no ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) e módulo de elasticidade são mostrados na Figura 25.

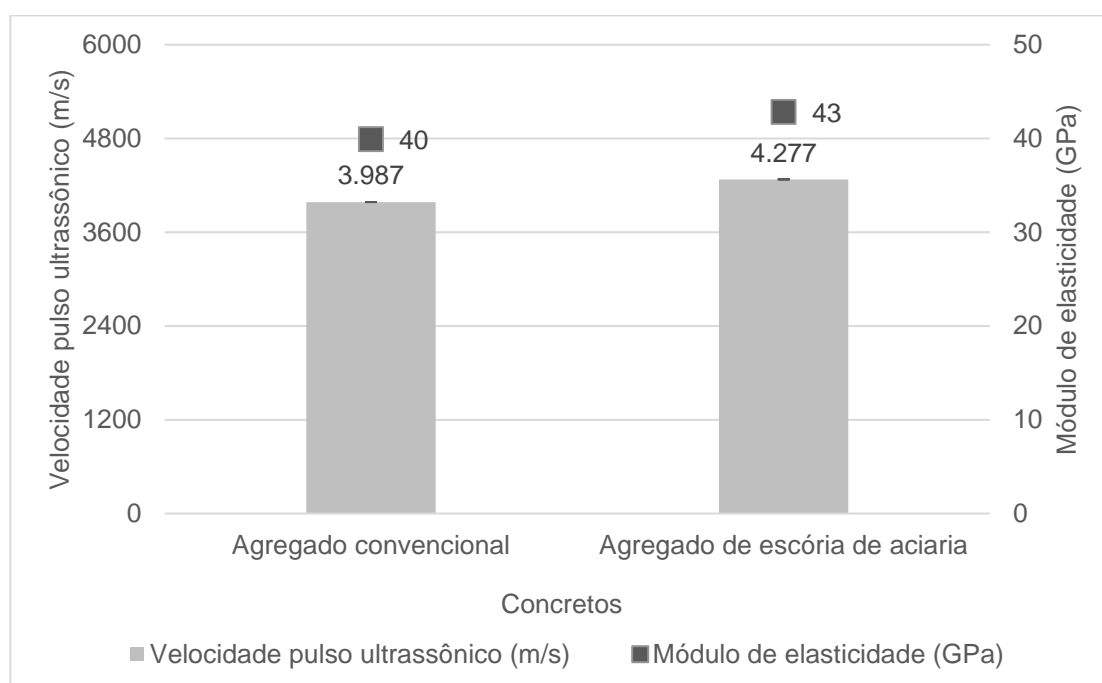


Figura 25. Resultados obtidos no ensaio de velocidade pulso ultrassônico e valores do módulo de elasticidade

Os valores de velocidade pulso ultrassônico ficaram entre 3500-4500 m/s. Os dados indicam que ambas as matrizes se encontram uniformes, coesas e compactas (SAINT-PIERRE, PHILIBERT, *et al.*, 2016; SAXENA e TEMBHURKAR, 2018). Dessa forma, pode-se inferir a eficácia da metodologia de empacotamento e moldagem, e competência dos finos de escória como material cimentício suplementar, que tem seu desempenho potencializado com o uso de agregados de escória.

No que concerne aos módulos de elasticidade calculados com a velocidade de pulso, ambos corresponderam aproximadamente a concretos de classe C50 produzidos com agregados de granito, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014). Os dados indicam que o concreto de escória apresenta um módulo de elasticidade ligeiramente superior, o que confirma que a deformação elástica do concreto está diretamente relacionada à composição do traço, e principalmente à natureza dos agregados.

Ambos os concretos apresentam alto módulo o que indica alta coesão e uniformidade de ambos os concretos, devido ao bom empacotamento proporcionado pela adequada distribuição granulométrica, efetividade do método de adensamento e a elevada qualidade dos materiais utilizados.

5.5.3 Frequência ressonante forçada

A frequência dos concretos foi da ordem de 20.000Hz. Considerando as diferenças de tamanhos, Ø100x200mm e Ø50x100mm, estes resultados são condizentes com o especificado no manual do equipamento (Figura 11) e no estudo de Sales (2008). Os resultados do ensaio de frequência ressonante forçada e os valores do módulo de elasticidade são expostos na Figura 26.

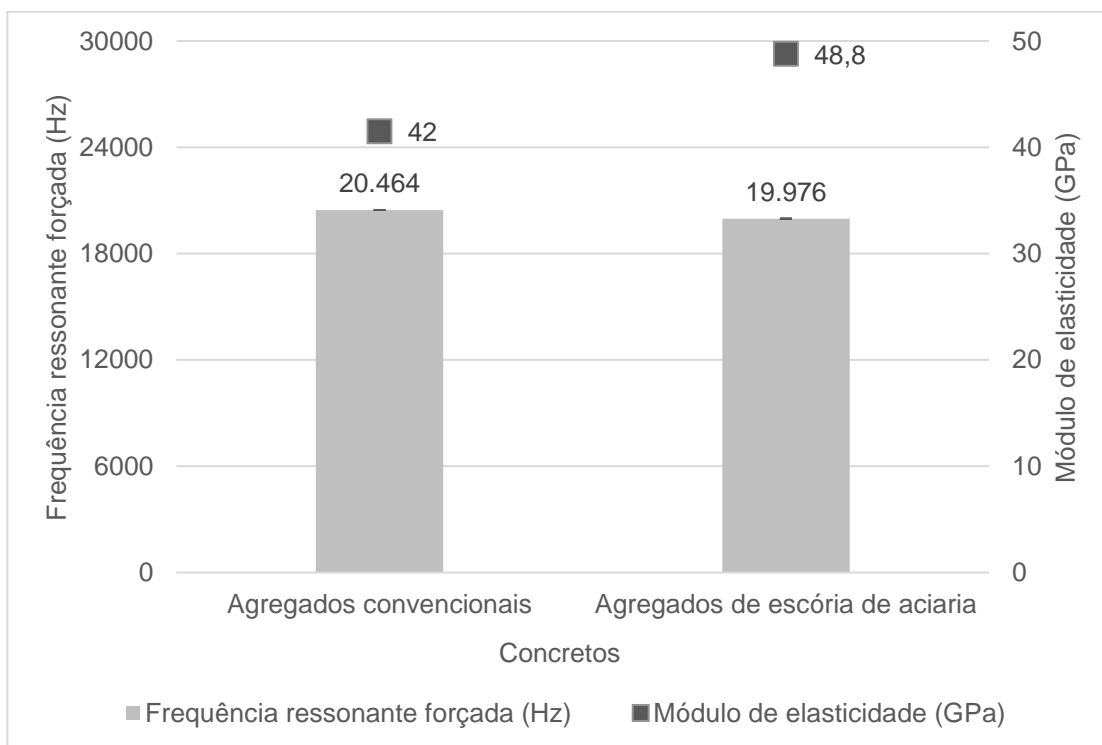


Figura 26. Resultados obtidos no ensaio de frequência ressonante forçada e valores de módulo de elasticidade

Observa-se que nesse estudo, diferente dos resultados obtidos pelo ensaio de velocidade de pulso ultrassônico, o a frequência ressonante do concreto com agregado de escória mostrou-se ligeiramente inferior ao com agregados convencionais. De acordo Sales (2008), quando se aumenta a massa específica e diminui a porosidade do agregado, a frequência ressonante aumenta. O agregado de escória possui maior densidade e maior quantidade de poros concentrados, devido ao processo siderúrgico, quando comparado ao agregado convencional, fato que poderia explicar a pequena diferença de frequência ressonante entre os dois concretos.

Em relação à comparação entre o módulo de elasticidade calculado pela velocidade de pulso ultrassônico e o calculado pela frequência ressonante, o módulo do concreto com agregados convencionais é praticamente o mesmo, enquanto o de escória de aciaria é cerca de 11% maior pelo método de velocidade de pulso. Isso pode ser justificado pelo fato de se utilizar um coeficiente de Poisson estimado para concretos com agregados convencionais na Equação 2.

Entretanto, observa-se para ambos os materiais um alto módulo de elasticidade, provavelmente devido a uniformidade da distribuição dos agregados graúdos na matriz dos corpos de prova reduzidos. Esse fato também pode proporcionar baixas variações de percentuais de argamassa na seção transversal e conseqüentemente ameniza o efeito da Zona de Transição de Interface (AZEVEDO, 2019).

5.5.4 **Resistência à compressão uniaxial**

Constatou-se que ambos os concretos, cujo teor de cimento corresponde a 3,47% do volume de sólidos, alcançaram resistências prescritas para concretos estruturais segundo a normativa NBR 6118 (ABNT, 2014). A evolução da resistência a compressão nas primeiras idades indica que o concreto de escória alcançou menor resistência, cerca de 32% a menos que o concreto com agregado convencional.

Pode-se inferir que esse fato se justifica novamente por meio das propriedades de superfície da escória de aciaria, que devido a sua irregularidade, não libera tão rapidamente a água para o sistema quanto a brita gnaisse, levando a menor produção de produtos de hidratação nas primeiras idades. Os resultados de resistência à compressão com 7, 28 e 90 dias de idade, podem ser observados na Figura 27.

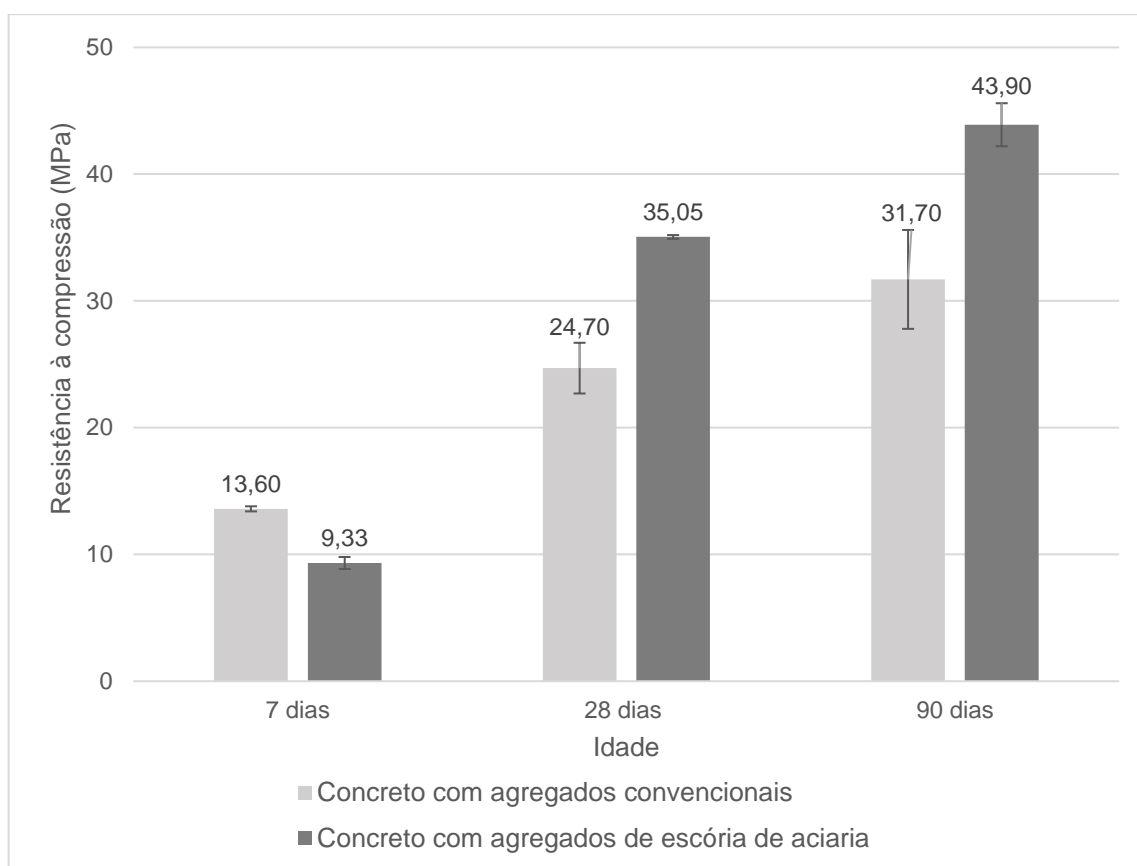


Figura 27. Resultados obtidos no ensaio de compressão simples

O aumento significativo da resistência a compressão de ambos os concretos aos 28 dias se deve em parte à ação cimentante dos finos de escória que possui ação retardada, e a maior disponibilidade de água por mais tempo, conforme reportada pela literatura (GUMIERI, 2002; DINIZ, CARVALHO, *et al.*, 2017). Porém, destaca-se o desempenho do concreto com agregados de escória (35,05 MPa), cerca de 40% mais resistente que o concreto com agregados convencionais, mesmo com 96,5% de consumo de materiais reciclados.

Esse fato está diretamente relacionado ao tipo de agregado constituinte. A morfologia do agregado de escória proporciona a liberação lenta de água dos seus poros e irregularidades, que facilitam a hidratação dos finos em idades tardias e facilita a melhor acomodação entre a pasta e agregados, estando em concordância com a literatura (SANTOS e BRITO, 2017). Nesse contexto, justifica-se a maior uniformidade e compacidade, que implicam a um melhor desempenho mecânico. Os fatores indicados como justificativa ao desempenho satisfatório dos concretos avaliados corroboram com o proposto por Mehta e Monteiro (2014)

Tendo em vista que ambos os concretos tiveram um consumo de cimento de 86,6 kg/m³, os resultados indicam que o traço com agregados de escória de aciaria foi destaque, alcançando

uma intensidade de cimento de 2,47 kg/m³/MPa, enquanto o traço com agregados naturais alcançou 3,51 kg/m³/MPa. Tais resultados foram ainda melhores quando comparado a estudos similares (REBMANN, 2011; DAMINELI, KEMEID, *et al.*, 2010; CARVALHO, 2019)

Ambos os corpos de prova, aos 90 dias de idade, alcançaram resistência à compressão ainda maiores quando comparado aos 28 dias e com um comportamento linear ascendente. Como não é usual a proeminência da ação cimentícia aos 90 dias de idade, tais resultados podem inferir a uma ação pozolânica. Entretanto, para tal afirmação ser consolidada fazem-se necessários, além de dos resultados de resistência a compressão, ensaios microestruturais para avaliação da quantidade de portlandita e de silicatos de cálcio hidratados (GUMIERI, 2002). Ambos os concretos apresentaram fraturas características de materiais cerâmicos (fissura a 45°), como exemplificado na Figura 28.



Figura 28. Corpo de prova com agregados convencionais após rompimento a compressão simples aos 28 dias de idade

5.5.5 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados dos ensaios de resistência a tração por compressão diametral são apresentados na Figura 29.

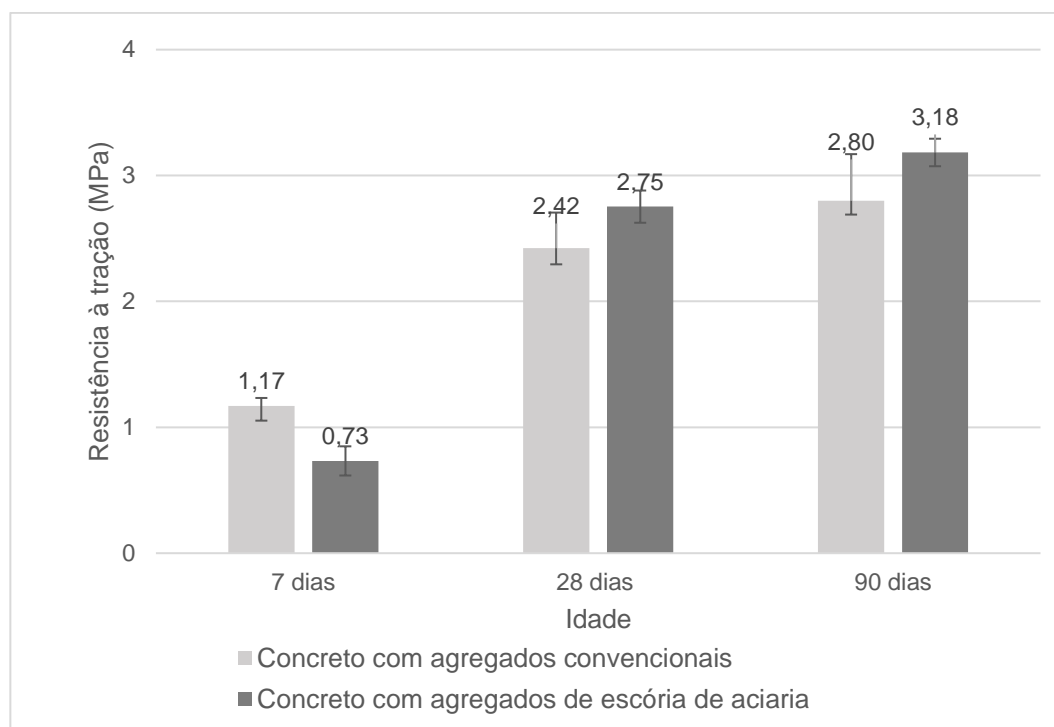


Figura 29. Resultados obtidos no ensaio de tração por compressão diametral

Nas idades iniciais a resistência à tração na compressão diametral foi maior no concreto com agregados convencionais. Já aos 28 dias, ambos os concretos tem sua resistência incrementada, destacando-se o concreto com agregados de escória de aciaria. Tal fato pode ser justificado pela ação cimentante retardada dos finos de escória de aciaria. O maior incremento de resistência de 7 para 28 dias do traço com agregado de escória pode estar relacionada a uma maior hidratação dos finos pela água liberada pelos agregados de escória, devido a morfologia dos agregados graúdos e nas interações nas interfaces.

Ambos os corpos de prova, aos 90 dias de idade, alcançaram maiores valores de resistência a tração em relação aos 28 dias, e também com um aumento linear, corroborando com os resultados de resistência à compressão. Esses resultados são condizentes com as conclusões de Monosi et al (2016), que em seu trabalho avaliou o uso de escória como substituição de agregados convencionais na elaboração de concreto. Nesse estudo foi identificado um aumento significativo da resistência à compressão do concreto, entretanto a substituição não indicou afetar significativamente a resistência à tração. Na Figura 30 está

indicada a fissura característica dos concretos, proveniente do rompimento por compressão diametral.



Figura 30. Base de um corpo de prova com agregados convencionais rompido à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade

Apesar dos valores aparentarem comportamentos similares com os resultados de compressão, identifica-se um desvio padrão proeminente em todos os concretos, indicado na Figura 33, destacando-se o concreto com agregados convencionais aos 28 dias. Esse destaque deve-se a morfologia da brita gnaisse, uma vez que sua lamelaridade, indicada na Figura 22, não proporciona homogeneidade na conformidade dos grãos, implicando a uma variabilidade de resultados de acordo com sua disposição no interior da matriz. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 31.

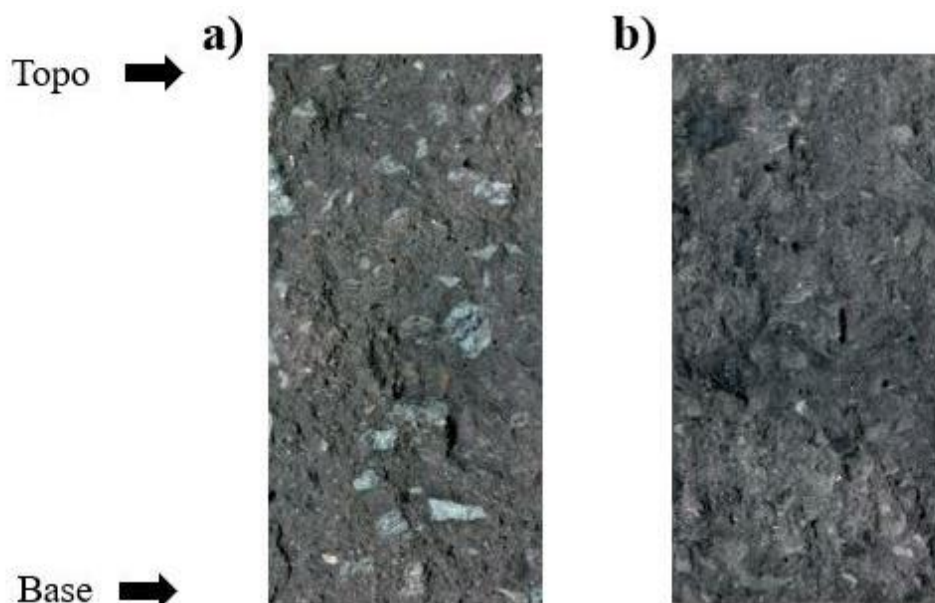


Figura 31. Seção diametral do concreto: a) Com agregados convencionais e b) Com agregados de escória de aciaria LD

5.6 Parâmetros de durabilidade do concreto

5.6.1 Resistividade Elétrica

Os resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica são indicados na Figura 32. Os resultados deste ensaio ficaram entre 35-40 Ohm/m. De acordo com a literatura, ambas as matrizes possuem alta potencialidade de penetração de íons, já que seus resultados foram inferiores a 54 Ohm/m (AASHTO, 2015).

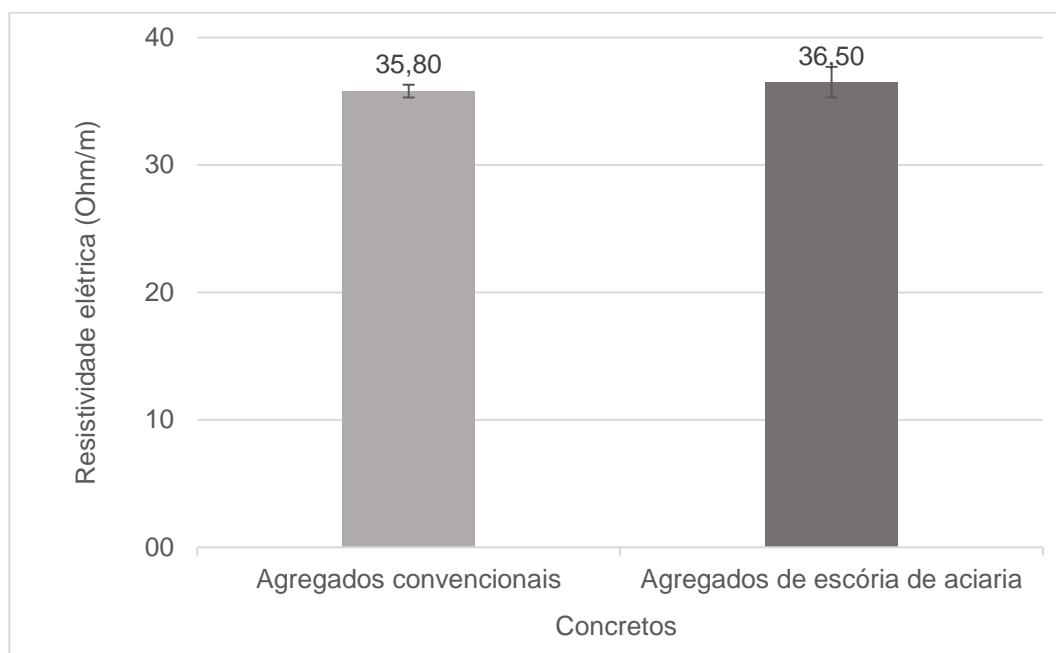


Figura 32. Resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica

Considerando que a resistividade elétrica é influenciada tanto pela porosidade e compactidade como pela composição química e granulométrica dos materiais empregados, (H.M. GHASEMZADEH, 2009), os resultados obtidos devem ser analisados considerando outros ensaios que avaliam uniformidade e porosidade, sem influência da composição química, como a velocidade pulso ultrassônico em consonância com a resistência a compressão das matrizes. Verifica-se que os resultados de resistividade elétrica não corroboraram com os obtidos dos ensaios físicos desse estudo e nem com a literatura, que afirma que matrizes densamente empacotadas possuem elevada resistividade elétrica (H.M. GHASEMZADEH, 2009).

Enquanto o resultados de massa específica, velocidade de pulso, frequência ressonante indicaram uniformidade, coesão e compactidade das matrizes, os valores de resistividade

revelaram uma elevada potencialidade de penetração por íons, de acordo com a classificação proposta pela AASHTO (2015), e por consequência elevado risco de corrosão da armadura. Como a penetração de agentes agressivos depende diretamente da estrutura de poros dos concretos, percebe-se a divergência entre os resultados obtidos.

Esse fato pode ser explicado por meio da composição química da matriz, que teve grande influência no resultado do ensaio de resistividade. A escória de aciaria LD apresenta altos teores de materiais metálicos como o ferro e cálcio que elevam a condutividade elétrica da matriz influenciando assim no seu resultado. A normativa da AASHTO (2015) leva em consideração a avaliação de concretos completamente desenvolvidos com agregados convencionais, não sendo capaz de atender as essas especificações provenientes da utilização de materiais reciclados. Desse modo pode-se inferir por meio da correlação dos dois ensaios e da caracterização química dos materiais, que a matriz obteve baixos valores de resistividade não pela potencialidade de penetração de íons e sim pela elevada condutividade elétrica da matriz.

5.6.2 Carbonatação Acelerada

Nesse estudo foi avaliado a profundidade de carbonatação dos concretos após 64 dias de exposição a um ambiente rico em CO_2 , tempo que simula aproximadamente 20 anos de vida útil por meio da metodologia adaptada proposta por Andradre (2019). Na figura 33 são apresentados ambos os concretos estudados após o ensaio de carbonatação acelerada.

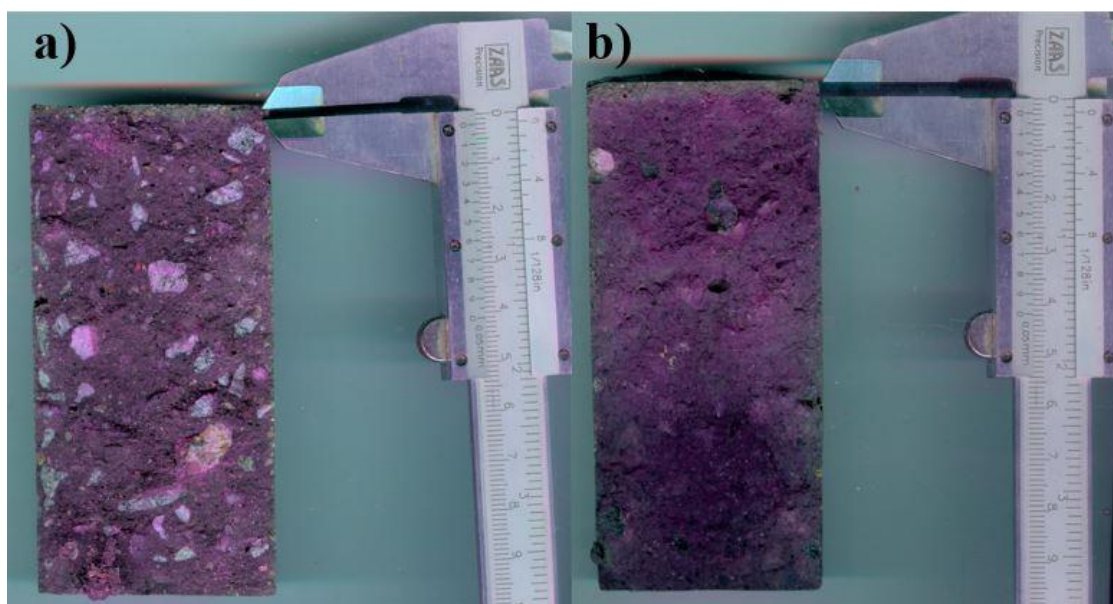


Figura 33. Concretos após o ensaio de carbonatação: a) Com agregados convencionais e b) Com agregados de escória de aciaria LD

Os concretos com agregados convencionais tiveram uma profundidade de 2 mm de carbonatação, enquanto os concretos com agregados de escória de aciaria tiveram uma profundidade de 3 mm. A similaridade entre os resultados corrobora com o estudo de Santamaría, *et al.* (2018), que expôs corpos de prova de concreto convencional e fabricados com agregados de escória à ambientes ricos em CO₂, e ambos alcançaram resultados similares quando utilizado ao indicador de fenolftaleína (SANTAMARÍA, ORBE, *et al.*, 2018).

No estudo de Andrade (2019), foram avaliados concretos com agregados convencionais e com agregados de escória de aciaria LD após 160 dias de exposição a uma atmosfera rica em CO₂. Os melhores resultados foram os concretos de classe C35, os concretos com agregados convencionais tiveram profundidade de carbonatação de 21mm, enquanto os concretos com escória de aciaria LD alcançou uma profundidade de 8mm (ANDRADE, 2019). Como a carbonatação possui um comportamento linear ascendente ao longo do tempo, com uma exposição de CO₂ fixa, infere-se que ambos os concretos possuem boa resistência a carbonatação.

Os resultados de carbonatação acelerada corroboraram com os ensaios de índice de vazios, velocidade de pulso ultrassônico, frequência ressonante, módulo de elasticidade e resultados de compressão e tração. Tais resultados consolidam o argumento de elevada compactidade, baixa permeabilidade e alta homogeneidade de ambos os corpos de prova. Essas características além de contribuírem para o bom desempenho mecânico, potencializa a durabilidade desses concretos.

Observou-se que na avaliação da carbonatação a diferença de performance entre os agregados convencionais e os agregados de escória de aciaria LD não é proeminente. Esse fato indica que o diferencial para o alcance de tais resultados foi a utilização de finos de escória de aciaria em conjunto com a adequada distribuição granulométrica dos grãos e metodologia de mistura e moldagem.

5.7 Análise microestrutural do sistema de poros

A análise microestrutural do sistema de poros foi realizada por meio de análise de seções superficiais e na contabilização da porcentagem e tamanho dos poros. Devido ao protocolo e equipamentos envolvidos, tais resultados abrangem poros maiores que 20 μm . No ensaio de porosidade superficial não é possível medir o sistema de poros longitudinalmente, dessa forma não se identifica a conectividade dos poros ao longo de toda a altura (COSTA, 2019). Nas Figuras 34 e 35 são mostradas as imagens iniciais e finais de uma das seções dos concretos empregados no ensaio de porosidade superficial.

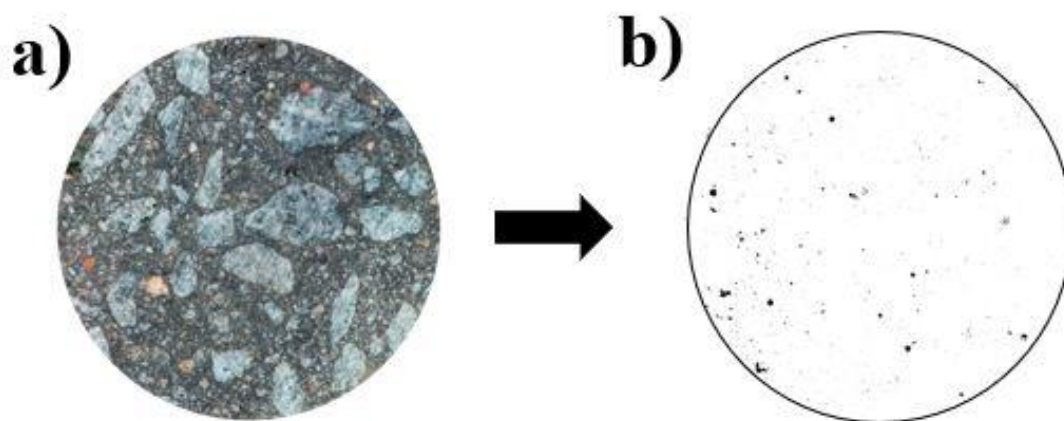


Figura 34. Imagens inicial e final de uma das seções do concreto com agregado convencional no ensaio de porosidade superficial: a) Imagem tratada por scanner e b) Imagem binarizada

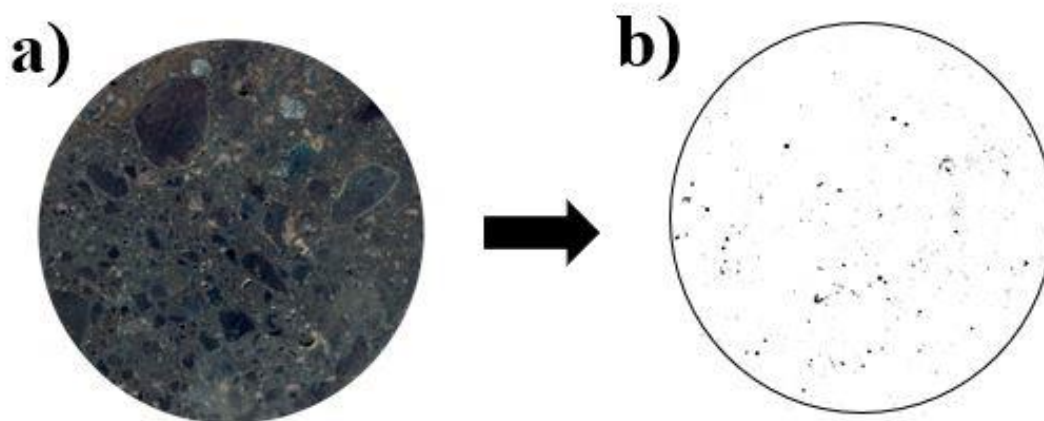


Figura 35. Imagens inicial e final de uma das seções do concreto com agregado de escória de aciaria LD no ensaio de porosidade superficial: a) Imagem tratada por scanner e b) Imagem binarizada

A razão de poros de ambos os concretos foi inferior a 1%, indicando que os concretos empregados nesse estudo possuem baixa porosidade superficial. Pessôa *et al.* (2014) avaliaram a porosidade superficial por meio de dois métodos: imagens por scanner e microtomografia e concluíram que concretos de classe C30 possuem boa compatibilidade de resultados entre os métodos. Nesse mesmo estudo, foi indicado uma porosidade superficial de 1,6% para concretos tradicionais de 30 MPa (PESSÔA, DOMINGUÉZ, *et al.*, 2014). Na Tabela 9 estão indicados a razão de poros e raio médio do poros dos concretos avaliados.

Tabela 9. Razão de poros e raio médio dos poros dos concretos avaliados

	Concreto com agregados convencionais	Concreto com agregados de escória de aciaria
Razão de Poros (%)	0.53	0.81
Raio Médio (μm)	45.2	56.8

Observa-se que em ambos os concretos há uma porcentagem maior de poros cujo o tamanho está entre 20 – 50 μm , o que confirma a elevada compactidade e homogeneidade da matriz. Contudo esse fato também infere a existência de uma quantidade relevante de poros de tamanho inferior a 20 μm . Entretanto, de acordo com Mendes (2019), quanto maior o refinamento dos poros, melhor o seu desempenho perante a durabilidade. Na Figura 36 estão indicadas as distribuições de tamanhos e volume dos poros.

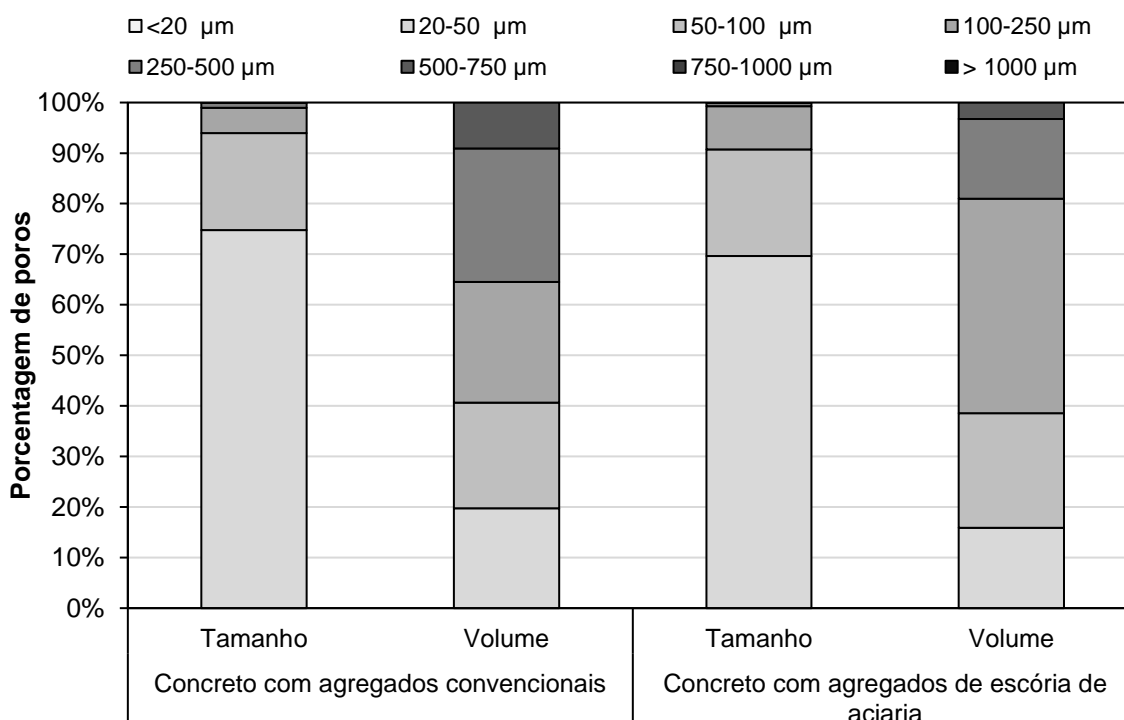


Figura 36. Resultados obtidos na análise do sistema de poros

Os resultados de porosidade superficial foram condizentes com todos os ensaios realizados nesse estudo. Pode-se afirmar que a distribuição granulométrica, utilização de um elevado volume de finos, a metodologia de mistura e moldagem implicaram em uma elevada compactidade, que resultou no refinamento dos poros. Tal refinamento contribui positivamente para o desempenho físico, mecânico e frente a parâmetros de durabilidade.

5.8 Avaliação da ecoeficiência dos concretos

Ambos os concretos estudados apresentaram bons resultados de intensidade de ligante, de forma que com o aumento do teor de escória, as intensidades de cimento reduziram para todas as misturas.

Tabela 10. Avaliação da ecoeficiência dos concretos estudados

Concreto	Consumo de cimento (kg/m³)	Intensidade de Cimento (kg/m³/MPa)	Consumo de resíduo (kg/m³)
Concreto com agregados convencionais	86.6	3.51	1230,53
Concreto com agregados de escória de aciaria	86.6	2.47	3639.18

O melhor resultado foi observado no concreto com agregado de escória de aciaria, uma vez que sua intensidade de cimento apresentou-se mais baixa, conforme reportado pela literatura (DAMINELI, KEMEID, *et al.*, 2010; REBMANN, 2011; CARVALHO, MELO, *et al.*, 2019). Ponderando o baixo consumo de cimento e a substituição total dos agregados em sua mistura, infere-se que a competência mecânica do concreto se mantém adequada mesmo com a elevada quantidade de escória de aciaria em forma granular e fina. Considerando que foram obtidas resistências a compressão satisfatórias e que quanto menor a intensidade de cimento, maior é consumo de resíduos, e pode-se afirmar que o concreto com agregados de escoria de aciaria LD apresenta melhores resultados de ecoeficiência.

6 CONCLUSÕES

As caracterizações físicas, químicas e morfológicas dos agregados de escória de aciaria LD utilizados na pesquisa indicaram características que permitem seu uso em concretos. A elevada massa específica, absorção de água e superfícies rugosa das escórias, quando comparadas a brita gnaisse, influenciaram diretamente na compacidade e uniformidade dos concretos produzidos.

O protocolo de mistura mostrou-se adequado para os propósitos da pesquisa, permitindo a produção de concretos coesos e densamente empacotados. Essa padronização de metodologia facilitou a comparação entre resultados obtidos por matrizes com a mesma proporção volumétrica de materiais, mas com diferentes tipos de agregados.

A utilização dos finos de escória de aciaria LD como material cimentante suplementar foi de fundamental importância para o alcance de matrizes com elevado grau de empacotamento de ambos os traços. Além disso foi um dos principais motivos para o alcance de bons comportamentos mecânicos a longo prazo, mesmo com um consumo de cimento inferior a 90 kg/m³, devido a lenta hidratação de seus compostos cimentantes.

Os ensaios de massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios dos concretos mostraram que as características morfológicas dos agregados interferem no desempenho da matriz perante situações extremas. Esse acontecimento está correlacionado ao bom intertravamento da pasta de finos, com baixo consumo de cimento, nos agregados de escória devido a sua porosidade e irregularidade, fato que não é visto nas britas gnaisse lamelares da pesquisa, que são ligeiramente rugosas e pouco porosas.

Os resultados de frequência ressonante forçada e velocidade pulso ultrassônico indicaram a efetividade do empacotamento do protocolo de adensamento dos concretos, sugerindo a uma elevada coesão, compacidade e uniformidade da matriz do concreto. Devido a essas características, o módulo de elasticidade de ambos os concretos também se apresentou com valores significativos para um concreto com baixo consumo de cimento.

Aos 7 dias, as resistências à tração e compressão dos concretos com agregados convencionais foram superiores aos de escória de aciaria LD. Aos 28 dias ambos os concretos tiveram um significativo incremento de resistência a tração e compressão devido a ação cimentante tardia dos finos de escória. No entanto, os concretos com agregados de escória superaram os resultados dos concretos com agregados convencionais nas duas análises. O

destaque dos ensaios mecânicos foi a resistência a compressão, que foi cerca de 30% maior que a matriz com agregado convencional. Aos 90 dias, ambos os concretos tiveram um incremento linear ascendente, reafirmando o potencial da escória de aciaria LD como material cimentício suplementar.

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica indicaram alta potencialidade de penetração de íons nas matrizes avaliadas, implicando a um elevado risco de corrosão da armadura. Entretanto, tais resultados não corroboraram com os demais ensaios físicos realizados. Essa inconsistência é justificada pelas características químicas dos materiais empregados em ambos os traços, que ao serem cominuídos podem ter exposto material metálico residual, que contribuiu para o aumento da condutibilidade.

Ambos os concretos estudados tiveram profundidade de carbonatação baixas e similares, indicando um bom comportamento perante a exposição a uma atmosfera rica em CO₂. Os resultados corroboraram com os demais ensaios físicos e mecânicos, com exceção da resistividade elétrica. Nessa análise, a similaridade de compacidade e homogeneidade dos concretos interfeririam de maneira mais relevante nos resultados do que os tipos de agregados graúdos e miúdos empregados em cada concreto.

A análise microestrutural do sistema de poros indicou uma baixa porosidade, que está diretamente relacionada a compacidade e homogeneidade de ambas as matrizes. Os resultados foram condizentes com os ensaios físicos, mecânicos e de carbonatação, consolidando a hipótese de que os concretos possuem boa resistência à penetração de íons.

Por fim, a avaliação da ecoeficiência demonstra que ambos os concretos possuem desempenhos mecânicos satisfatórios, levando em consideração o elevado consumo de escória de aciaria LD. Esse estudo indica que a utilização da escória de aciaria na elaboração de concretos com baixo consumo de cimento, tanto como material cimentício suplementar, quanto como agregados, é uma alternativa economicamente, sustentavelmente e tecnicamente promissora.

BIBLIOGRAFIA

AASHTO. **TP 119-15 - Classificação quanto à penetração de íons cloreto no concreto.** [S.l.]: American Association of State Highway and Transportation Officials , 2015.

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

ABNT. **NBR 5733:** High early strength Portland cement - Specification. Rio de Janeiro: Brazilian Association of Technical Standards - ABNT, 1991.

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

ABNT. **NBR 9204:** Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica-volumétrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ABNT. **NBR 7211:** Agregado para concreto - especificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

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

ABNT. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006. 18 p.

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

ABNT. **NBR NM 26:** Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

ABNT. **NBR NM 52:** Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa aparente. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

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

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

ABNT. **NBR 15575:** Edificações habitacionais — Desempenho. [S.l.]: [s.n.], 2013.

ABNT. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

ABNT. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

ABNT. **NBR 16605**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

ABNT. **NBR 5739**: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndrico. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.

ABNT. **NBR 8802**: Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

AITCIN, P. C. **High performance concrete**. São Paulo: PINI, 2000.

ANASTASIOU, E.; FILIKAS, K. G.; STEFANI, M. Utilization of fine recycled aggregates in concrete with fly ash and steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 154-161, 2014.

ANDRADE, H. D. **Carbonatação em Concreto de Escória de Aciaria**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2019.

ANEPAC. **Associação Nacional de Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil**, 2019. Disponível em: <<http://www.anepac.org.br/>>. Acesso em: 07 nov. 2019.

ASTM. **C215 - 08**: Standart Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 2010.

ASTM. **ASTM C597-09**: Standard Test for Pulse Velocity Through Concrete. West Conshohocken: [s.n.], 2019.

AZEVEDO, C. F. D. **Teoria da similitude e análise estatística aplicadas a corpos de prova cilíndricos de concreto**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2019.

BARROS, et al. Blocos de Escória de Aciaria para Alvenaria Estrutural. In: _____ **Anais do XXII Seminário de Iniciação Científica da Universidade Federal de Ouro Preto**. [S.l.]: UFOP, 2014. p. 1.

BISKRI, Y. et al. Mechanical and durability characteristics of High Performance Concrete containing steel slag and crystalized slag as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 167-178, 2017.

CARVALHO, J. C. L. et al. Study of mechanical behavior of block for structural masonry produced with steel slag in substitution of natural aggregates. **Masonry International**, v. 30, p. 31-60, 2017.

CARVALHO, J. M. F. D. **Obtention of eco-efficient cement based composites using industrial waste**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2019.

CARVALHO, J. M. F. et al. More eco-efficient concrete: an approach on optimization and use of waste-based supplementary cementing materials. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 397-409, 2019.

CASTRO, A. L. D.; PANDOLFELLI, V. C. **Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2009.

CBCS. CBCS. **Conselho Brasileiro de Construção Sustentável**, 2018. Disponível em: <<http://www.cbcs.org.br/website/>>. Acesso em: 31 jan. 2020.

COSTA, L. C. B. **Desempenho de concretos de escória de aciaria frente a ataque de cloretos**. Universidade Federal de Ouro Preto. [S.l.]. 2019.

CREMONINI, R. A. et al. Desenvolvimento de um Método de Dosagem de Concretos de Alta Resistência com Baixo Consumo de Cimento. **Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON)**, Rio de Janeiro, 1998.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de cimento**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

DAMINELI, B. L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement & Concrete Composites**, São Paulo, n. 32, p. 555-562, 2010.

DINIZ, D. H. et al. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical Soil Stabilizer for Use in Roads. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, 2017.

GONÇALVES, D. R. et al. Evaluation of the economic feasibility of processing plant for steelmaking slag. **Wast & Management**, v. 34, n. 2, p. 107-120, 2016.

GUMIERI, A. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD como Adição em Cimentos**. Porto Alegre: UFRGS, 2002. Tese de Doutorado.

H.M. GHASEMZADEH, Y. M. G. N. S. E. N. An Investigation of the Effect of the Different Mix Constituents on Concrete Electric Resistivity. **World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering**, 2009.

HAYLES, M.; SANCHEZ, L. F. M.; NOËL, M. Eco-efficient low cement recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, Canada, n. 169, p. 724-732, 2018.

HERNANDEZ, R. A. C.; CORTÉS, C. M. P.; BUSTOS, L. P. Durability and acoustics of concrete with slag of cupola furnace as fine aggregate replacement. **Tecnura**, v. 19, n. 43, p. 37 -51, 2015.

HIDAYAH ROSLAN, N. et al. Performance of steel slag and steel sludge in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 104, p. 16 - 24, 2016.

IAB. Processo siderúrgico. **Instituto Aço Brasil - IAB**, 2018. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>>. Acesso em: 17 Maio 2019.

IABR. Sustentabilidade. **Instituto Aço Brasil**, 2014. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/reciclagem.asp>>.

IBS. Produção de aço bruto por processo de refino. **INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA** -, 12 abril 2009.

JESUS, L. S. D. A Resistividade Elétrica do Concreto e a sua Correlação com a Durabilidade das Estrutura. **Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE**, 2018.

JIANGA, Y. et al. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review. **Resources, Conservation & Recycling**, p. 187-197, 2018.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement and Concrete Reserch**, Austin, v. 78, p. 71-80, 2015.

MACHADO, A. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciarias**. São Paulo: Tese de Doutorado, 2000.

MANSO, J. M. et al. Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. **Cement Concrete Composites**, v. 28, p. 528-534, 2006.

MASUERO, A. B.; VILELA, A. C.; DAL MOLIN, D. Use of electric arc furnace slags as addition. In: _____ **National seminar in solid waste reuse/recycling**. São Paulo: [s.n.], 2000. Disponível em: <<ftp://ftp.cefetes.br/Cursos/MetalurgiaMateriais/Joseroberto/P%D3S/NORMAS,%20ARTIGOS%20E%20EXERC%20CDCIOS/ACIARIA%20EL%20C9TRICA.pdf>>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concrete: microstructure, propreties and materials**. São Paulo: IBRACON, 2014.

MENDES, J. C. **Thermal Properties of Cement-based Composites**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.

MENDES, J. C. et al. Mechanical, rheological and morphological analysis of cement-based composites with a new LAS – based air entraining agent. **Construction and Building Materials**, 2017. 648-661.

MONOSI, S.; RUELLO, M. L.; SANI, D. Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete. **Cement and Concrete Composites**, p. 66-72, 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Bookman, 2015.

OIKONOMOU, N. D. Recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**, Thessaloniki, v. 27, p. 315-318, 2005.

OLIVEIRA, T. N.; PEIXOTO, R. A. F.; ALVES, V. D. J. G. Comportamento de blocos de concreto produzidos com escória de aciaria para alvenarias. **Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos (RECICLOS)**, 2007. Disponível em: <<http://www.acquacon.com.br/cobesa/apresentacoes/pap/pap002027.pdf>>.

PANG, B.; ZHOU, Z.; XU, H. Utilization of carbonated and granulated steel slag aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 454-467, 2015.

PEIXOTO, R. A. F. et al. Viability study for production of concrete using recycled siderurgy residue. **ACI Materials Journal**, v. 1, p. 145-155, 2008.

PELISSER, F.; VIEIRA, A.; BERNARDIN, A. M. Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. **Journal of Cleaner Production**, Santa Catarina, v. 175, p. 324-332, Dezembro 2017.

PESSÔA, J. R. D. C. et al. Porosidade do Concreto Determinada por Microtomografia com Raio X e Processamento de imagem. **Engenharia Estudo e Pesquisa, ABPE**, v. 14, p. 20-26, 2014.

QIANG, W. et al. Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1414 - 1420, 2013.

QIANG, W.; PEIYU, Y. Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1134-1140, 2010.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos. 2011.

RILEM. CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth. **Materials and Structures**, v. 21, n. 126, p. 453-455, 1988.

SAINT-PIERRE, F. et al. Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 1022-1027, 2016.

SALES, R. D. B. C. **Estudo de compostos de cimento Portland utilizando o ensaio de frequência ressonante forçada e termografia**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2008.

SAN-JOSÉ, J. T. et al. The performance of steel-making slag concretes in the hardened state. **Materials and Design**, v. 60, p. 612-619, 2014.

SANTAMARÍA, A. et al. A study on the durability of structural concrete incorporating electric steelmaking slags. **Construction and Building Materials**, p. 94 - 111, 2018.

SANTOS, M. B.; BRITO, J. D. Susceptibilidade dos agregados reciclados no desenvolvimento da reação álcalis-silica: o que pode mudar? **Revista de Engenharia Civil**, Lisboa, v. 55, p. 36-46, fev. 2017.

SAXENA, S.; TEMBHURKAR, A. Impact of use of steel slag as coarse aggregate and wastewater on fresh and hardened properties of concrete. **Construction and Building Materials**, p. 126–137, 2018.

SHI, Y. et al. Preliminary investigation on the pozzolanic activity of superfine steel slag. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 227-234, 2017.

SILVA, M. J. et al. Feasibility Study of Steel Slag Aggregates in Precast Concrete Pavers. **ACI MATERIALS JOURNAL**, v. 113, p. 439-446, 2016.

TOFFOLO, R. V. **PAVIMENTOS SUSTENTAVEIS**. Ouro Preto: Dissertação de Mestrado, 2015.

TRIPATHI, B.; CHAUDHARY, S. Performance based on evaluation of ISF slag as substitute of natural sand in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 672-683, 2016.

WANG, Q.; YANG, J.; YAN, P. Cementitious properties of super-fine steel slag. **Powder Technology**, v. 245, p. 35-39, 2013.

YOUSUFA, S.; SANCHEZB, L. F. M.; SHAMMEH, S. A. The use of particle packing models (PPMs) to design structural low cement concrete as an alternative for construction industry. **Journal of Building Engineering**, Canada, n. 25, 2019.

ZHANG, T. et al. Preparation of high performance blended cements and reclamation of iron concentrate from basic oxygen furnace steel slag. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 56, p. 48-55, 2011.