



Anderson Carlos Galindo Silva

CONCRETO ESTRUTURAL COM AGREGADO GRAÚDO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Dissertação Orientada pelo Professor Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém – Pará – Brasil

2024

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



Anderson Carlos Galindo Silva

**CONCRETO ESTRUTURAL COM AGREGADO GRAÚDO
DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Marcelo de Souza Picanço

Belém
Setembro de 2024

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Anderson Carlos Galindo Silva

TÍTULO: Concreto Estrutural com Agregado Graúdo de Escória de Alto Forno.

GRAU: Mestre ANO: 2043

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Anderson Carlos Galindo Silva
Folha 30 Quadra 05 Lote 16F, Nova Marabá
68507-370 Marabá – PA – Brasil.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G156c Galindo, Anderson Carlos Galindo Silva.
 CONCRETO ESTRUTURAL COM AGREGADO GRAÚDO
 DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO / Anderson Carlos Galindo
 Silva Galindo. — 2024.
 92 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Picanço
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Belém, 2024.

1. APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS. 2. ESCÓRIA
DE ALTO FORNO. 3. CONCRETO ESTRUTURAL. 4.
SUBSTITUIÇÃO. I. Título.

CDD 624



CONCRETO ESTRUTURAL COM AGREGADO GRAÚDO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO

AUTOR:

ANDERSON CARLOS GALINDO SILVA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 10 / 10 / 2024.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Orientador (UFPA)

Documentos assinados digitalmente
gov.br MARCELO DE SOUZA PICANCO
Data: 10/01/2025 11:12:54-0300
Verifique em <https://validar.itii.gov.br>

Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira
Membro Externo (UFMG)

Documentos assinados digitalmente

gov.br MATEUS ANTONIO NOGUEIRA OLIVEIRA
Data: 37/01/2025 15:56:52-0300
Verifique em <https://validar.itii.gov.br>

Prof. Dr. Adelson Bezerra de Medeiros
Membro Externo (UFPA)

Documentos assinados digitalmente
gov.br ADELSON BEZERRA DE MEDEIROS
Data: 08/01/2025 08:30:32-0300
Verifique em <https://validar.itii.gov.br>

Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo
Membro Interno (UFPA)

Documentos assinados digitalmente
gov.br ALCEBIADES NEGRAO MACEDO
Data: 10/01/2025 10:32:06-0300
Verifique em <https://validar.itii.gov.br>

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



Anderson Carlos Galindo Silva

CONCRETO ESTRUTURAL COM AGREGADO GRAÚDO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO

Exame de Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Orientador
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFPA

Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macedo
Examinador Interno
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFPA

Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira
Examinador Externo
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFPA

Prof. Dr. Adelson Bezerra de Medeiros
Examinador Externo
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFPA

Belém, 26 de setembro de 2024.

Agradecimentos

Gostaria de expressar meus mais sinceros agradecimentos a todos que estiveram ao meu lado durante esta jornada desafiadora. Com o apoio de Deus e a presença inspiradora de cada um de vocês, consegui atingir este marco significativo em minha vida acadêmica e profissional. Primeiramente, quero reconhecer a infinita bondade de Deus, cuja orientação e força constantes me permitiram superar obstáculos e perseverar mesmo nos momentos mais desafiadores. Sua graça me sustentou e me guiou durante todo esse processo, e por isso, sou eternamente grato. À minha amada esposa Giovana e aos meus queridos filhos Apolo e Benício, meu alicerce e razão para buscar sempre o melhor, não há palavras suficientes para expressar o quanto sua compreensão, paciência e amor foram essenciais para eu alcançar este feito. Seu apoio inabalável foi o combustível que me impulsionou em direção à conclusão do meu trabalho. Gostaria também de estender minha gratidão aos amigos leais e colegas de laboratório, Sabino e Rafael. Seu suporte constante, orientação e colaboração foram fundamentais para o sucesso dos meus ensaios e pesquisas. Juntos, enfrentamos desafios e celebramos conquistas, criando uma parceria que valorizarei para sempre. Não posso deixar de agradecer à UNIFESSPA por disponibilizar o laboratório que se tornou meu segundo lar durante essa jornada. A infraestrutura e recursos fornecidos foram vitais para a realização dos ensaios e experimentos, moldando diretamente o resultado do meu trabalho. Além disso, agradeço imensamente à empresa Sinobras de Marabá - PA por sua generosidade ao fornecer a matéria-prima essencial, a escória de alto-forno. Sua contribuição foi um elemento crucial para a minha pesquisa, permitindo que eu explorasse novas perspectivas e alcançasse resultados significativos. Por último, mas não menos importante, meu agradecimento especial ao Professor Dr. Marcelo Picanço. Sua orientação acadêmica, sabedoria e apoio constante foram fundamentais para a minha jornada de aprendizado e crescimento. Sua paixão pelo conhecimento e dedicação aos alunos são inspiradoras e deixam uma marca duradoura em minha jornada acadêmica. Em um momento como este, as palavras parecem inadequadas para expressar a plenitude da minha gratidão. Cada um de vocês contribuiu de maneira única para este sucesso, e estou verdadeiramente honrado por tê-los em minha vida.

Resumo

Silva, A. C. G. Concreto Estrutural com Agregado Graúdo de Escória de Alto Forno / Anderson Carlos Galindo Silva. – 2023. Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil.

A Escória de Alto de Alto Forno, EAF é um resíduo produzido nas siderúrgicas a partir da fabricação do Ferro Gusa em Alto Forno, o Gusa é o produto imediato produzido a partir do beneficiamento do minério de ferro e usado em larga escala em todo o mundo. A EAF é produzida na proporção de 200 a 300 kg por tonelada de ferro gusa. Logo, o estado do Pará é o segundo maior produtor nacional de Ferro Gusa, sendo dessa forma um dos estados que mais produz esse tipo de resíduo, sendo assim de suma importância o aprofundamento e investigações científicas detalhadas para que aplicações adequadas possam ser feitas, visando diminuir os impactos ambientais provocado pela acumulação deste resíduo. Com isso a presente pesquisa tem como objetivo de averiguar as propriedades mecânicas do concreto estrutural a partir da substituição parcial do agregado graúdo natural (AGN) pela escória de alto-forno (EAF). Para isso foi realizado um estudo de dosagem em concreto 100% de AGN, em seguida foram realizadas as substituições parciais (em massa) do agregado graúdo natural pela escória de alto forno (0% - referência, 50%, 70% e 100%). Foram realizados ensaios no estado fresco (consistência) e no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade) dos concretos produzidos com substituição parcial de AGN por EAF nas idades de 28 e 63 dias, bem como microestrutura eletrônica de varredura (MEV) dos concretos. Os resultados demonstraram que a inclusão de EAF na mistura provocou uma redução progressiva na trabalhabilidade dos concretos em pelo menos 50%, levando em conta as proporções de escória adicionadas em comparação com a mistura convencional. Entretanto, o desempenho mecânico do concreto com EAF melhorou significativamente em relação ao convencional, com um aumento de até 15,77% na resistência à compressão. Enquanto o concreto convencional apresentou uma média de 23,58 MPa na resistência à compressão, o concreto com 70% de inclusão de EAF alcança uma resistência de 27,30 MPa. Desta forma, a incorporação deste resíduo na produção de concretos estruturais induz melhorias nas respostas em todas as propriedades mecânicas analisadas e em todas as proporções utilizadas quando comparadas ao concreto convencional.

Palavras-chave

Aproveitamento de Resíduos; Escória de Alto-Forno; Concreto Estrutural, Substituição.

Abstract

Silva, A. C. G. Structural Concrete with grade aggregate of Blast Furnace Slag / Anderson Carlos Galindo Silva. – 2023. Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil.

The BFS, Blast Furnace Slag is a tailings or residue produced in steelworks from the manufacture of Pig Iron in Blast Furnaces, Pig iron is the immediate product produced from the processing of iron ore and used on a large scale throughout the world. EAF is produced at a rate of 200 to 300 kg per ton of pig iron. Therefore, the state of Pará is the second largest national producer of pig iron, thus being one of the states that most produces this type of waste, therefore, it is extremely important to deepen and carry out detailed scientific investigations so that appropriate applications can be made, aiming to reduce the environmental impacts caused by the accumulation of this waste. With this, the present research aims to investigate the mechanical properties of structural concrete from the partial replacement of natural coarse aggregate (AGN) by blast furnace slag (EAF). For this, a dosage study was carried out in concrete with 100% AGN, then partial replacements (in mass) of the natural coarse aggregate by blast furnace slag were carried out (0% - reference, 50%, 70% e 100%). Tests were carried out in the fresh state (consistency) and in the hardened state (compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity) of the concretes produced with partial replacement of AGN by EAF at the ages of 28 and 63 days, as well as scanning electronic microstructure (SEM) of the concretes. The results showed that the introduction of EAF in the mixture caused a progressive drop in the workability of the concretes. However, the mechanical performance increased significantly in relation to conventional concrete. In this way, the incorporation of this residue in the production of structural concrete induces improvements in the responses in all the mechanical properties analyzed and in all the proportions used when compared to conventional concrete.

Keywords

Waste Recovery; Slag Blast Furnace; structural concrete.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Disposições gerais.....	16
1.2. Justificativa.....	19
1.3 Objetivos	199
1.3.1 Objetivo Geral	199
1.3.2 Objetivos Específicos	199
1.4 Estrutura da dissertação.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	21
2.1 CONCRETO.....	21
2.2 Agregados	29
2.3 Produção da Escoria de Alto forno.....	33
2.4 Utilização da escória de alto-forno como agregado para construção civil	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	39
3.1.1 Variáveis de resposta.....	41
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS	42
3.2.1. Aglomerante hidráulico.....	41
3.2.2. Agregado miúdo.....	41
3.2.3. Agregado graúdo natural (seixo).....	43
3.2.4. Escória de alto-forno.....	45
3.2.5. Aditivo.....	45
3.3. PRODUÇÃO DE CONCRETOS.....	45
3.3.1. Produção, moldagem e armazenamento dos corpos de prova.....	47
3.4. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	47
4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4.1 Caracterização dos materiais.....	48
4.1.1 Aglomerante Hidráulico.....	48
4.1.2 Agregado Miúdo.....	49
4.1.3 Agregado Graúdo natural (seixo).....	49

4.1.4 Escória de alto-forno.....	52
4.1.5 Aditivos.....	60
4.2 Produção de concretos.....	60
4.3 Analises em microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	68
4.4 Analise das propriedades dos concretos.....	73
4.4.1 Analise da Trabalhabilidade.....	73
4.4.2 Avaliação da resistência à compressão axial.....	75
4.4.3 Analise das propriedades dos concretos.....	79
4.4.4 Analise do módulo de elasticidade.....	82
5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....	86
5.1 Conclusão.....	86
5.2 Sugestões.....	87
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

Lista de Figuras

Figura	Página
Figura 1 – Estrutura da Dissertação	20
Figura 2 - Representação diagramática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento no concreto	22
Figura 3 - Descrição esquemática da estrutura porosa do concreto	24
Figura 4 - Representação esquemática do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial até a ruptura	26
Figura 5 - Diferentes módulos de elasticidade	28
Figura 6 - Escória de Alto Forno, Pátio Sinobras	34
Figura 7 - Esquema da parte interna do alto forno (zonas de amolecimento e fusão e de gotejamento)	35
Figura 8 - Representação do sistema CaO. SiO ₂ .Al ₂ O ₃ da escoria de alto forno	36
Figura 9 - Fluxograma da caracterização física, mineralógica e química dos materiais empregados na pesquisa	40
Figura 10 - Fluxograma da análise mecânica dos materiais empregados na pesquisa	40
Figura 11 – Mapa de localização, Local de coleta EAF	44
Figura 12 – Diagrama de Dosagem	46
Figura 13 - Curva granulométrica do agregado miúdo e limites da NBR 7211	50
Figura 14 - Curva granulométrica do AGN, e limites da NBR NM 7211	52
Figura 15 - Fluxograma de etapas técnicas para utilização da EAF	53
Figura 16 - Difratograma de Raios-X da escória de alto-forno	54
Figura 17 - Avaliação da atividade pozolânica com cal da escória de alto-forno	57
Figura 18 - Avaliação da atividade pozolânica com cimento Portland	58
Figura 19 - Curva granulométrica da EAF, e limites da NBR 7211	60
Figura 20 - Diagrama de dosagem	61
Figura 21 - Quantidade de aditivo (%) em relação a massa de cimento utilizado	63
Figura 22 – Ensaio no estado fresco (slump teste)	65
Figura 23 – Moldagem dos corpos de prova	65
Figura 24 – Cura úmida	65
Figura 25 – Ensaio de Compressão	66
Figura 26 – Ensaio de Tração	66

Figura 27 – Rompimento	67
Figura 28 – Interface agregado-matriz	68
Figura 29 – Vista ampliada da interface pasta-agregado do concreto de referência	69
Figura 30 – Caminho da microfissura na pasta até o poro, funcionando como concentrador de tensões no concreto convencional	70
Figura 31 – Vista do formato irregular da EAF, melhorando a aderência entre o agregado e a matriz	71
Figura 32 – Presença das fissuras somente na região do agregado de EAF, assim como grande quantidade de C-S-H	72
Figura 33 – Caminho da microfissura na pasta até o poro, funcionando como concentrador de tensões no concreto com substituição de 100% de EAF	73
Figura 34 – Consistência do concreto (slump test)	75
Figura 35 – Resistência à compressão axial dos concretos para idades diferentes, em função do teor de substituição do agregado gráudo natural por escória de alto-forno	78
Figura 36 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos para idades diferentes, em função do teor de substituição do agregado graúdo natural por escória de alto-forno	82
Figura 37 – Módulo de elasticidade dos concretos para idades diferentes, em função do teor de substituição do agregado natural por escória de alto-forno	85

Lista de Tabelas

Tabela	Página
Tabela 1 - Limites de composição granulométrica do agregado graúdo	30
Tabela 2 - Limite da distribuição granulométrica do agregado miúdo	31
Tabela 3 - Propriedade do concreto influenciadas pelas características dos agregados	32
Tabela 4 - Composição química típicas das escórias de alto-forno	35
Tabela 5 - Resumo do Programa Experimental	42
Tabela 6 - Métodos de caracterização do agregado miúdo	43
Tabela 7 - Métodos de caracterização do agregado graúdo convencional (seixo)	43
Tabela 8 - Métodos do agregado de escória de alto-forno	45
Tabela 9 - Traços auxiliares para execução da curva de dosagem	46
Tabela 10 – Traço de Referência	47
Tabela 11 - Características físicas do cimento Portland do tipo CP IV 32	48
Tabela 12 - Características químicas do cimento Portland do tipo CP IV 32	49
Tabela 13 - Características mecânicas do cimento Portland do tipo CP IV 32	49
Tabela 14 - Características físicas do agregado miúdo	50
Tabela 15 - Características físicas do agregado graúdo	51
Tabela 16 - Análise química das amostras de escória de alto-forno	55
Tabela 17 - Caracterização dos materiais	55
Tabela 18 - Quantidade em gramas dos materiais utilizados	56
Tabela 19 - Resistência à compressão das argamassas após 7 dias	57
Tabela 20 - Composição Granulométrica	59
Tabela 21 - Traços auxiliares para execução da curva de dosagem	61
Tabela 22 - Traço referência determinado, bem como o consumo estimado para moldagem de 9 corpos de prova cilíndricos de ($\varnothing 10 \times 20$) cm	62
Tabela 23 - Caracterização do AGN e da EAF, bem como o consumo estimado para moldagem de 9 corpos de prova cilíndricos de ($\varnothing 10 \times 20$) cm	62
Tabela 24 - Propriedades do concreto no estado fresco, confeccionados para serem ensaiados aos 28 dias. Legenda: CR (Concreto referência); CCEAF (Concreto com escória de alto-forno)	74
Tabela 25 - Propriedades do concreto no estado fresco, confeccionados para serem ensaiados aos 63 dias. Legenda: CR (Concreto referência); CCEAF (Concreto com escória	

de alto-forno)	74
Tabela 26 - Resultados individuais de resistência à compressão, aos 28 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno	76
Tabela 27 - Resultados individuais de resistência à compressão, aos 63 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno	77
Tabela 28 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno	80
Tabela 29 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral, aos 63 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno	81
Tabela 30 - Resultados individuais do módulo de elasticidade, aos 28 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno	83
Tabela 31 - Resultados individuais do módulo de elasticidade, aos 63 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno	84

Lista de Abreviaturas e Siglas

Símbolo	Significado
a/agl	Relação água/aglomerante
AGN	Agregado Graúdo Natural
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al_2O_3	Óxido de Alumínio - Alumina
CaO	Óxido de Cálcio
CO_2	Gás Carbônico
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
EAF	Escória de alto-forno
ECS	Elasticidade secante
IAB	Instituto Aço Brasil
MgO	Óxido de magnésio
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MnO_2	Dióxido de Manganês
MPa	Mega Pascal
GPa	Giga Pascal
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
SiO_2	Dióxido de Silício – Sílica
SINOBRAS	Siderúrgica Norte Brasil S. A
UFPA	Universidade Federal do Pará
a/c	Relação água cimento

1 INTRODUÇÃO

1.1 Disposições Gerais

Atualmente, a construção civil é caracterizada como uma das atividades mais relevantes para o desenvolvimento social e econômico do Brasil, porém, por outro lado, atua ainda diretamente gerando grandes impactos ambientais. A problemática ambiental cria desafio de se aliar desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental, fusão dentro da qual a economia circular apresenta um novo paradigma para impulsionar a sustentabilidade econômica, incitando a reutilização e a recuperação de materiais, diminuindo, assim, a quantidade de material armazenado ou descartado como resíduo no meio ambiente. Bem como, ações que permitem o desenvolvimento de novas tecnologias, a eliminação de desperdícios e a criação de processos mais competitivos e rentáveis (SINGH; ORDONEZ, 2016; LIU; JIANG; LIU, 2016).

Desse modo, a infraestrutura inteligente e as soluções sustentáveis devem caminhar de mãos dadas para o desenvolvimento saudável das regiões urbanas nos próximos anos. E o que tem sido observado é que nos últimos anos, o concreto tornou-se um dos materiais de construção civil mais consumidos no mundo, devido principalmente às suas características mecânicas, disponibilidade e durabilidade. Com o desenvolvimento industrial acelerado, aliado ao crescimento populacional contínuo, uma grande quantidade de estruturas progressivamente mais complexas utiliza cada vez mais concreto, as quais consomem grandes parcelas dos recursos naturais, com a produção global saltando de 21 bilhões de toneladas em 2007 para 40 bilhões de toneladas em 2014 (TAM, SOOMRO e EVANGELISTA, 2018).

Toda via, no âmbito da mitigação do impacto da construção civil no meio ambiente, deve-se considerar a aquisição de agregados naturais na produção de argamassas e concretos, visto que o consumo é excessivamente elevado. Conforme apresentado por Ferreira e Fonseca Junior (2012), no Brasil, para uma habitação popular de 50 m² são necessárias 68 t de agregados; na manutenção de vias municipais, se consome cerca de 100 t de agregados por quilometro restaurado, enquanto as estradas demandam cerca de 300t/km e em uma obra-padrão de 1120 m² para a construção de uma escola são consumidos 1675 t de agregados, demonstrando que o consumo dessa matéria prima é elevado. A crescente demanda por agregados, concomitante à produção de cimento, leva à extração predatória de agregados em

jazidas naturais, ao esgotamento e ao desenvolvimento de processos de erosão ambiental (GHOULEH et al., 2017).

Com isso, o passivo ambiental gerado pelas atividades produtivas de ambos os setores em sua forma convencional, seriam mitigados reduzindo a carga sobre reservas naturais do planeta. Além disso, resíduos deletérios seriam utilizados para fins necessários, agregando valor e utilidade aos mesmos e reduzindo os impactos ambientais gerados (SILVA, 2018).

Por isso, vale ressaltar que o processo siderúrgico produz grandes volumes de resíduos sólidos que ainda não possuem tecnologias viáveis para a sua reutilização ou reciclagem, necessitando de um destino final adequado. A disposição dos resíduos em aterros industriais, para os grandes volumes característicos dessa atividade, são onerosos e demandam uma crescente ampliação desses locais, além de causar diversos prejuízos ambientais e sociais. Assim, torna-se necessária a busca de alternativas mais sustentáveis para a destinação dos resíduos siderúrgicos (LOBATO, 2014), nesse sentido, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas com intuito de aproveitamento dos resíduos de suas indústrias de beneficiamento e transformação como matéria-prima para fabricação de insumos para a Construção Civil.

1.2. Justificativa

A Lei 12.305/2010 (BRASIL) representa um marco na gestão ambiental no Brasil, ao estabelecer como prioridade obrigatória a prevenção, redução, reutilização e reciclagem de resíduos, promovendo um ciclo sustentável para os resíduos sólidos. Nesse contexto, a disposição final de rejeitos deve ser feita de forma ambientalmente adequada, diferenciando resíduos de rejeitos, onde os primeiros devem ser reciclados e reaproveitados, e somente os rejeitos devem ser descartados ou reutilizados de maneira correta.

A construção civil se destaca como um dos setores com maior potencial para a reutilização de resíduos, não apenas pela necessidade de insumos de baixo custo, mas também pela capacidade de imobilizar grandes volumes de material. Os resíduos siderúrgicos, como a escória de alto-forno, possuem características compatíveis com os agregados naturais utilizados tradicionalmente na construção. O reaproveitamento desses resíduos tem o potencial de gerar materiais mais econômicos, duráveis e, principalmente, com menor impacto ambiental (FILHO, 2013; MONTINI, 2009).

A indústria siderúrgica brasileira, segundo o Instituto Aço Brasil (IAB, 2016), já avançou significativamente na reciclagem de materiais, com cerca de 30% da produção nacional de aço proveniente da reciclagem de automóveis, vergalhões e outros produtos de aço. Entretanto, o processo de produção do aço gera uma quantidade significativa de coprodutos, como a escória de alto-forno, que necessita de soluções inovadoras para seu aproveitamento, especialmente em setores como a construção civil, que consome aproximadamente 40% do aço produzido no país (IAB, 2018).

Com uma produção mensal de até 3 milhões de toneladas de aço bruto, o Brasil gera aproximadamente 1,8 milhão de toneladas de resíduos e coprodutos por mês, o que reforça a urgência de desenvolver novas aplicações para esses materiais. A utilização de escória de alto-forno na produção de concreto, por exemplo, pode não apenas reduzir a pressão sobre aterros, mas também diminuir a exploração de recursos naturais, como areia, brita e seixo alinhando o setor da construção civil com práticas mais sustentáveis.

A incorporação de agregados siderúrgicos, como a escória de alto-forno, no concreto estrutural, é uma alternativa viável e sustentável, contribuindo para a economia circular e o desenvolvimento de tecnologias que mitiguem os impactos ambientais. Diversos estudos têm demonstrado o potencial desse resíduo para a produção de concretos de alta qualidade, permitindo à engenharia civil integrar soluções ecológicas ao seu portfólio tecnológico.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho do resíduo gerado da produção de ferro gusa, escória de alto forno, produzida pela empresa Sinobras em Marabá PA como material de construção civil, especificamente como agregado graúdo e verificar suas propriedades mecânicas de acordo com as normas nacionais e ou internacionais vigentes.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Verificar as diferenças nas propriedades mecânicas dos concretos com teores de 50 %, 70 % e 100 % de EAF.
- Avaliar a influência que estes teores exercem sobre a trabalhabilidade do concreto no estado fresco;
- Buscar contribuir para diminuição dos impactos ao meio ambiente, pela produção de concretos sustentáveis, através do aproveitamento da EAF.

1.4 Estrutura da dissertação

A estruturação desta dissertação está dividida em 5 capítulos, de acordo com a figura 1 e descrição a seguir:

O capítulo 1: é apresentado uma introdução que engloba a contextualização do tema, os objetivos, as justificativas e a estrutura da dissertação.

O capítulo 2: traz uma revisão bibliográfica composta sobre a estrutura e as propriedades do concreto, sobre os agregados, as propriedades que serão avaliadas durante a pesquisa e uma visão geral sobre a escória de alto forno.

O capítulo 3: explana a parte experimental desta pesquisa, descrevendo a caracterização dos materiais utilizados na confecção dos concretos, bem como o planejamento e a execução dos ensaios.

O capítulo 4: é a apresentação e análise dos resultados e discussões da pesquisa, entre elas as variáveis e propriedades avaliadas.

O capítulo 5: é formado pelas conclusões, bem como de sugestões para futuras pesquisas que abordem temas semelhantes.

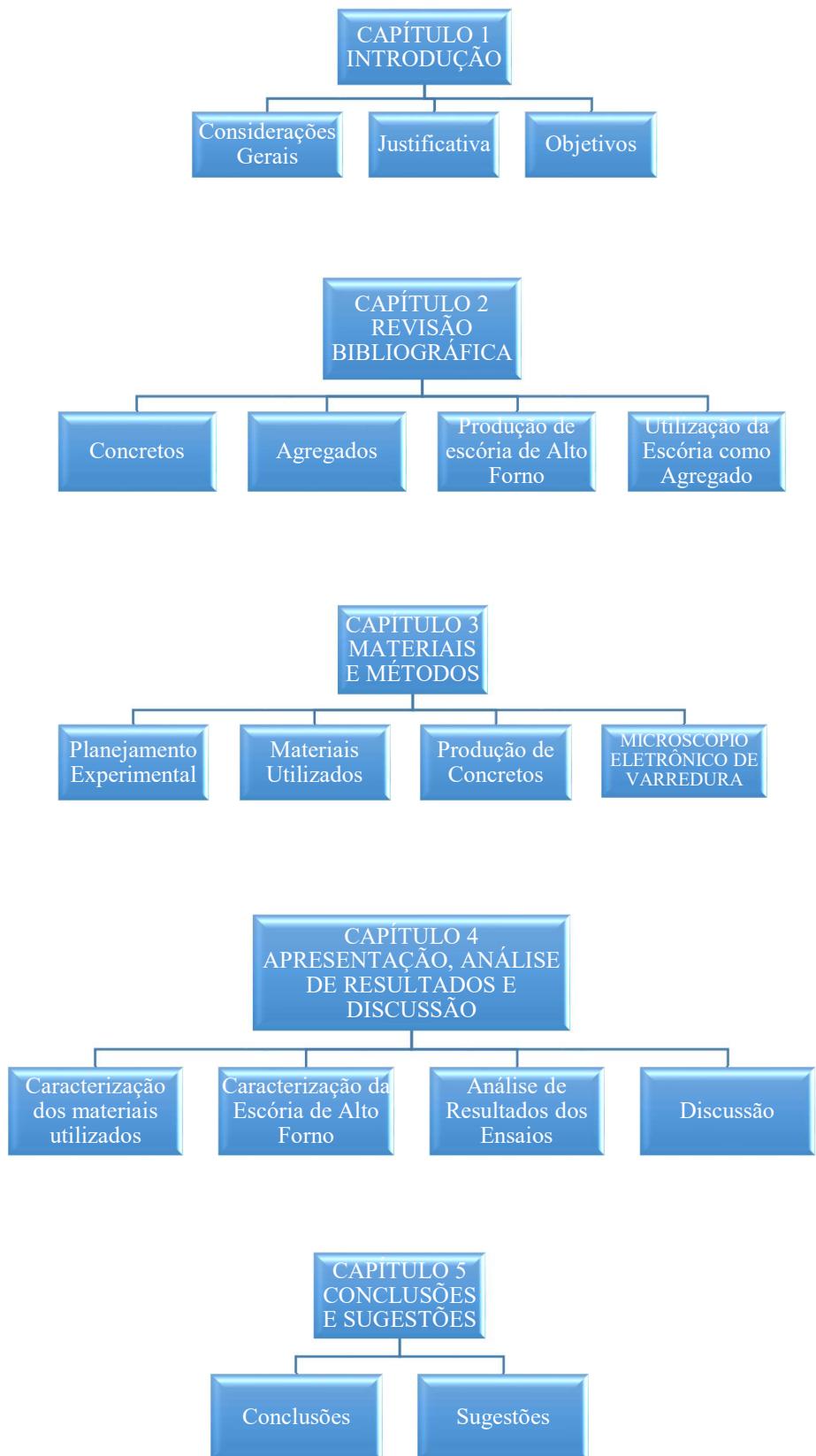


Figura 1 – Estrutura da Dissertação

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. Concreto

Concreto é o material sintético mais utilizado no mundo, e sua produção global é estimada em 10 bilhões de toneladas por ano. Corresponde a um material compósito formado por meio ligante, no qual partículas de diferentes naturezas formam um aglomerado continuo, geralmente constituído de 10 a 20 % de cimento Portland, 70 a 80 % de agregados e 5 a 10 % de água, em volume (MEHTA; MONTEIRO, 2008; GHOULEH et al., 2017).

Já para Mehta e Monteiro (2014), o concreto é um material compósito que consiste essencialmente de um meio aglomerante no qual estão aglutinados partículas ou fragmentos de agregado. No concreto de cimento hidráulico, o aglomerante é formado através da mistura proveniente do cimento hidráulico com a água.

Nesse sentido, as proporções adotadas entre água, cimento, agregados finos e agregados miúdos são capazes de conferir ao concreto diferentes propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade, além de características que possibilitem a trabalhabilidade do mesmo de acordo com o fim requerido. A relação água/cimento utilizada confere ao concreto um desempenho distinto quando endurecido. Quanto menor for essa relação, maior será a resistência mecânica do mesmo (ISAIA, 2007).

A macroestrutura do concreto apresenta a pasta do cimento endurecida que envolve as partículas de agregado graúdo (brita) e miúdo (areia), apresentando também a zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento. Cada uma das fases do concreto é de natureza multifásica, sendo que cada partícula de agregado pode ser composta por inúmeros minerais, além de fissuras e vazios. A matriz da pasta de cimento apresenta uma distribuição heterogênea, de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras, e as mudanças microestruturais que ocorrem nos compostos formados na hidratação do cimento com o decorrer do tempo (METHA & MONTEIRO, 2014).

De acordo com Silva (2005), a fase representada pelo agregado é a principal responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. Alguns agregados possuem elementos que reagem com alguns compostos do cimento, prejudicando o concreto. A forma, a granulometria e a textura do agregado influenciam também nas propriedades do concreto. Agregados com grande diâmetro característico ou de forma lamelar facilitam a formação de um filme de água junto às paredes

de agregado (exsudação), aumentando a porosidade da região e consequentemente enfraquecendo sua ligação com a pasta (zona de transição pasta de cimento e agregado). Agregados com diâmetro grande podem apresentar maior probabilidade de conter vazios e microfissuras internas. É importante observar que independente da alta resistência à compressão dos agregados, estes pouco influem na resistência inicial do concreto, pois os esforços tendem a romper na região de menor resistência mecânica. Entretanto, com o passar do tempo a resistência da pasta aumenta, podendo até superar a do agregado.

É notório que as propriedades de um material são intimamente ligadas à sua microestrutura, e a do concreto, por sua vez, é altamente heterogênea e complexa. Microestruturalmente, o concreto é constituído de uma matriz de pasta de cimento, que se caracteriza pela presença de produtos hidratados e grãos anidros de cimento; pelos agregados graúdos e miúdo distribuídos na pasta; além de apresentar uma região de interface entre pasta de cimento e partículas de agregados graúdos, denominada zona de transição, e elevada porosidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Na Figura 1, pode ser observado a representação diagramática da zona de transição e da matriz.

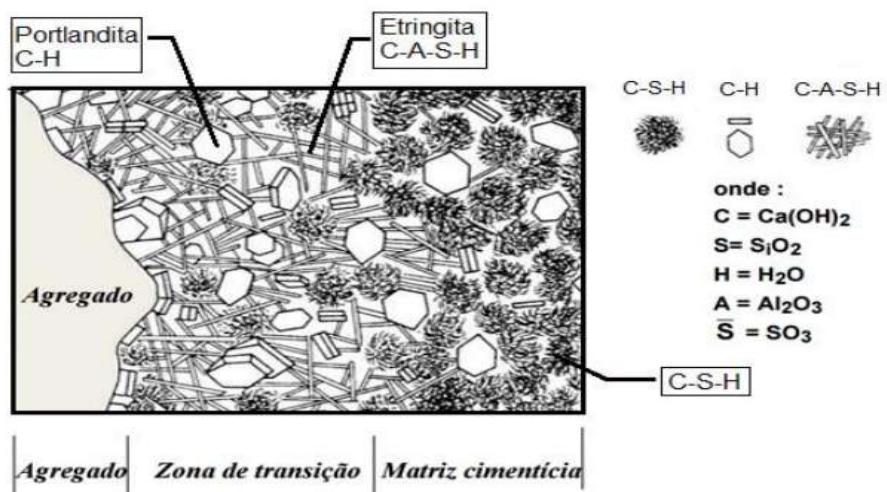


Figura 2 – Representação diagramática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento no concreto.

Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2008.

De acordo com Metha & Monteiro (2014), as propriedades de um material têm origem na sua estrutura interna. A estrutura de um material é constituída pelo tipo, tamanho, quantidade, forma e distribuição das fases presentes. O concreto é composto basicamente por três fases distintas:

- A) Pasta: Normalmente composta por pasta de cimento Portland, sua principal função é envolver os agregados, preenchendo os espaços vazios formados e proporcionando ao concreto a trabalhabilidade necessária para sua aplicação.
- B) Agregados: a fase agregado é predominantemente responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. Estas propriedades do concreto dependem fundamentalmente da densidade e resistência do agregado, que, por sua vez, são determinadas mais por características físicas do que por características químicas da estrutura do agregado;
- C) Zona de transição: representa a região interfacial entre as partículas de agregado graúdo e a pasta. Composta por uma camada delgada, tipicamente de 10 µm a 50 µm de espessura em volta do agregado graúdo. A zona de transição é usualmente mais fraca do que os outros dois componentes principais do concreto, e, consequentemente, exerce uma influência muito maior sobre o comportamento mecânico do concreto do que pode ser esperado pela sua dimensão.

Na interface entre agregado e pasta de cimento é possível verificar uma região que dispõe de características específicas, que diferem da matriz cimentícia, com grandes cristais orientados de Ca(OH)₂ e maior relação água/aglomerante (a/agl). Nesta região, denominada zona de transição, a estrutura da pasta não é homogênea, pois apresenta porosidade elevada e menor resistência quando comparada a matriz cimentícia, na qual fissuras são facilmente formadas. Considerada como a fase limitante da resistência do concreto, as suas características serão mais expressivas de acordo com o aumento da dimensão do agregado, pois, assim, maior será o filme de água acumulado em torno do agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2006; OLIVIER; TORRENTI, 2014).

A estrutura porosa do concreto pode ser formada por vazios capilares, isto é, espaços não preenchidos pelos produtos de hidratação inicialmente ocupados pela água que podem variar entre 10 a 50 nm, e podem ser conectados ou não com o exterior (conforme figura 2); e por vazios de produtos hidratados, formados no interior de produtos, como o C-S-H, da

ordem de 5-25 Å, gerando pouca influência na permeabilidade da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2006; OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

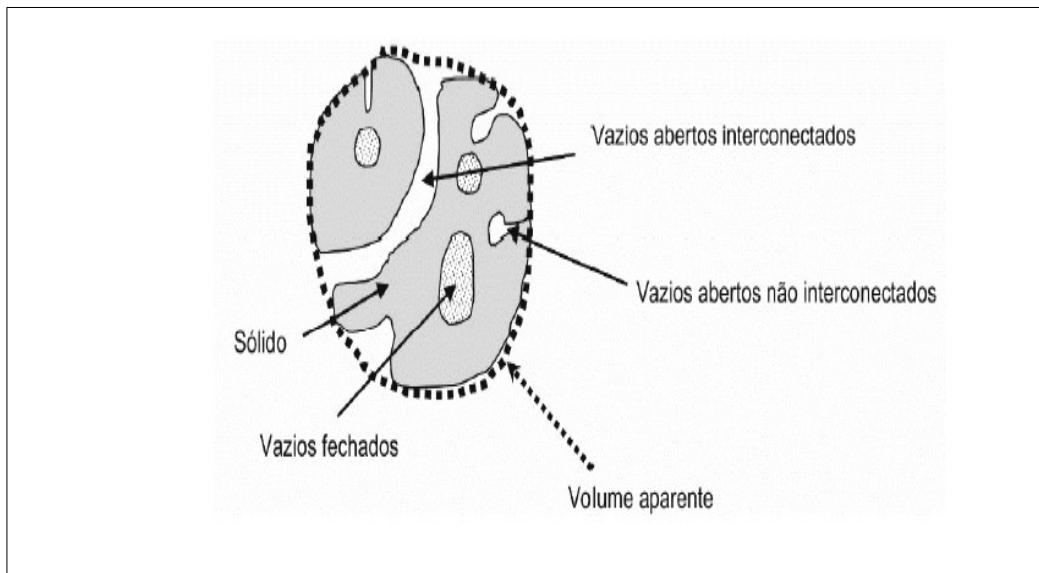


Figura 3 – Descrição esquemática da estrutura porosa do concreto.
Fonte: Ollivier e Torrenti (2014).

Logo, cabe ressaltar que as propriedades do concreto são de fundamental importância para a atual desenvoltura da engenharia civil. Entre as propriedades do concreto fresco, Moreno Samaniego (2014), afirma que a mais importante é a trabalhabilidade, a qual é influenciada por fatores como a relação água/materiais secos, tipo e consumo de cimento, traço, teor de argamassa, tamanho, textura e forma dos agregados.

De acordo com Metha e Monteiro (2014), a trabalhabilidade é uma propriedade composta por ao menos dois componentes principais; Consistência (descreve a facilidade de escoar) e coesão (descreve a resistência à exsudação e à segregação). O conceito de trabalhabilidade não se refere a uma propriedade intrínseca do concreto, pois, para fazer sentido, deve ser relacionada com o tipo de construção e o método de lançamento, adensamento e acabamento. Em 2008, os autores supracitados, referiram a trabalhabilidade como a propriedade que determina o esforço necessário para realização das operações de lançamento, adensamento e acabamento do concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade.

Vasconcelos (2016), menciona que a trabalhabilidade é uma propriedade do concreto de difícil definição, sua natureza composta e sua dependência do tipo de construção e dos métodos de lançamento, adensamento e acabamento são as razões pelas quais nenhum método de ensaio pode ser projetado para medir a trabalhabilidade. O ensaio universalmente

utilizado, que mede somente a consistência do concreto, é o ensaio de abatimento por tronco de cone, preconizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Segundo Popovics (1982), a trabalhabilidade é um conceito que abrange a consistência e a plasticidade. A consistência é relacionada à umidade da mistura, ou seja, à relativa habilidade de uma mistura fresca fluir e plasticidade é a capacidade do concreto de se deformar sob ação da sua própria massa, capacidade de ser moldado sem perder continuidade e de manter a forma.

Nesse sentido, o ensaio mais comum para avaliação da qualidade do concreto empregado em estruturas é o ensaio de resistência à compressão. A ampla utilização deste ensaio pode-se atribuir a três fatores principais: a relação direta entre a resistência do concreto com a capacidade da estrutura em resistir às cargas aplicadas sejam elas de tração, compressão ou cisalhamento, ou combinação destas; a facilidade de execução do ensaio e a possibilidade do desenvolvimento de correlações entre a resistência com outras propriedades do concreto (CASTRO, 2009).

A resistência à compressão, considerada como a propriedade fundamental do concreto, pode ser definida como a capacidade do material de suportar ações aplicadas sem que entre em colapso e é utilizada como parâmetro que indica a qualidade do concreto, por estar diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento endurecida (Neville, 1982; Isaia, 2005). O valor da resistência obtida depende não só das características do concreto, mas também do tipo de ensaio à compressão.

Para determinar a resistência à compressão de testemunhos extraídos de estruturas de concreto se deve ensaiar de acordo com o estabelecido pela NBR 7680:2007-Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto, a qual especifica um diâmetro pelo menos três vezes maior que o agregado graúdo e razão de esbeltez não superior a dois ou inferior a um, ou seja, $1 \geq h/d \geq 2$, após a preparação das superfícies de ensaio dos testemunhos.

Lamond e Pielert (2010), comentando sobre os ensaios para obtenção da resistência, afirmam que a resistência do concreto é afetada também por muitas variáveis encontradas na produção dos corpos de prova para o teste de resistência, entre as quais se incluem as dimensões dos corpos de prova, o tipo de regularização do topo, a velocidade do carregamento de ensaio, a consolidação do concreto, o tipo de molde, adensamento, condições de cura e a temperatura.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a relação entre o nível de tensão, expressa como porcentagem da carga última, e a microfissuração no concreto, pode ser entendida nos quatro estágios do comportamento do concreto como pode ser observado na Figura 3.

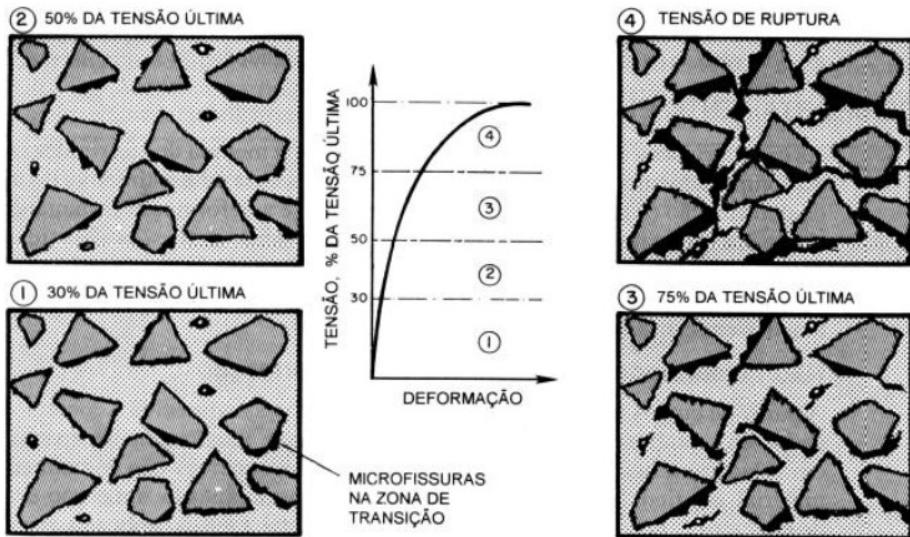


Figura 4 - Representação esquemática do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial até a ruptura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Primeiro estágio: até cerca de 30% da carga última as fissuras da zona de transição (agregado-pasta) permanecem estáveis.

Segundo estágio: acima de 30% da carga última, com o aumento da tensão, as microfissuras da zona de transição começam a aumentar em comprimento, largura e número. Até cerca de 50% da tensão última, admite-se que exista um sistema estável de microfissuras na zona de transição. Neste estágio, a fissuração da matriz é considerada desprezível.

Terceiro estágio: de 50% a 60% da carga última, as fissuras começam a se formar na matriz. Com o aumento da tensão até cerca de 75% da carga última, vislumbra-se a instabilidade do sistema de fissuras na zona de transição e a proliferação e propagação de fissuras na matriz, fazendo com que a curva tensão-deformação se incline em direção à horizontal.

Quarto estágio: acima de 75% da carga última, com o aumento da tensão, desenvolvem-se deformações muito grandes, indicando que o sistema de fissuras está se tornando contínuo devido à rápida propagação de fissuras tanto na matriz como na zona de transição.

Além desses fatores, outro comportamento do concreto pode estar sendo avaliado para determinar sua qualidade é o módulo de elasticidade. Elasticidade é a capacidade que alguns materiais apresentam de se deformarem quando submetidos a esforços, mas retornar as dimensões iniciais depois de cessado o carregamento ao qual foi submetido (CALLISTER, 2014). Nesse sentido, a composição mineralógica do agregado e sua porosidade influenciam na resistência, na dureza e no módulo de elasticidade do concreto, que afetam seu comportamento quando endurecido (Mehta, 1994).

O módulo de elasticidade determina o valor da rigidez de um material, isto é, avalia sua capacidade resistente, desta forma quanto maior é a sua resistência, mais esforço será necessário para deformar o material. A importância do limite de elasticidade em um projeto estrutural deve-se ao fato do mesmo representar a deformação máxima permitida antes de o material adquirir deformação permanente (METHA & MONTEIRO, 1994).

Assim como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade do concreto depende da porosidade de suas fases (pasta, agregado e zona de transição). Assim sendo inúmeros comportamentos observados na resistência repetem-se no módulo de elasticidade. No caso do agregado, sua dimensão máxima, forma, textura superficial, granulometria, composição mineralógica e massa específica também podem influir no módulo de elasticidade em função da micro fissuração na zona de transição. Todavia, a porosidade é mais importante em virtude de estar ligada à sua rigidez e resistência (METHA & MONTEIRO, 1994).

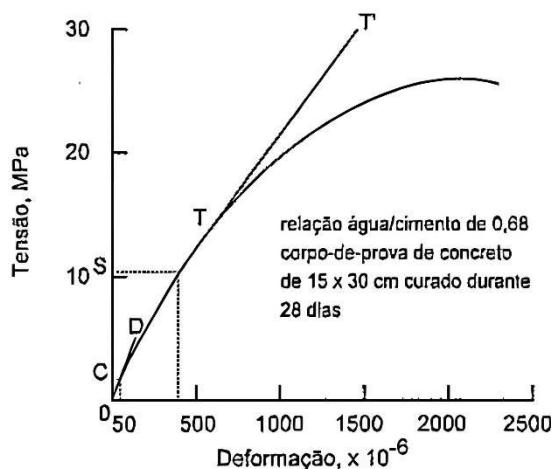
Além disso, de acordo com Shehata (2005) na literatura são determinados três tipos de módulos de elasticidade:

1. Módulo tangente é o coeficiente angular da reta tangente a qualquer ponto da curva tensão-deformação de compressão, mas em geral, quando se cita esse módulo sem especificar o ponto da curva, refere-se à origem, o seja, ao módulo tangente inicial. Neste caso, corresponde na nomenclatura utilizada na norma ABNT NBR 6118:2023 e na norma ABNT NBR 8522-1:2021, ao módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente à origem ou inicial (E_{ci}) que é considerado equivalente ao módulo de deformação secante ou cordal entre $\sigma_a = 0,5$ MPa e 30% da carga de ruptura (f_c).
2. Módulo secante é a relação entre uma tensão qualquer e a deformação a ela correspondente, isto é, o coeficiente angular da reta que liga os pontos da curva tensão-deformação correspondentes a essa tensão e a tensão igual a zero. Quando não se menciona a tensão, infere-se que o módulo secante seja relativo a uma tensão entre 40 e 50% da resistência à compressão.

Corresponde na nomenclatura utilizada na norma ABNT NBR 6118:2023 e na norma ABNT NBR 8522-1:2021 ao módulo de elasticidade secante (E_{cs}) a ser utilizado na determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço.

3. Módulo cordal é definido pela reta que liga dois pontos quaisquer da curva tensão-deformação. É importante considerar que, sendo a menor tensão da reta relativa ao módulo cordal próxima de zero, os módulos cordal e secante para uma dada tensão praticamente se confundem e que, nos casos de concretos de resistência muito alta, os três módulos coincidem.

Além destes módulos de elasticidade outros tipos de módulo podem ser estabelecidos como módulo de elasticidade à flexão, módulo sob carga de longa duração, módulo sob impacto entre outros (MELO e HELENE, 2002). Na Figura 4 são representados os três tipos de módulo de elasticidade para um concreto de resistência à compressão (f_c) de 26MPa.



O = origem

C = tensão correspondente a uma deformação longitudinal de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$
S = tensão correspondente a 40% de f_c

Figura 5 – Diferentes módulos de elasticidade. Adaptada de (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O módulo tangente é dado pela declividade da reta TT', tangente à curva tensão-deformação. O valor do módulo tangente inicial é dado pela declividade do segmento de reta correspondente às tensões O e D. O módulo secante é dado pela inclinação do segmento de reta correspondente às tensões O e S e, finalmente, o módulo cordal é dado pela inclinação do segmento correspondente às tensões C e S.

As normas brasileiras ABNT NBR 6118:2023 e ABNT NBR 8522:2021 adotam, como segundo ponto da curva para a determinação dos módulos tangente e secante, o valor correspondente a 30% da resistência à compressão do concreto (f_c), em vez dos 40% f_c .

anteriormente definidos. O módulo de elasticidade é considerado equivalente ao módulo de deformação, pois, na tensão correspondente a 30% f_c , o concreto encontra-se no regime elástico.

2.2 Agregados

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

No Brasil, a escolha do agregado para a produção de concreto de alto desempenho não é normatizado, porém, existe a ABNT NBR 7211 (2005) que especifica os agregados para concretos comuns. Os agregados são divididos em duas classes, graúdo e miúdo. Segundo a ABNT NBR 7211 (2005), o agregado graúdo é o agregado o qual seus grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75mm e ficam retidos na peneira de abertura de 4,75mm, ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248. Já o agregado miúdo é o agregado o qual seus grãos passam pela peneira com abertura de 4,75mm e fica retido na peneira com abertura de malha de 150 μm .

Os agregados devem ser compostos por grãos minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, assim como não devem conter substâncias de natureza e quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto NBR 7211 (ABNT, 2011).

Na produção de concretos, as propriedades dos agregados que interessam são classificadas em geológicas, físicas e mecânicas (FRAZÃO, 2002). As propriedades geológicas, (mineralogia e petrografia) estão estreitamente ligadas à natureza da rocha. As propriedades físicas e mecânicas são influenciadas pelas propriedades geológicas. As físicas podem ser resumidas em: porosidade, composição granulométrica, absorção de água, estabilidade, forma e textura superficial dos grãos, resistência mecânica, módulo de deformação e substâncias deletérias presentes. A partir do conhecimento dessas propriedades passou-se a cuidar melhor da seleção dos agregados para uso em concretos em ambientes específicos de inserção (SBRIGHI, 2005).

Quanto à origem, os agregados são classificados em quatro tipos: naturais, encontrados na natureza já preparados para uso sem qualquer beneficiamento que não seja a lavagem; britados, submetidos ao processo de cominuição, geralmente por britagem; artificiais, derivados de processos industriais e reciclados; resíduos industriais granulares, que tenham propriedades adequadas (SBRIGHI, 2005; NBR 9935, 2005; NBR 7211, 2005). Quanto à dimensão dos grãos, a norma NBR 7211 (2005) classifica os agregados em graúdo, miúdo, total e filler.

Agregado graúdo é aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 4,75mm, em ensaios realizados de acordo com a norma ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela norma ABNT NBR ISO 3310-1 (1996). Na tabela 1, pode ser observado os limites de composição granulométrica do agregado graúdo de acordo com a NBR 7211.

Tabela 1 – Limites de composição granulométrica do agregado graúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona Granulométrica d/D ^a				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 - 5
63 mm	-	-	-	-	5 - 30
50 mm	-	-	-	0 - 5	75 - 100
37,5 mm	-	-	-	5 - 30	90 - 100
31,5 mm	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25 mm	-	0 - 5	5 - 25 b	87 - 100	-
19 mm	-	2 - 15b	65b - 95	95 - 100	-
12,5 mm	0 - 5	40b - 65b	92 - 100	-	-
9,5 mm	2 - 15b	80b - 100	95 - 100	-	-
6,3 mm	40b - 65b	92 - 100	-	-	-
4,75 mm	80b - 100	95 - 100	-	-	-
2,36 mm	95 - 100	-	-	-	-

a = Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.

b = Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2. Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2022, P. 8)

O agregado miúdo é a areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8mm e ficam retidas na peneira ABNT 0,075mm. Segundo a ACI 363R-10 o agregado miúdo é escolhido levando em consideração a demanda de água e o seu empacotamento físico, sendo preferíveis partículas arredondadas e lisas, pois essas necessitam de menor quantidade de água de

amassamento. E o melhor módulo de finura indicado para o concreto de alto desempenho é de aproximadamente 3,0 m. Porém, segundo Aitcin (1998), a areia natural deve conter uma parte do total de partículas maiores do que 4,8mm, devido à resistência à compressão do agregado miúdo não ser muito forte e poder se tornar o “elo fraco” no concreto. Pode ser observado na tabela 2 o limite da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Agregado total é o agregado resultante da britagem de rochas cujo beneficiamento resulta em uma distribuição granulométrica constituída por agregados graúdos e miúdos ou por uma mistura intencional de agregados britados e areia natural ou britada, possibilitando o ajuste da curva granulométrica em função das características do agregado e do concreto a ser preparado com esse material (VIERO, 2010).

Filler é um material fino, constituído por partículas de dimensões inferiores a 0,075mm. São partículas que passam na peneira número 200 da série normal (SBRIGHI, 2005).

Tabela 2 – Limite da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona Utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona Utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 um	85	90	95	100

NOTA 1: O modulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

NOTA 2: O modulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20

NOTA 3: O modulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009, P.5)

Nesse sentido, o conhecimento de certas características dos agregados, a exemplo da massa específica, composição granulométrica e teor de umidade é uma exigência para a dosagem dos concretos. A porosidade, massa específica, composição granulométrica, forma e textura superficial determinam as propriedades dos concretos no estado fresco. Além da porosidade, a composição mineralógica do agregado afeta a sua resistência à compressão, dureza, módulo de elasticidade e sanidade, que por sua vez influenciam em várias propriedades do concreto endurecido contendo o agregado. As características dos agregados

que são importantes para a tecnologia do concreto, decorrem da microestrutura do material, das condições prévias de exposição e do processo de fabricação (VASCONCELOS, 2016). Na tabela 3 pode ser observado as propriedades do concreto influenciadas pelas características dos agregados.

Além disso, é importante também conhecer as características externas, particularmente, a forma e a textura superficial das partículas dos agregados (NEVILLE, 1997). A forma se refere às características geométricas como arredondada, angulosa, alongada ou achatada. O grau de adensamento depende da forma do agregado.

Tabela 3 – Propriedade do concreto influenciadas pelas características dos agregados.

Propriedades do Concreto	Características relevantes dos agregados
Resistencia mecânica	Resistencia mecânica textura superficial Limpeza Forma dos grãos Dimensão máxima
Retração	Modulo de elasticidade Forma dos grãos Textura superficial Limpeza Dimensão máxima
Massa unitária	Massa específica Forma dos grãos Granulometria Dimensão máxima
Resistencia à derrapagem	Tendência ao polimento
Economia	Forma dos grãos Granulometria Dimensão máxima Beneficiamento requerido Disponibilidade

Fonte: VALVERDE, 2007.

2.3 Produção da escória de alto-forno

A escória é um subproduto inevitável nos processos siderúrgicos, constituído em sua maior parte de aluminossilicatos de cálcio na forma vítrea. A fusão da ganga do minério de ferro e dos fundentes através de reações químicas formam a escória. Além dos aluminossilicatos cálcicos, ocorrem secundariamente a formação de sulfetos de cálcio e manganês e óxidos de ferro e manganês (MASSUCATO, 2005). A forma como é resfriada influência diretamente em sua estrutura, e assim sua utilização. Logo, a faixa de temperatura dependerá da composição da escória usada. Assim uma mistura com 60% de sílica, 15% de Alumina e 23% de Cal começa a fundir a 1160º C, porém, mesmo com um superaquecimento de 400º ou 500º C, ainda permanece viscosa. Por outro lado, uma mistura com 47% de Sílica, 18% de Alumina e 35% de Cal inicia a sua fusão a 1295º C e está inteiramente líquida a 1400º C (SOUZA, 2007).

Nesse sentido, as principais funções dos altos fornos para a produção de ferro gusa são de reduzir os óxidos de ferro e fundir o metal formado. Devido à natureza das cargas metálicas (minérios, sínter e pelota) que têm os óxidos CaO, Al₂O₃, SiO₂, MgO, MnO₂, P₂O₅, Na₂O e K₂O, associados aos óxidos de ferro e da presença das cinzas de coque, é gerada a escória de alto forno. A escória quando submetida a condições de resfriamento brusco na saída do alto-forno, por meio de jatos de água sob alta pressão, não havendo tempo suficiente para formação de cristais, essa escória se granula, vitrificando-se, processo este denominado, granulação da escória, que apresenta propriedades hidráulicas latentes, com diâmetro máximo de 5 mm, com 95%, em peso, passando na peneira de 4,8 mm. Essa escória é denominada, escória granulada.



Figura 06 – Escória de alto forno, Pátio Sinobras

Fonte: Própria (2024)

A escória resfriada ao ar é formada pelo resfriamento lento da escória num poço ao ar livre. A escória expandida é obtida pelo rápido vazamento da escória fundida em poços de paredes inclinadas, molhadas no fundo, que permite que o vapor penetre na escória quando líquida. Na tabela 4 abaixo, pode ser observado a composição química da escoria de alto forno.

Entretanto, se o processo utilizado for com resfriamento lento, ao ar livre, a escória de alto-forno se cristaliza, processo denominado, escória não granulada, formando um produto sem atividade hidráulica, de aspecto vítreo e sem distribuição granulométrica definida. Desta maneira pode-se atribuir a reatividade hidráulica da escória de alto-forno à sua forma de obtenção. Essa escoria tem temperaturas diferentes de início de amolecimento e final de fusão, o que caracteriza a zona de amolecimento e final de fusão do alto forno. Com a descida do metal e escoria através da coluna de coque (zona de gotejamento), os níveis de temperatura são maiores, o FeO é reduzido rapidamente e o CaO dos fundentes incorpora a escória (MUAN e OSBORN, 1975).

Tabela 4 – Composição química típicas das escórias de alto-forno.

Elemento	Escoria básica (BATTAGIN & ESPER, 1988)	Escoria ácida (adaptado de SOARES, 1982)
CaO	40 - 45	24 - 39
SiO ₂	30 - 35	38 - 55
Al ₂ O ₃	11 - 18	8 - 19
MgO	2,5 - 9	1,5 - 9
Fe ₂ O ₃	0 - 2	0,4 - 2,5
FeO	0 - 2	0,2 - 1,5
S	0,5 - 1,5	0,03 - 0,2
CaO/SiO ₂ (média)	1,31	0,68

Fonte: Jonh, apud. Coelho (2002).

Ilustra-se, na Figura 6, a parte interna do alto forno, destacando as zonas de amolecimento, fusão e de gotejamento. A escoria formada, após a escória primaria e acima do nível das ventaneiras, é chamada de escoria secundaria ou escoria de rampa. Finalmente, as cinzas de coque são incorporadas na escoria, forma-se a escória de alto forno (final). Logo, existe uma grande diferença de composição química entre escorias primaria, secundaria e final (CASTRO et al., 2000).



Figura 7 – Esquema da parte interna do alto forno (zonas de amolecimento e fusão e de gotejamento)

Fonte: CASTRO et al., (2000).

Porém esta escória não tem como único papel a eliminação de compostos que são carregados e que não saem com o ferro gusa; é importante para a eficiência global do processo de controle desde a formação da primeira escoria dentro do alto forno, até a eliminação completa da escoria final de alto forno. Na figura 6, apresenta-se o diagrama triangular de RANKIN que mostra a faixa de composição química das escorias em relação a outros materiais.

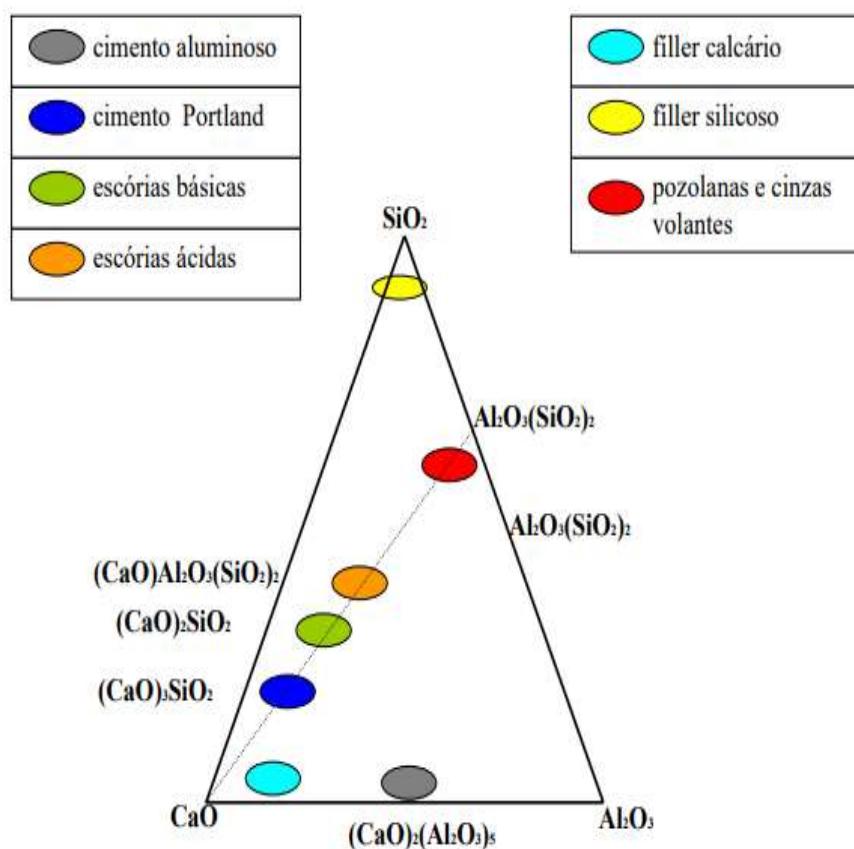


Figura 8 – Representação do sistema $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ da escoria de alto forno.

Fonte: (adaptado de: ALEXANDRE e SEBILLEAU, 1988)

Segundo Feilo e Royster (1981) e Lee (1974), dado as escorias de alto forno se produzem mediante a completa fusão de seus constituintes seguido de um resfriamento em condições de certa forma controladas, o nível de variação de suas propriedades pode ser amplo. Podendo ser tão cristalina como o granito ou tão amorfa como um vidro, tendo propriedades hidráulicas que se aproximem daquelas do cimento Portland ou ser tão inerte

quanto o basalto. A importância da organização atômica da escória é determinante para seu poder aglomerante. Este grau de vitrificação, por sua vez, é caracterizado pela forma e tempo o qual a escória esfria-se.

2.4 Utilização da escória de alto-forno como agregado para construção civil

A escória de alto forno é um subproduto inevitável, gerado na produção de ferro fundido em alto forno constituído basicamente por silicatos e aluminossilicatos de cálcio na forma vítreia, que após um processo de tratamento adquire características aglomerantes. As escórias exercem uma grande variedade de funções químicas e físicas, de receptoras de parte de metais e óxidos não reduzidos numa extração primária, até reservatório e absorvedor de impurezas retiradas no processo de refino pirometalúrgico (GALDEANO, 1994). Elas também têm a função de proteger o metal do processo de oxidação e diminuir as perdas de calor.

As escórias siderúrgicas podem agregar valor quando empregadas na construção civil como substituição de matérias-primas em estradas, concreto e cimento. Estes resíduos podem ser aplicados em base e sub-base de pavimento, lastro de ferrovias, agregado graúdo em revestimento asfáltico, material de aterro, agregados no concreto, matéria-prima na produção de cimento (VIKLUND et al., 1999; GARCÍA et. al., 1999).

Nesse sentido, a utilização de escória de alto-forno na produção do concreto é uma prática adotada em diversos países, seja no concreto preparado com cimento Portland de alto-forno, ou no resultante da adição da escória em substituição à parte do cimento. Em 2003 foram consumidas 3,1 milhões de toneladas de escória de alto-forno moída nos Estados Unidos para adição em concreto e aplicações em obras, gerando um aumento de 5,4% em relação a 2002 (SCA, 2005).

No Brasil, pesquisas realizadas pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) sobre a caracterização e emprego de EAF, como aglomerante e agregado, em estado bruto, para o concreto, estão contribuindo para consolidação do aproveitamento deste resíduo no setor da construção civil.

E de acordo com (NEVILLE, apud. MOURA, 2000) a adição de escória de alto-forno pode provocar muitas melhorias nas características do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A mistura é mais coesiva e a fluidez é aumentada, devido a melhor distribuição das partículas de escória e à superfície lisa dessas partículas, que absorvem pouca água; proporciona um desprendimento de calor mais lento, devido à

velocidade das reações de hidratação; a microestrutura da pasta de cimento hidratada é mais densa, devido a maior formação de C-S-H, melhorando a resistência mecânica e a durabilidade a longo prazo. No entanto, (CANESSO et al., 2005) diz que para usufruir das vantagens proporcionadas pela adição de escória de alto-forno é necessário um controle de sua dosagem para fabricação do cimento, bem como do concreto.

Já Neville (1997), afirma que a adição de escória de alto-forno pode provocar muitas melhorias nas características do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A mistura é mais coesiva e a fluidez é aumentada, devido a melhor distribuição das partículas de escória e à superfície lisa destas partículas, que absorvem pouca água. A adição de escória proporciona um desprendimento de calor mais lento, devido à velocidade das reações de hidratação. A microestrutura da pasta de cimento hidratada é mais densa, devido a maior formação de C-S-H, melhorando a resistência mecânica e a durabilidade a longo prazo.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), no estado fresco do concreto, a adição de escória de alto-forno melhora a coesão e a trabalhabilidade, podendo também melhorar a resistência do concreto à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado, e ao ataque por sulfatos. Já no estado endurecido, reduz o calor de hidratação, provocando uma fissuração térmica menor, isto é, uma menor permeabilidade, ocasionando uma maior resistência química (CALIXTO, 2005).

Esse aumento da resistência à penetração de cloretos e ao ataque por sulfatos é explicado por (NEVILLE, apud. BARIN, 2008) no processo de hidratação da escória, neste ela reage primeiramente com os hidróxidos alcalinos e posteriormente com o hidróxido de cálcio liberado pelo cimento Portland, formando o C-S-H. A formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) contribui para o refinamento dos poros, transformando vazios capilares grandes em muitos vazios de tamanho pequeno.

A reação pozolânica também é responsável pelo refinamento do tamanho dos grãos, transformando os maiores em menores e aumentando a resistência da pasta de cimento. Devido a este efeito, ocorre um aumento da resistência, na zona de transição, principal fonte de microfissuras no concreto e, consequentemente, uma sensível diminuição na permeabilidade do sistema, impedindo a penetração de agentes agressivos e aumentando a durabilidade do concreto.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização desta pesquisa, será desenvolvido o seguinte programa de ensaios, baseando-se na produção de concretos com a utilização de agregados graúdos de escória de alto-forno em substituição, em massa, de 50%, 70% e 100% em relação ao agregado graúdo natural (seixo). Essas proporções foram escolhidas para avaliar de forma abrangente a influência da substituição parcial e total dos agregados naturais por escória de alto-forno nas propriedades do concreto. A escolha dessas porcentagens permite observar como diferentes níveis de substituição afetam a trabalhabilidade, resistência e durabilidade do concreto, fornecendo uma base comparativa sólida para determinar a viabilidade e os benefícios potenciais do uso de escória de alto-forno em aplicações práticas, além disso, esta pesquisa, desenvolvida no âmbito do programa de mestrado do PPGEC, buscou complementar os resultados obtidos pelo MSc. Adriano Luiz Roma Vasconcelos em sua dissertação intitulada Efeito da Substituição Parcial do Agregado Graúdo por Escória de Alto-Forno nas Propriedades Mecânicas do Concreto, que investigou concretos produzidos com agregados de escória de alto-forno em substituições parciais de 20%, 30% e 40%, em massa, ao agregado graúdo natural (seixo).

Os ensaios de caracterização dos materiais, avaliação do desempenho mecânico das argamassas e avaliação do desempenho mecânico dos concretos serão distribuídos de acordo com as Figuras 8 e 9.

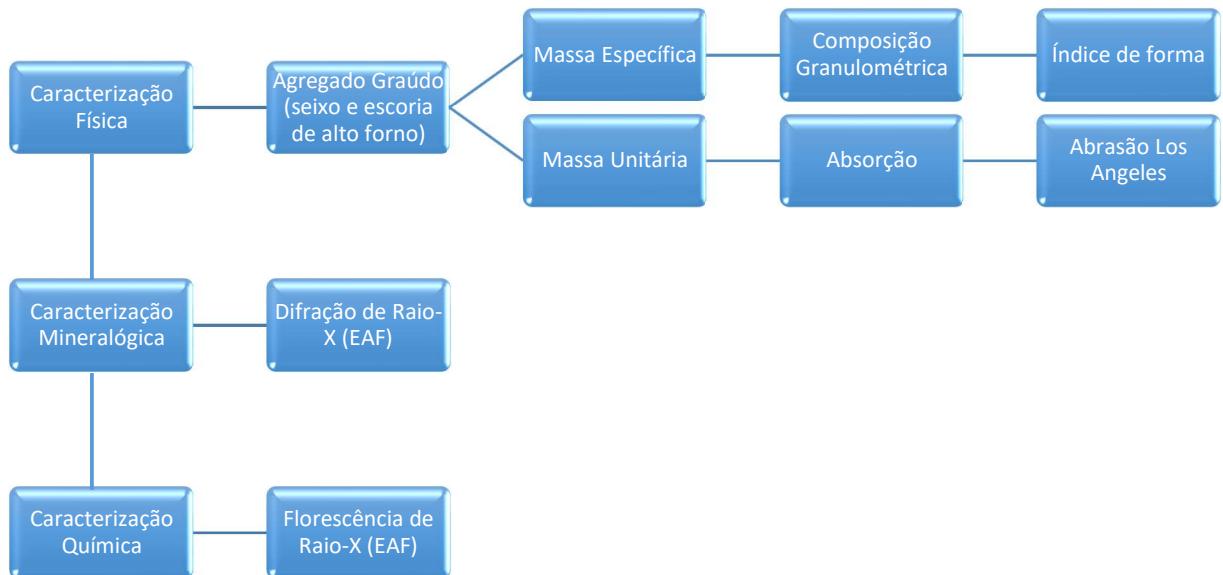


Figura 9 – Fluxograma da caracterização física, mineralógica e química dos materiais empregados na pesquisa.



Figura 10 - Fluxograma da análise mecânica dos materiais empregados na pesquisa

Os ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade serão realizados no Laboratório de Engenharia Civil, localizado na Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA).

3.1.1. Variáveis de resposta

No estudo do comportamento dos concretos com agregados de EAF, para se alcançar os objetivos propostos, é de suma importância a definição e quantificação das variáveis que servirão de parâmetro para a obtenção das respostas dos experimentos.

Será verificado a viabilidade da utilização de escória de alto-forno como agregado graúdo nos concretos a partir dos seguintes ensaios mecânicos:

Variáveis de Resposta:

- Resistência à compressão axial NBR 5739 (ABNT, 2007);
- Resistência à tração por compressão diametral NBR 7222 (ABNT, 2018);
- Módulo de elasticidade NBR 8522-1 (ABNT, 2021).

Definida as variáveis de resposta, necessita-se definir as variáveis independentes ou de controle, as quais serão fixadas e mantidas durante todo o experimento. Serão adotadas as seguintes variáveis de controle:

- **Teores de substituição:** Os teores irão variar de 0%, 50%, 70% e 100% de substituição do AGN (seixo) pela EAF.
- **Idade do concreto (Ensaios mecânicos):** Serão adotados 28 e 63 dias, para o acompanhamento da evolução no tempo do desempenho mecânico do concreto.
- **Relação a/c:** De posse da curva de dosagem criada, buscou-se a resistência de 25 MPa aos 28 dias, com relação água/cimento de 0,64. A resistência mínima será baseada na classe de agressividade II, imposta pela NBR 6118 (ABNT, 2023).

Para cada betonada serão produzidos 12 corpos de prova com dimensões de 10 cm x 20 cm distribuídos da seguinte forma: 4 para os ensaios de resistência à compressão axial, 4 para os ensaios de módulo de elasticidade, 4 para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral. Serão realizadas 8 betonadas até o fim do experimento, sendo que o número final de corpos de prova irá totalizar em 96 (Tabela 5).

Tabela 5 – Resumo do Programa Experimental.

CONCRETOS	RELAÇÃO A/C	Resistência à compressão axial simples		Módulo de elasticidade		Resistência à tração por compressão diametral	
		Idade (dias)		Idade (dias)		Idade (dias)	
		28	63	28	63	28	63
REFERÊNCIA	0,64	4	4	4	4	4	4
50% DE ESCORIA DE ALTO-FORNO	0,64	4	4	4	4	4	4
70% DE ESCORIA DE ALTO-FORNO	0,64	4	4	4	4	4	4
100% DE ESCORIA DE ALTO-FORNO	0,64	4	4	4	4	4	4
Número de corpos de prova		32		32		32	
TOTAL: 96							

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste item estão descritas as características dos materiais que serão utilizados na produção dos concretos, os quais são provenientes do estado do Pará.

3.2.1. Aglomerante hidráulico

Será empregado o cimento Portland pozolânico (CP IV - 32), disponível comercialmente na cidade de Marabá.

3.2.2. Agregado miúdo

Será utilizado areia de origem quartzosa, provenientes de depósitos naturais do município de Marabá (PA), a areia passará pelo processo de secagem, com o auxílio de estufa, e será armazenada em tonéis. Para caracterização do agregado miúdo empregado nesta pesquisa serão realizados alguns ensaios listados na Tabela 6.

Tabela 6 – Métodos de caracterização do agregado miúdo

Ensaios a serem realizados	Norma
Dimensão máxima característica	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Módulo de finura	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Massa unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Massa específica	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Classificação	NBR 7211 (ABNT, 2022)

3.2.3. Agregado graúdo natural (seixo)

O agregado graúdo natural utilizado durante a confecção dos concretos será proveniente da cidade de Marabá (PA). O material será seco e armazenado em tonéis. Para caracterização do agregado graúdo empregado neste estudo serão realizados os ensaios listados na Tabela 7.

Tabela 7 – Métodos de caracterização do agregado graúdo convencional (seixo).

Ensaios a serem realizados	Norma
Dimensão máxima característica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa Unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Massa específica	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Absorção de água	NBR 16917 (ABNT, 2021)
Abrasão de forma	NBR 16974 (ABNT, 2022)
índice de forma	NBR 7809 (ABNT, 2019)
Classificação	NBR 7211 (ABNT, 2022)

3.2.4. Escória de alto-forno



Figura 11 – Mapa de Localização, Local da coleta, coordenada Latitude 5°24'51.41"S
Longitude 49° 4'39.86"O, área aproximada dos pátios para depósitos de escória 24.500 m²

Fonte: Própria

• Coleta de amostra

Do volume de escória gerado pela Siderúrgica Norte Brasil (SINOBRAS-PA), será coletada uma amostra segundo as prescrições da NBR 10007 (ABNT, 2004) amostragem de

resíduos sólidos, com cerca de 300 kg do resíduo industrial. Após a coleta, a amostra será acondicionada em recipientes plásticos, que será encaminhado para o Laboratório de Engenharia Civil. A escória utilizada nesta pesquisa será retirada desta amostra.

• Ensaios de caracterização

O resíduo industrial proveniente da região Sudeste do Pará será utilizado na confecção dos concretos com adição de escória. A caracterização do agregado empregado nesta pesquisa será realizada a partir dos ensaios listados na Tabela 8.

Tabela 8 – Métodos do agregado de escória de alto-forno.

Ensaios a serem realizados	Norma
Dimensão máxima característica	NBR NBR17054 (ABNT, 2022)
Módulo de finura	NBR NBR17054 (ABNT, 2022)
Massa Unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Massa específica	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Absorção de água	NBR 16917 (ABNT, 2021)
Abrasão Los Angeles	NBR 16974 (ABNT, 2022)
Índice de forma	NBR 7809 (ABNT, 2019)
Classificação	NBR 7211 (ABNT, 2022)

3.2.5. Aditivo

Empregara-se o aditivo plastificante SIKAMENT PF 175, à base de sais sulfonados e carboidratos em meio aquoso, densidade de $1,19 \pm 0,02$ kg/litro, PH $5,5 \pm 1,0$ com dosagem recomendada pelo fabricante de 0,30 % a 0,65 % sobre a massa de aglomerante (cimento Portland).

3.3. PRODUÇÃO DE CONCRETOS

O método de dosagem adotado para realização desse estudo será baseado nos procedimentos do IPT/EPUISP (HELENE e TERZIAN, 1992), que consiste em ajustar o teor ideal de argamassa estabelecendo, como parâmetro de controle. Nesse sentido, fixou-se o valor do abatimento para o desenvolvimento das misturas, que neste estudo foi mantido em 70 ± 20 mm. A partir disso, parte-se para obtenção do teor ideal de argamassa, adotando-se o traço principal de 1:5. O teor de argamassa foi de 61 % e a relação água/cimento de 0,64. Após ser executado o traço principal, partiu para confecção das misturas 1:3,5 e 1:6,5, definidos como traços auxiliares.

Tabela 9 - Traços auxiliares para execução da curva de dosagem.

Dosagem (traço)	a (%)	Traço					Propriedades			Consumo de Cimento (Kg/m ³)
		cim	a	p	m	a/c	H%	Slump (mm)	f _c (MPa)	
1:3,5	61	1	1,75	1,75	3,5	0,58	13%	52	32,48	442,39
1:5,0		1	2,66	2,34	5	0,67	11%	79	21,07	342,37
1:6,5		1	3,58	2,92	6,5	0,96	13%	64	10,49	264,47

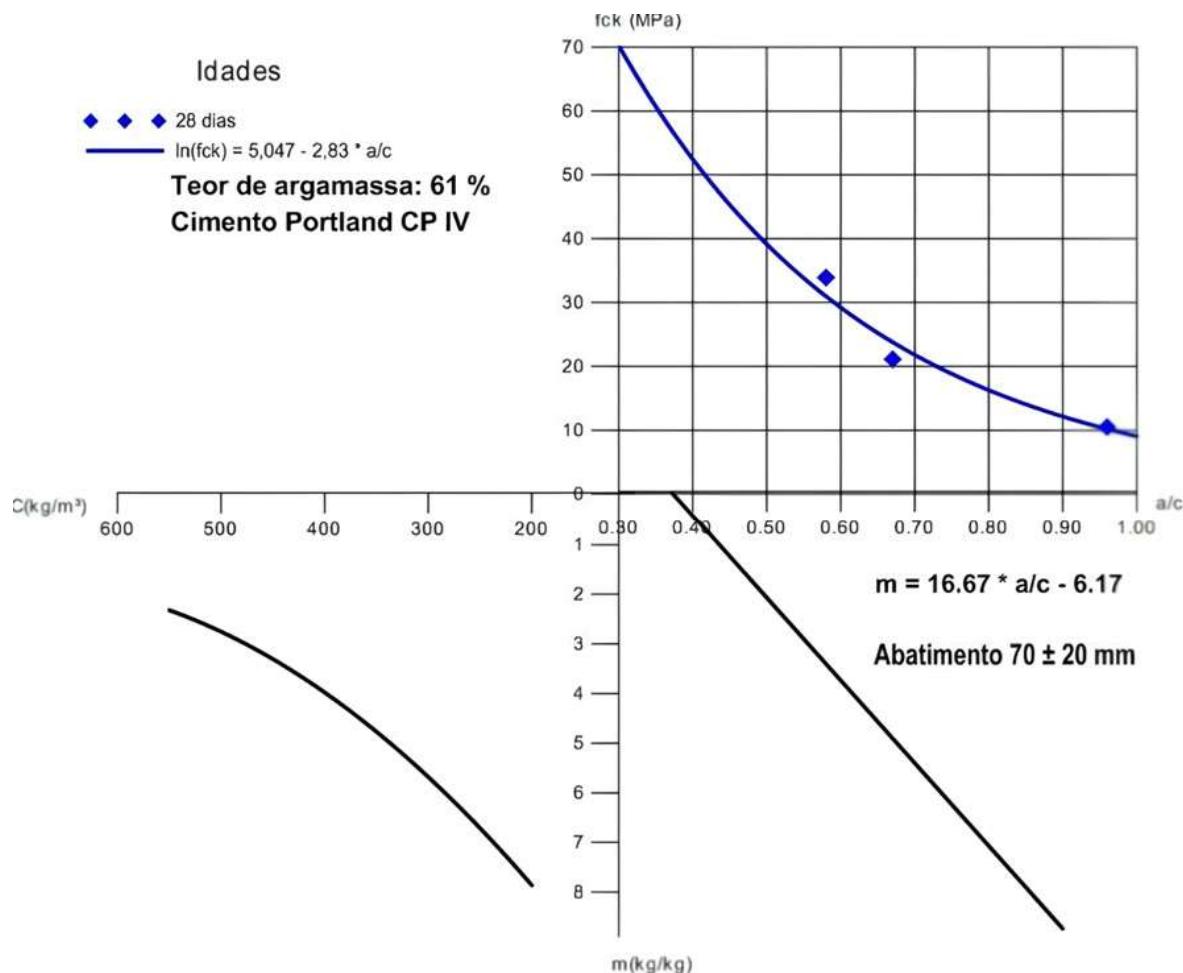


Figura 12 - Diagrama de dosagem.

Com essa curva de dosagem realizada, o traço do concreto convencional para faixa de resistência de 25 MPa será conforme (Tabela 10).

Tabela 10 – Traço de Referência

Traço de referência		
Cimento	Areia	Seixo
1	2,35	2,15

3.3.1. Produção, moldagem e armazenamento dos corpos de prova

Para a produção dos concretos será seguido o procedimento descrito no método IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992). A moldagem e o armazenamento dos corpos de prova seguirão as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015) – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova.

3.4. MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)

Por ter uma estrutura heterogênea e complexa, o concreto possui relações estrutura-propriedade que constituem uma fase importante para entendimento do seu comportamento. A aplicação de técnicas de microscopia eletrônica de varredura torna possível analisar a estrutura dos materiais constituintes até uma escala micrométrica e auxilia na explicação do comportamento mecânico do concreto. Esta técnica de observação de imagem através de microscopia eletrônica tem sido bastante utilizada em função da boa resolução obtida na análise das amostras, assim como facilita a observação e interpretação dos resultados.

As análises de MEV serão realizadas no microscópio eletrônico de varredura da marca LEO, modelo 1430 VP. As amostras serão retiradas de fragmentos dos corpos de prova provenientes do ensaio de resistência à compressão axial, estes serão fixados em um suporte de alumínio através da fita adesiva de carbono. Para metalização das amostras utilizara-se o metalizador EMITECH K550X, realizada a partir da interação entre um alvo de Au (Ouro) puro e íons de Ar (gás Argônio), a uma pressão de 2×10^{-1} mbar e corrente de 25 mA, durante 2 minutos e 30 segundos, resultando na deposição de uma película com espessura média de ± 15 nm sobre as amostras. Para este tipo de amostra, as imagens serão geradas por detecção de elétrons secundários, utilizando-se aceleração de voltagem de 20 kV, registradas de modo digital em alta resolução, no formato “tiff”. Todas as análises foram

realizadas no Laboratório de Engenharia Civil, localizado na Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA) através do microscópio eletrônico de varredura.

4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização, desempenho mecânico das argamassas e dos concretos, feitos e indicados no programa experimental estabelecido no capítulo 3.

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Aglomerante Hidráulico

Foi utilizado na produção dos concretos o cimento Portland tipo CP IV 32, distribuído e vendido na região. As tabelas 11, 12 e 13 demonstram os ensaios físicos, químicos e mecânicos do cimento utilizado.

Tabela 11 – Características físicas do cimento Portland do tipo CP IV 32

ENSAIOS FÍSICOS				
Determinação	Norma	Unid.	Especif.	Valores obtidos
Ret. # 200 (0,075 mm)	NBR 12826	%	Max. 8,0	0,9
Ret. # 325 (0,044 mm)	NBR 12826	%	-	7,4
Área específica	NBR 16372	m ² /kg	-	619
Massa específica	NBR NM 23	g/cm ³	-	2,9
Cons. normal	NBR NM 43	%	-	33,4
Tempo de início de pega	NBR NM 65	hora	Min. 1,0	2:45
Tempo de fim de pega	NBR NM 65	hora	Max. 2,0	4:25
Expansibilidade quente	NBR NM 11582	mm	Max. 5,0	1,00
Expansibilidade frio	NBR NM 11582	mm	-	-

*Dados fornecidos pela fabricante

Tabela 12 – Características químicas do cimento Portland do tipo CP IV 32

ENSAIOS QUÍMICOS				
Determinação	Norma	Unid.	Especif.	Valores obtidos
Perda ao fogo	NBR NM 18	%	-	6,68
Resíduo insolúvel	NBR NM 15	%	-	18,46
SiO ₂	NBR NM 14	%	-	26,02
Al ₂ O ₃	NBR NM 14	%	-	10,92
Fe ₂ O ₃	NBR NM 14	%	-	3,06
CaO	NBR NM 14	%	-	47,8
MgO	NBR NM 14	%	Max. 6,5	2,51
SO ₃	NBR NM 16	%	Max. 4,0	2,50
Na ₂ O	NBR NM 17	%	-	-
K ₂ O	NBR NM 17	%	-	-

*Dados fornecidos pela fabricante

Tabela 13 – Características mecânicas do cimento Portland do tipo CP IV 32

ENSAIOS MECÂNICOS – Resistência à compressão (MPa) – NBR 7215				
Idade	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Especif.	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
Obtido	9,1	23,1	36,8	45,8
Desvio	1,1	0,9	0,8	0,9

*Dados fornecidos pela fabricante

4.1.2 Agregado Miúdo

Atendendo os requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2022) o agregado miúdo foi utilizado na produção dos concretos. A seguir a tabela 14 expressa a caracterização física da amostra e a figura 11 indica a curva granulométrica do agregado miúdo com os limites das zonas granulométricas.

Tabela 14 – Características físicas do agregado miúdo

Abertura das peneiras (mm)	Amostras		NBR 7211 (ABNT,2022)			
	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)	Retida Acumulada (% em massa)			
			Limites inferiores		Limites superiores	
			Zona Util.	Zona Ótima	Zona Util.	Zona Ótima
4,75	0,0	0,0	0	0	5	10
2,58	0,1	0,1	0	10	20	25
1,18	1,2	1,3	5	20	30	50
0,6	6,8	8,1	15	35	55	70
0,3	46,4	54,4	50	65	85	95
0,15	36,2	90,7	85	90	95	100
0,075	4,9	95,5	100	100	100	100
Fundo	4,1	99,6	-	-	-	-
Módulo de Finura		1,55	1,55 – 2,2	2,2	2,9 – 3,5	2,9
Dimensão máxima (mm)		1,18				
Massa específica (g/cm³)		2,63				
Massa Unitária (g/cm³)		1,56				

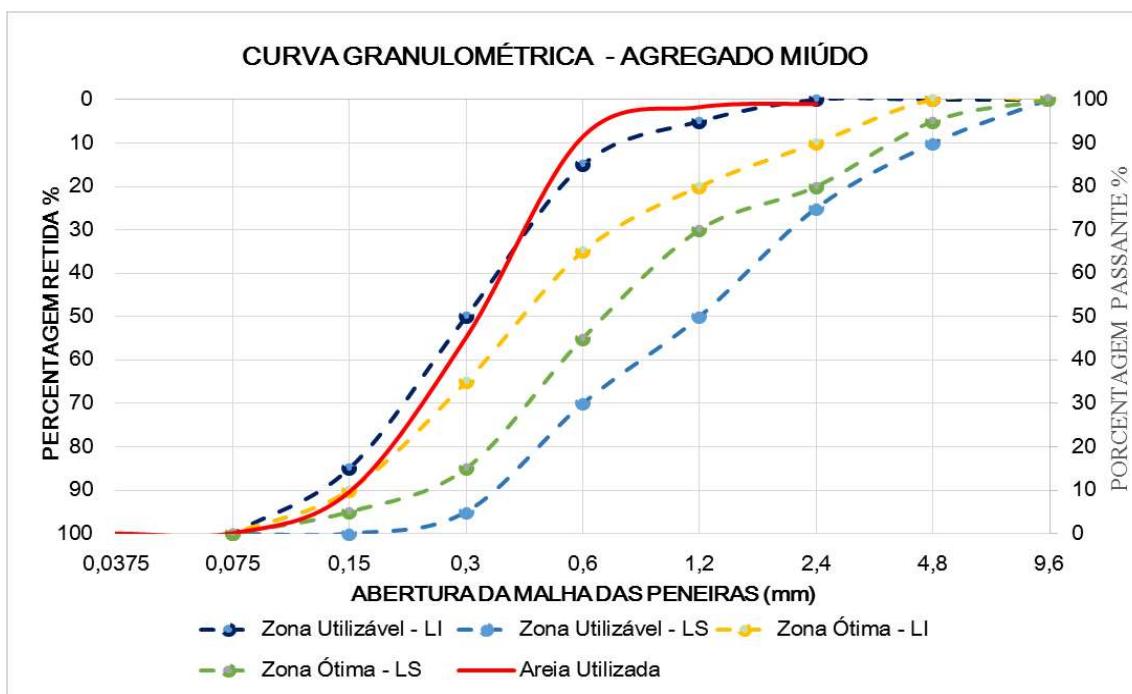


Figura 13 – Curva granulométrica do agregado miúdo e limites da NBR 7211 (ABNT, 2022).

Conforme os valores de resultados obtidos e analisados o agregado miúdo está na zona utilizável do limite inferior.

4.1.3 Agregado Graúdo natural (seixo)

Foi utilizado na produção dos concretos o AGN (seixo) atendendo aos requisitos descritos na NBR 7211(ABNT, 2022). É descrito na tabela 15 os resultados obtidos na caracterização do agregado graúdo natural (AGN) com os respectivos limites das zonas granulométricas.

Tabela 15 – Características físicas do agregado graúdo

Abertura das peneiras (mm)	Amostras		NBR 7211 (ABNT,2022)				
	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)	Retida Acumulada (% em massa)				
			Zona Granulométrica d/D ^a				
			4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/ 75
38	0,0	0,0	-	-	-	5 - 30	90- 100
25	1,0	1,0	2 - 15 ^b	0 - 5	5 - 25 ^b	87-100	-
19	21,6	22,6	-	2 - 15 ^b	65 ^b - 95	95-100	-
12,5	67,1	89,7	0 - 5	40 ^b - 65 ^b	92 - 100	-	-
9,5	5,3	95,0	2 - 15 ^b	80 ^b - 100	95 - 100	-	-
4,75	4,8	99,8	80 ^b - 100	95 - 100	95	100	100
2,58	0,2	100,0	-	-	-	-	-
1,18	0,0	100,0	-	-	-	-	-
0,6	0,0	100,0	-	-	-	-	-
0,3	0,0	100,0	-	-	-	-	-
0,15	0,0	100,0	-	-	-	-	-
Módulo de Finura	7,17	a – Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo					
Dimensão máxima (mm)	25	b – Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo 5% em apenas um dos limites marcados com 2					
Massa específica (g/cm³)	2,63						
Massa Unitária (g/cm³)	1,76						
Absorção de água (%)	2,66						
Abrasão Los Angeles(%)	49,7						
Índice de forma	2,16						

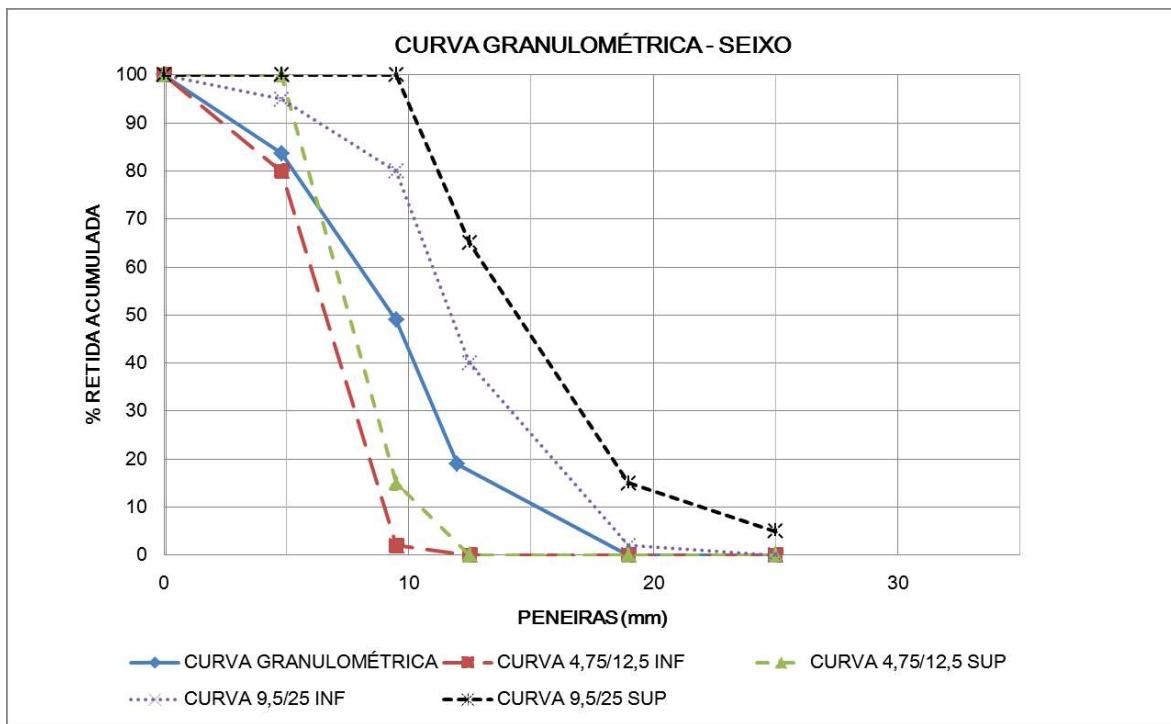


Figura 14 - Curva granulométrica do AGN, e limites da NBR NM 7211 (ABNT, 2022).

O seixo analisado está dentro da faixa de graduação 4,75/12,5, com isso se enquadra nos requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2022) e também apresenta um desgaste superficial inferior a 50% de perda de massa e o índice de forma inferior a 3,0 como pode ser observado na figura 12.

4.1.4. Escória de alto-forno

A etapas a seguir conforme fluxograma da figura 13 descrevem as etapas técnicas utilizadas para aplicação da escória de alto forno na produção dos concretos:



Figura 15 - Fluxograma de etapas técnicas para utilização da EAF

1º Passo: Obtenção da amostra do material para análise.

A amostra de EAF (Escória de Alto Forno) foi coletada Siderúrgica Norte Brasil S.A. (SINOBRAS) em Marabá PA segundo as recomendações NBR 10007 (ABNT, 2004) Amostragem de resíduos sólidos.

2º Passo: Moagem como forma de beneficiamento de EAF

Para determinação do tipo de estrutura cristalina e composição química do resíduo EAF, foi utilizado duas técnicas de ensaios, a Difração de raios – X e Fluorescência de raios – X. Para executar o Ensaio de Difração de Raios-X, a EAF precisou passar por um beneficiamento por meio de moagem, realizado no moinho de bolas da marca EMIC com velocidade de 12 RPM por 3 horas, até que apresentasse granulometria que se assemelha a do cimento Portland. Em seguida o material foi condicionado em recipiente específico utilizado no equipamento para análise. A Difração de Raios-X é uma combinação de duas ou mais ondas, o raios-x representam uma forma de radiação eletromagnética com comprimentos de ondas pequenos, fazendo com que um feixe de raios-x incide sobre o material sólido e que uma fração desse feixe será dispersa em várias direções com os elétrons que estão associados aos átomos presente na trajetória do feixe. A interferência construtiva deverá acontecer quando a diferença de caminho for múltiplo inteiro n do comprimento de onda da radiação. Esse fenômeno é conhecido como difração de raios X, e é descrito pela lei de Bragg. As condições instrumentais utilizadas foram as seguintes: varredura de 3 a 75° em 2 Θ, voltagem de 40 kV, corrente de 30 mA, tamanho do passo de 0,02° em 2Θ, tempo/passo 82 s, fenda divergente de ¼° e ante espalhamento de ½°, máscara de 10 mm e movimentação circular da amostra com frequência de 1 rotação/s. A aquisição de dados foi feita através do software X’Pert Data Collector, e o tratamento dos dados com o software X’Pert HighScore.

Tendo como resultado um difratograma obtido, que é um gráfico do ângulo de espalhamento (2Θ) versus intensidade dos picos de incidência, (Figura 14).

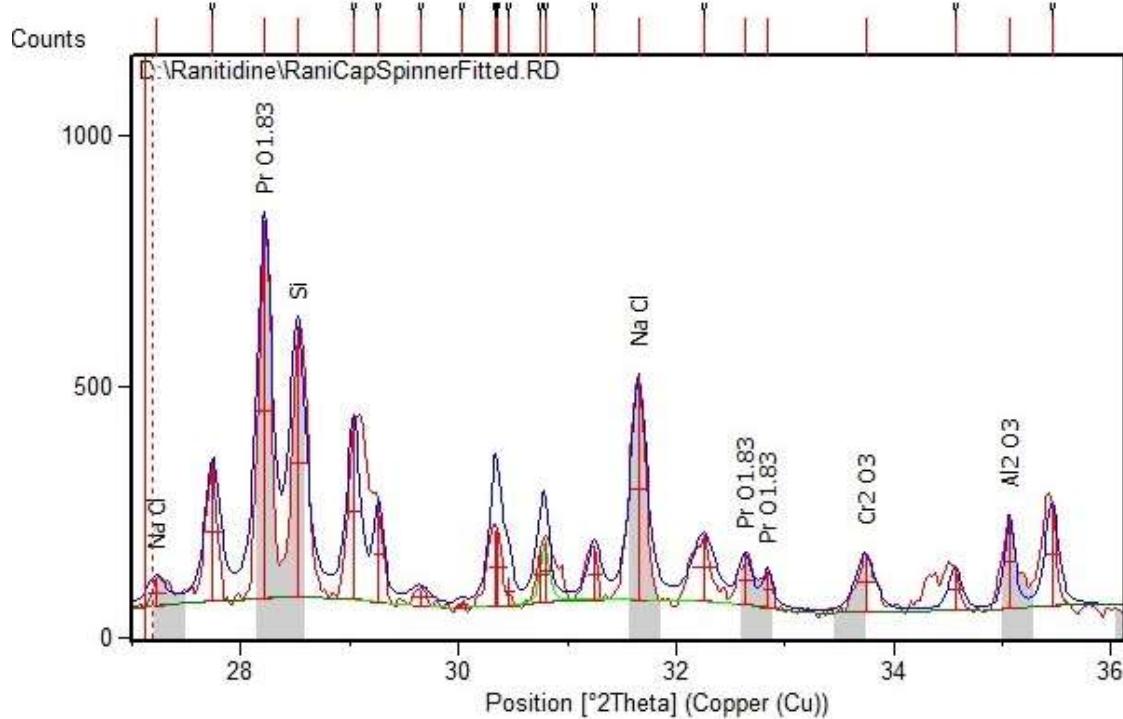


Figura 16 - Difratograma de Raios-X da escória de alto-forno.

Pode-se analisar a figura 14, com a presença de inúmeros picos de difração que contribuem com a ideia de que, em virtude do resíduo industrial ser depositado ao ar livre para o seu resfriamento, gera associações entre os átomos segundo as próprias afinidades, em cristais, fato denominado cristalização. Desta forma, a escória irá se apresentar como um produto cristalizado, que depois de britado, apresentará granulometria muito semelhante a do agregado natural. Além do mais se observa a predominância do mineral Calcita, seguido da Quartz e da Calcita, ambos em menor quantidade.

A tabela (Tabela 16) demonstra a quantidade de cada componente químico da amostra analisada, foi realizada em um Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X, modelo Axios Mineral, proveniente da PANalytical, com tubo de raios-X cerâmico, e potência de 2,4 kW. As determinações foram geradas no programa IQ+ Semiquant. A consolidação dos dados foi realizada com o software SuperQ Manager, e o tratamento dos dados com o software IQ+.

Tabela 16 - Análise química das amostras de escória de alto-forno

Fluorescência (Escória de alto-forno)		
Composição	Unid.	Valores obtidos
Al ₂ O ₃	%	16,68
CaO	%	31,46
Fe ₂ O ₃	%	0,91
K ₂ O	%	1,17
MgO	%	2,75
MnO	%	5,15
Na ₂ O	%	0,39
P ₂ O ₅	%	0,07
SO ₃	%	0,33
SiO ₂	%	40,16
TiO ₂	%	0,92

Considerando os valores obtidos deste ensaio a amostra analisada pode ser classificada como escória ácida, pois a razão CaO/SiO₂ foi inferior a 1, fato esse que segundo MASSUCATO (2005) inviabiliza sua utilização como adição mineral, reforçando o estudo de sua possível aplicação como agregado para concreto.

Fase 3: Avaliação das propriedades mecânicas das argamassas

Para sustentar a hipótese de que o EAF analisado não pode ser utilizado como material pozolânico para cimento Portland, procurou-se avaliar as propriedades mecânicas de argamassas confeccionadas com e sem escória.

- Avaliação da atividade pozolânica com cal:

A atividade pozolânica é avaliada com base nas propriedades mecânicas de argamassas elaboradas com mistura (proporções) e consistência padronizadas conforme NBR 5751 (ABNT, 2015).

Tabela 17 – Caracterização dos materiais

Materiais	Massa Específica (g/cm³)
EAF (Pozolânico)	3,06
Hidróxido de cálcio (Ca(OH) ₂)	2,58
Água (H ₂ O)	1,00
Areia normal	2,56

A quantidade de água indicada na Tabela 18 foi suficiente para atingir uma consistência de 230 mm. A quantidade de areia indicada na tabela abaixo corresponde à quantidade necessária para cada fração de grão utilizada na mistura de argamassa.

Tabela 18 – Quantidade em gramas dos materiais utilizados

Materiais	Quantidade (g)
EAF	246,7
Hidróxido de cálcio (Ca(OH) ₂)	104,00
Água (H ₂ O)	187,22
Areia normal	234,00

A Figura 15 apresenta a resistência média à compressão dos corpos de prova ensaiados e a resistência mínima exigida pela norma NBR 12653 (ABNT, 2014).

- Atividade pozolânica com cimento portland

A determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland foi realizada conforme a ASTM C 618. Este índice é determinado pela relação entre a resistência média à compressão de corpos de prova, moldado com cimento e material pozolânico, pela resistência média à compressão dos corpos de prova moldado com cimento. Uma parte do cimento (aproximadamente 35 %) é substituída pelo material pozolânico (sendo considerada a massa específica de ambos).



Figura 17 - Avaliação da atividade pozolânica com cal da escória de alto-forno.

Os resultados obtidos mostram que a amostra ensaiada atingiu cerca de 30% da resistência mínima exigida pela NBR 12653 (ABNT, 2014).

A Tabela 19 mostra que o desempenho pozolânico da escória com cimento Portland testada pode ser demonstrado pela resistência de amostras de argamassa preparadas com relação água/cimento de 0,30, consistência entre 180 e 255,5 mm e 35% de substituto de cimento para a escória produzido.

Tabela 19 - Resistência à compressão das argamassas após 7 dias.

Argamassa	Substituição de Escória	a/c	Consistência (mm)	Valores obtidos
Referência	0	0,3	180	23,95
Escória	35	0,3	255,5	8,93

O índice de atividade pozolânica com adição de cimento Portland é de cerca de 37%. Os resultados obtidos (Figura 16) mostram que as argamassas misturadas com escória de alto forno obtiveram uma redução significativa de resistência em comparação com as argamassas de referência. Esse fator corrobora a hipótese inicial de que o EAF testada não possui as propriedades esperadas para ser utilizado como material pozolânico para cimento Portland.

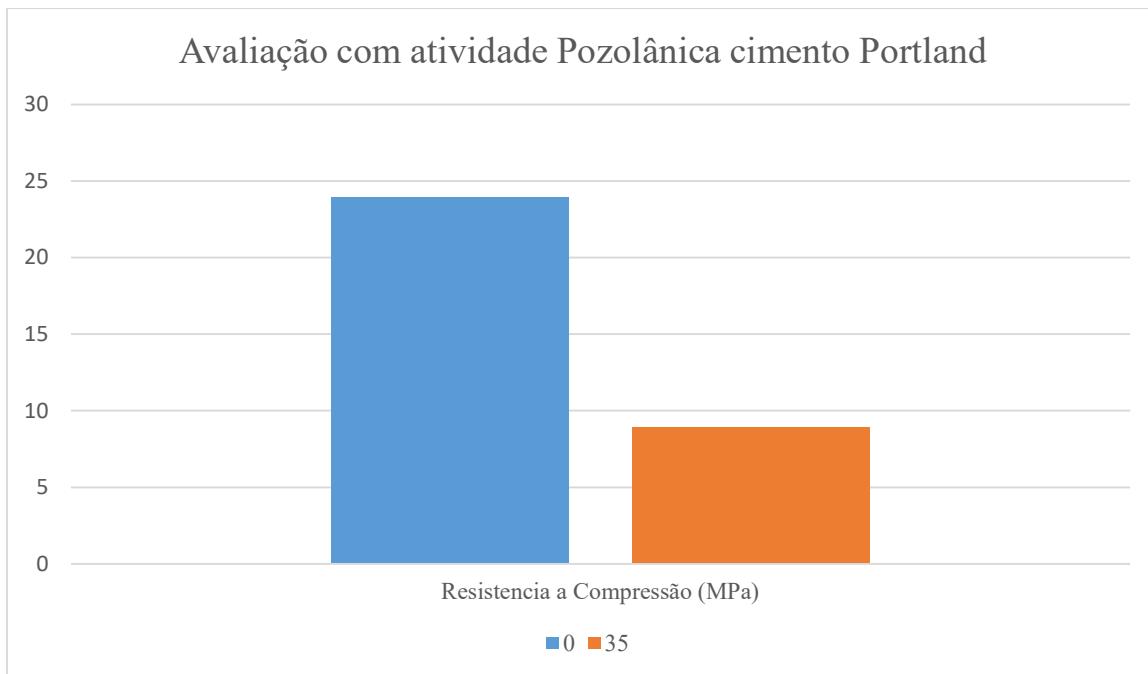


Figura 18: Avaliação da atividade pozolânica com cimento Portland.

Fase 4: Caracterização e composição granulométrica da EAF

O resíduo industrial utilizado no estudo foi a escória de alto forno acumulada durante a produção de ferro gusa. Os resultados dos ensaios de caracterização e a composição granulométrica são apresentados na Tabela 20 e na Figura 17 a curva granulométrica da EAF é comparada com os limites das zonas granulométricas.

Tabela 20 - Composição Granulométrica

Abertura das peneiras (mm)	Amostras	
	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
38	0,0	0,0
25	1,7	1,7
19	16,9	18,6
12,5	57,1	75,7
9,5	15,5	91,2
4,75	8,3	99,5
2,58	0,5	100,0
1,18	0,0	100,0
0,6	0,0	100,0
0,3	0,0	100,0
0,15	0,0	100,0
Módulo de Finura		7,57
Dimensão máxima (mm)		25
Massa específica (g/cm³)		3,06
Massa Unitária (g/cm³)		1,61
Absorção de água (%)		3,01
Abrasão Los Angeles(%)		31,1
Índice de forma		2,65

A massa específica da escória é maior que a massa específica do AGN, que está relacionada aos elementos químicos contidos na composição química dos resíduos industriais. A absorção de água do EAF foi ligeiramente superior à do AGN e esta diferença na absorção não afetou a quantidade de água de mistura utilizada na mistura. O desgaste superficial da escória ficou bem abaixo do máximo especificado na norma NBR 7211 (ABNT 2022). A escória apresentava consistência grosseira e formato irregular, e as proporções permaneciam dentro dos limites legais. Ressalta-se que a forma do EAF está diretamente relacionada ao tipo de processamento a que foi submetido (trituração). A Escória de Alto Forno analisada atende aos requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2022) por se enquadrar na faixa da escala 4,75/12,5 (Figura 17).

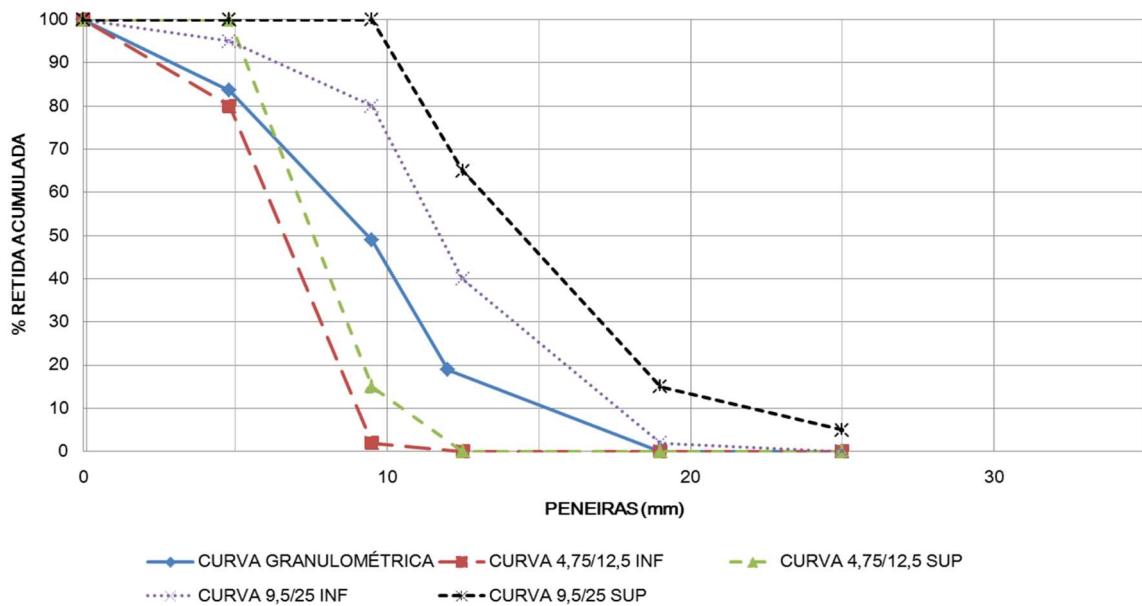


Figura 19- Curva granulométrica da EAF, e limites da NBR 7211 (ABNT, 2022).

4.1.5. Aditivo

O aditivo plastificante SIKAMENT PF 175 à base de sais sulfonados e carboidratos sendo uma combinação de dispersantes orgânicos em base aquosa com densidade de $1,19 \pm 0,02$ kg/litro, pH $5,5 \pm 1,0$ foi adicionado na dosagem recomendada pelo fabricante entre 0,30 e 1,20% calculada sobre o peso do aglomerante (Cimento Portland).

4.2. Produção de concretos

O método de dosagem para preparação das misturas de ensaio foi baseado ao método desenvolvido pelo IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1995). Neste método, o valor de abatimento para realização das misturas, neste estudo foi mantido no nível de 70 ± 20 mm. A partir deste ponto começa a proporção de argamassa ideal para os materiais utilizados, partindo de uma mistura principal de 1:5. O teor ideal de argamassa foi de 61 % com relação água/cimento de 0,64. Após a criação da mistura principal, foram preparadas as misturas 1:3,5 e 1:6,5, chamadas misturas auxiliares, necessárias para criar a curva de dosagem. Aos 28 dias de idade, os corpos de prova foram ensaiados quanto à resistência à compressão axial. Foi utilizada uma prensa EMIC manual com capacidade de elevação de 100 toneladas e velocidade de carregamento controlada manualmente. Utilizando os resultados disponíveis na Tabela 21, foi construída uma curva de dosagem conforme mostrado na Figura 18.

Tabela 21 - Traços auxiliares para execução da curva de dosagem.

Dosagem (traço)	α (%)	Traço					Propriedades			Consumo de cimento (kg/m³)
		cim	a	p	m	a/c	H (%)	Slump (mm)	Fc (MPa)	
1:3,5	61	1	1,75	1,75	3,5	0,58	13%	55	31,13	442,39
1:5,0		1	2,66	2,34	5	0,67	11%	73	20,52	342,37
1:6,5		1	3,58	2,92	6,5	0,96	13%	67	11,15	264,47

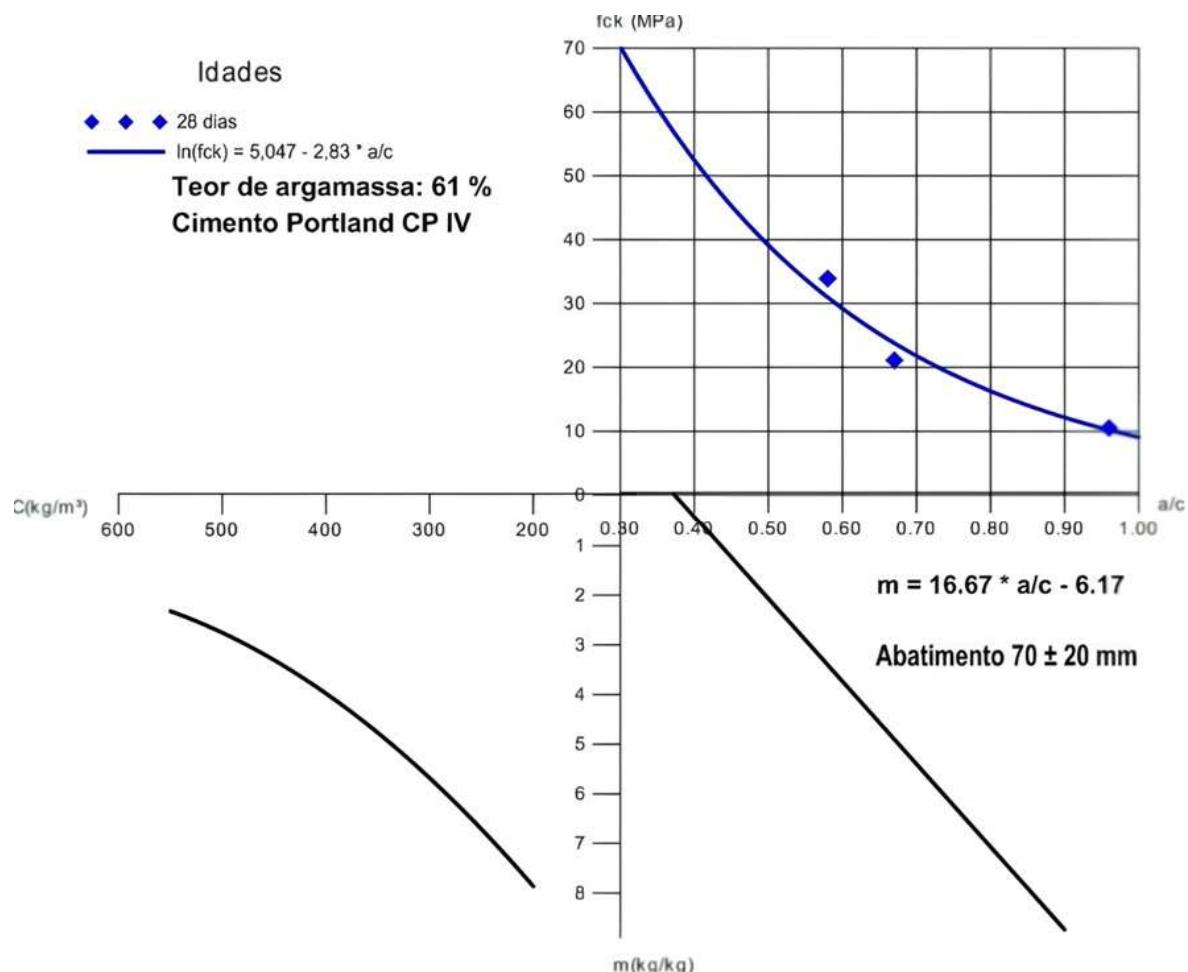


Figura 20 - Diagrama de dosagem.

Conforme descrito na Tabela (22). Determinou-se o traço para o concreto convencional com resistência de 25MPa de acordo com o resultado da curva de dosagem.

Tabela 22 – Traço referência determinado, bem como o consumo estimado para moldagem de 9 corpos de prova cilíndricos de (\varnothing 10 x 20) cm.

Traço			Consumo (kg)			Massa Específica (g/cm ³)
Cimento	Areia	Seixo	Cimento	Areia	Seixo	Seixo
1	2,35	2,15	8,48	16,40	15,01	2,63

Com base nas misturas experimentais definiram-se os traços com 50 %, 70 % e 100 % com escória de alto-forno, para realização do estudo, mantendo-se constante a relação água-cimento (0,64), de acordo com a Tabela 23.

Tabela 23 - Caracterização do AGN e da EAF, bem como o consumo estimado para moldagem de 9 corpos de prova cilíndricos de (\varnothing 10 x 20) cm.

Concreto com 50 % de escória de alto-forno								
Traço			Consumo (Kg)				Massa Específica (g/cm ³)	
Cimento	Areia	Seixo	Cimento	Areia	Seixo	Escória	2,63	3,06
1	2,35	2,15	8,48	16,40	7,50	7,50	2,63	3,06
Concreto com 70 % de escória de alto-forno								
Traço			Consumo (Kg)				Massa Específica (g/cm ³)	
Cimento	Areia	Seixo	Cimento	Areia	Seixo	Escória	2,63	3,06
1	2,35	2,15	8,48	16,40	4,50	10,51	2,63	3,06
Concreto com 100 % de escória de alto-forno								
Traço			Consumo (Kg)				Massa Específica (g/cm ³)	
Cimento	Areia	Seixo	Cimento	Areia	Escória	Escória	2,63	3,06
1	2,35	2,15	8,48	16,40	15,01	15,01	2,63	3,06

Para a realização da mistura dos concretos, os materiais especificados nos traços da tabela 23 utilizaram o tempo de mistura fixado em aproximadamente 7 minutos, o que corresponde ao tempo médio necessário para que o concreto atinja a consistência especificada de 70 ± 20 mm. Para cada traço de substituição do seixo pela escória de alto-forno, foi adicionado mais superplastificante para obter consistências semelhantes, conforme (Figura 21).

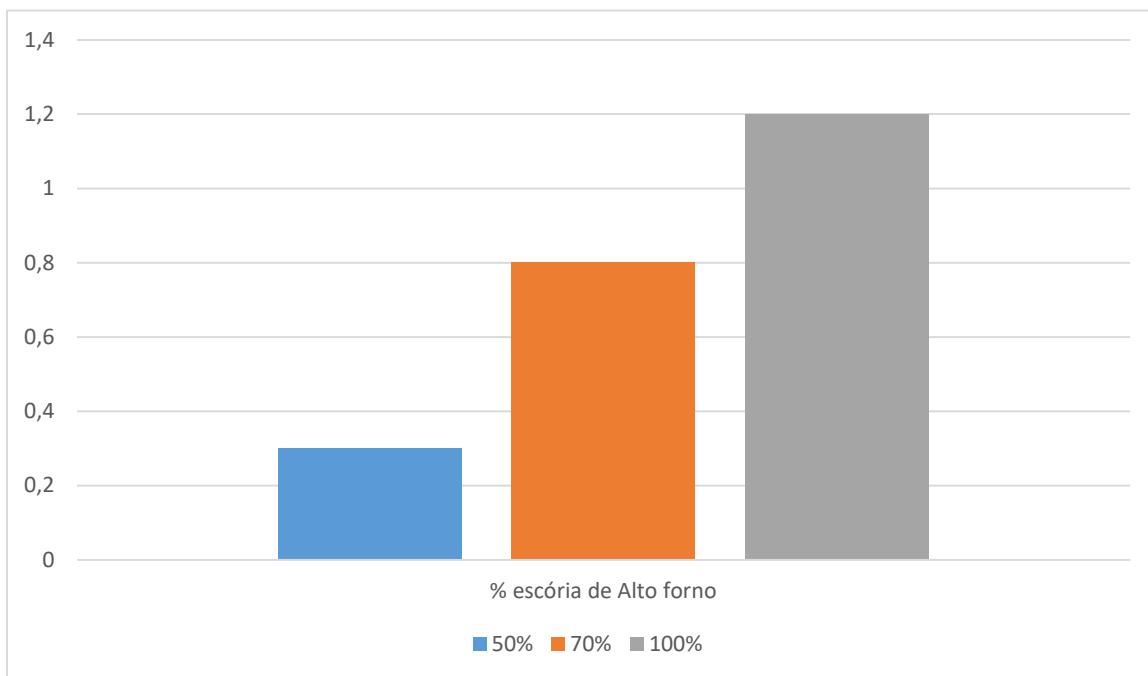


Figura 21 - Quantidade de aditivo (%) em relação a massa de cimento utilizado

Definiu-se a ordem de mistura sendo: primeiro adicionou-se parte da água, e em seguida o AGN (seixo), logo foram lançados o agregado miúdo, cimento, agregado graúdo de EAF, o restante da água e por último o aditivo. Utilizou-se o procedimento de mistura citado por (HELENE; TERZIAN, 1995), portanto, após o procedimento de mistura de 2,5 minutos, a betoneira foi parada e os materiais aderidos à superfície interna da betoneira foram manipulados com uma espátula para incorporá-los à mistura e garantir a homogeneidade do concreto.

De acordo com as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015), após a mistura completa o concreto era adicionado e adensado manualmente com haste de aço nos moldes com dimensões de 10 x 20 cm. Terminado o adensamento do concreto nas fôrmas cilíndricas, realizou-se o acabamento superficial, em seguida foram colocadas em superfície plana. A

desforma foi realizada no dia seguinte à dosagem, posteriormente, os corpos de prova foram colocados imersos em tanques com água para continuar o regime de cura até a idade de controle.



Figura 22 – Ensaio no estado fresco (slump test)

Fonte: Própria (2022)



Figura 23 – Moldagem dos Corpos de Prova

Fonte: Própria (2022)



Figura 24 – Cura Úmida

Fonte: Própria (2022)



Figura 25 – Ensaio Compressão Axial, Prensa Manual

Fonte: Própria (2022)



Figura 26 – Ensaio de Tração por compressão diametral

Fonte: Própria (2022)

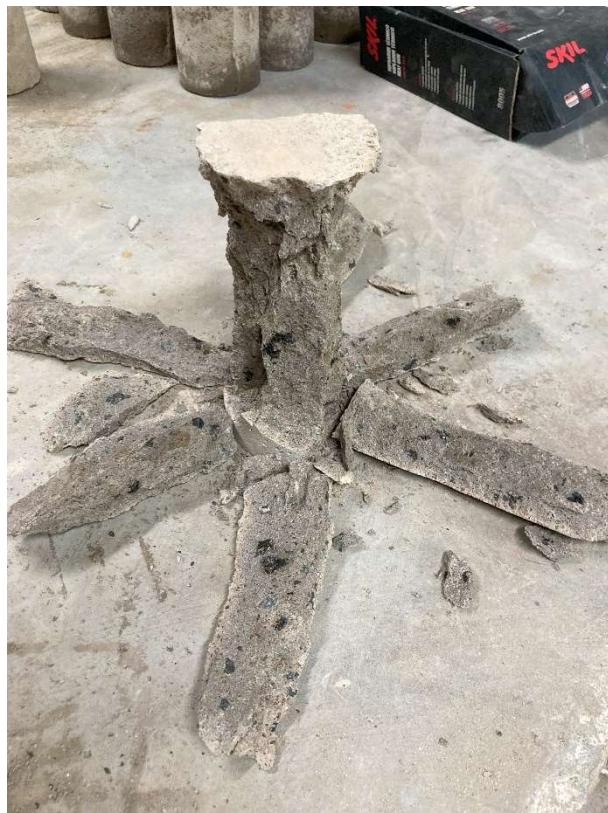


Figura 27 – Rompimento, ensaio de compressão axial

Fonte: Própria (2022)

4.3. Analises em microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Foram analisadas amostras de concreto com e sem adição de EAF na forma de agregados graúdos. A varredura foi realizada primeiro em um nível de observação inferior para revelar a aparência das rachaduras a olho nu. A varredura foi então realizada aumentando o grau de observação através da ampliação da lente. A Figura 20 mostra a diferença entre AGN (seixo) e a matriz de cimento. Além da presença de ar na mistura.

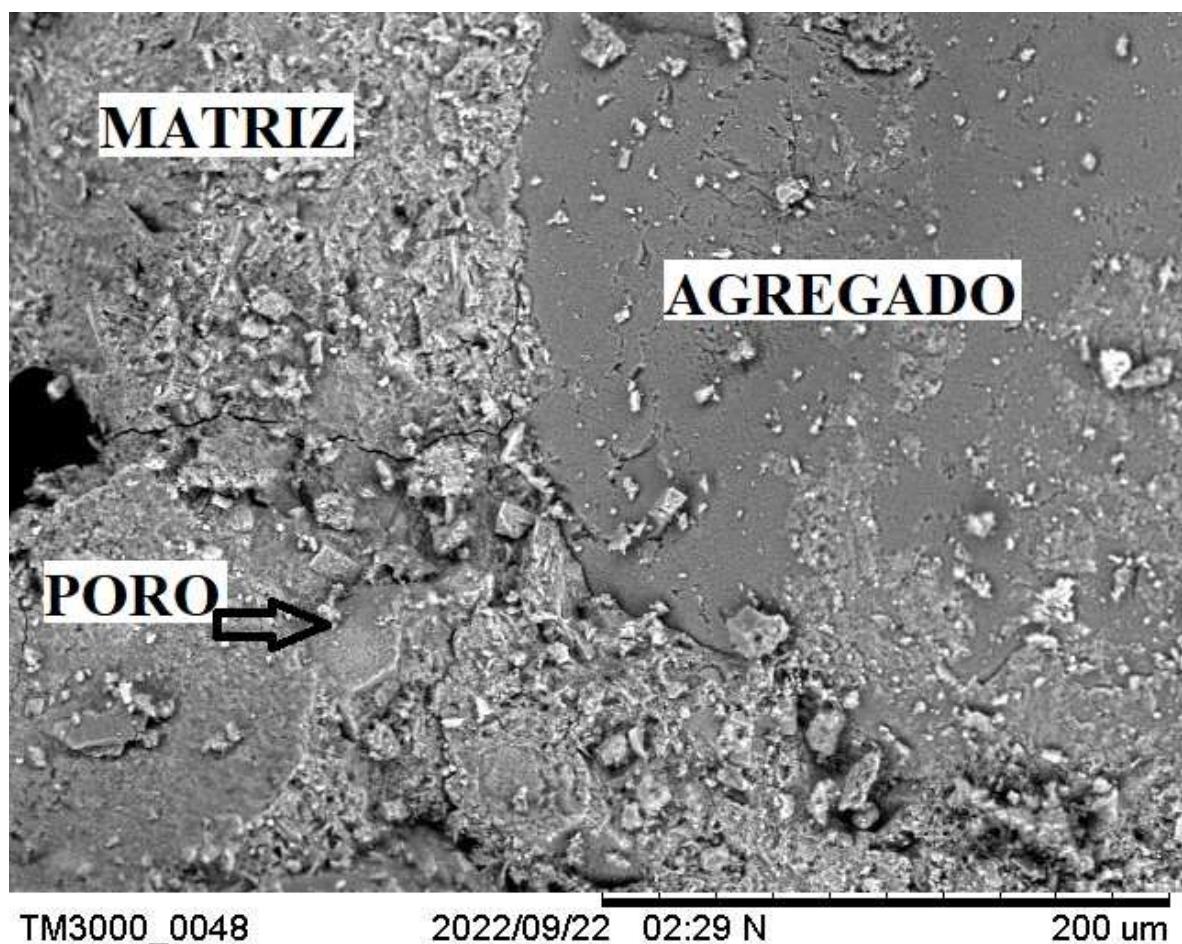


Figura 28 - Interface agregado-matriz do concreto de referência.

Na Figura 21 é possível examinar mais de perto a área de contato entre agregado e pasta. O contorno da zona de contato entre os agregados graúdos e a pasta está sublinhado em vermelho.



Figura 29 - Vista ampliada da interface pasta-agregado do concreto de referência.

Na Figura 22, microfissuras em áreas onde há vazios tendem a buscar um caminho preferencial dentro dos poros, uma vez que esta é uma área de alta concentração de tensões. De acordo Barbirato (1999), o furo atua como um concentrador de tensões, fazendo com que o material entre em colapso no final do entalhe, vencendo assim a resistência do material.

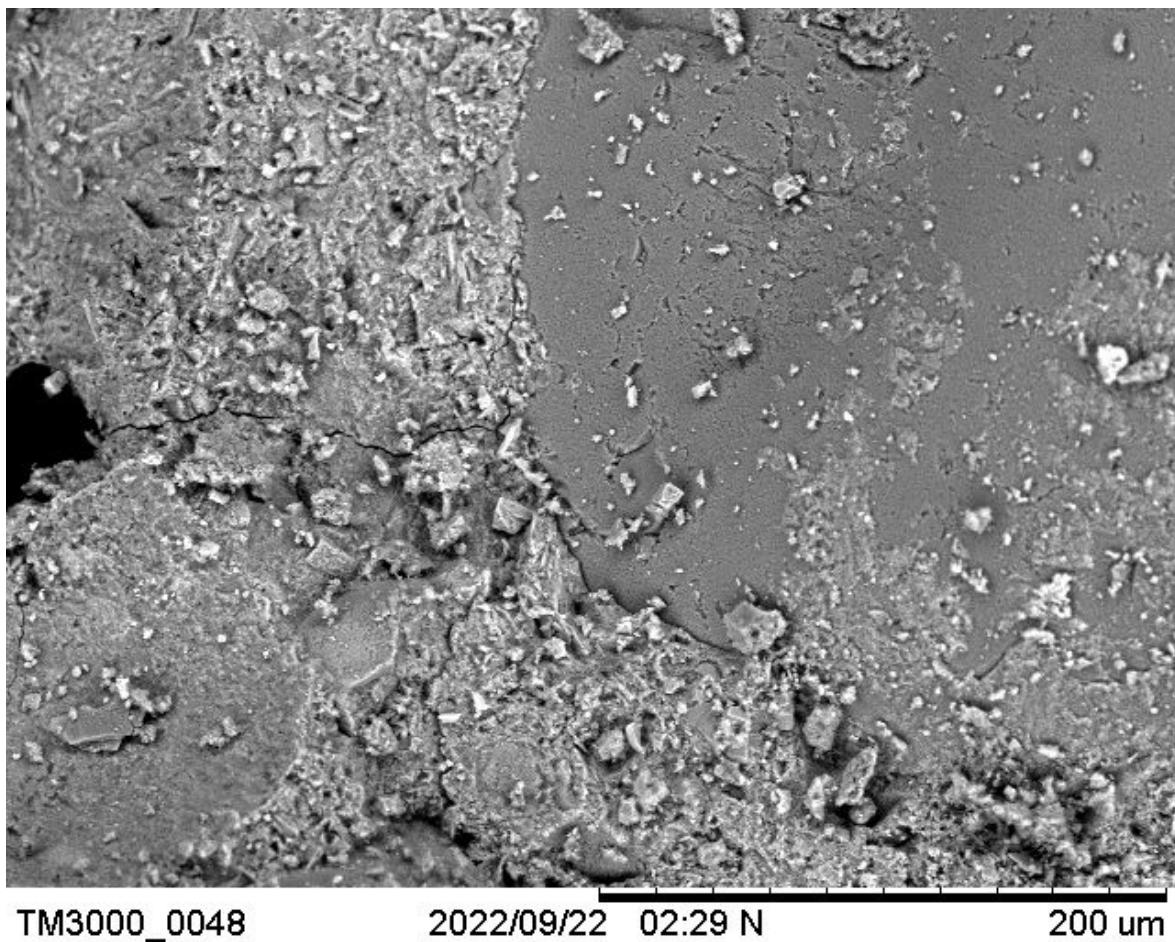


Figura 30 - Caminho da microfissura na pasta até o poro, funcionando como concentrador de tensões no concreto convencional.

A Figura 23 mostra que com 50% o agregado da escória de alto forno possui formato irregular e assim permite melhor ancoragem mecânica entre o resíduo industrial e a matriz cimentícia. Este fato está diretamente relacionado à melhoria nas propriedades mecânicas do concreto contendo EAF em relação ao concreto convencional.

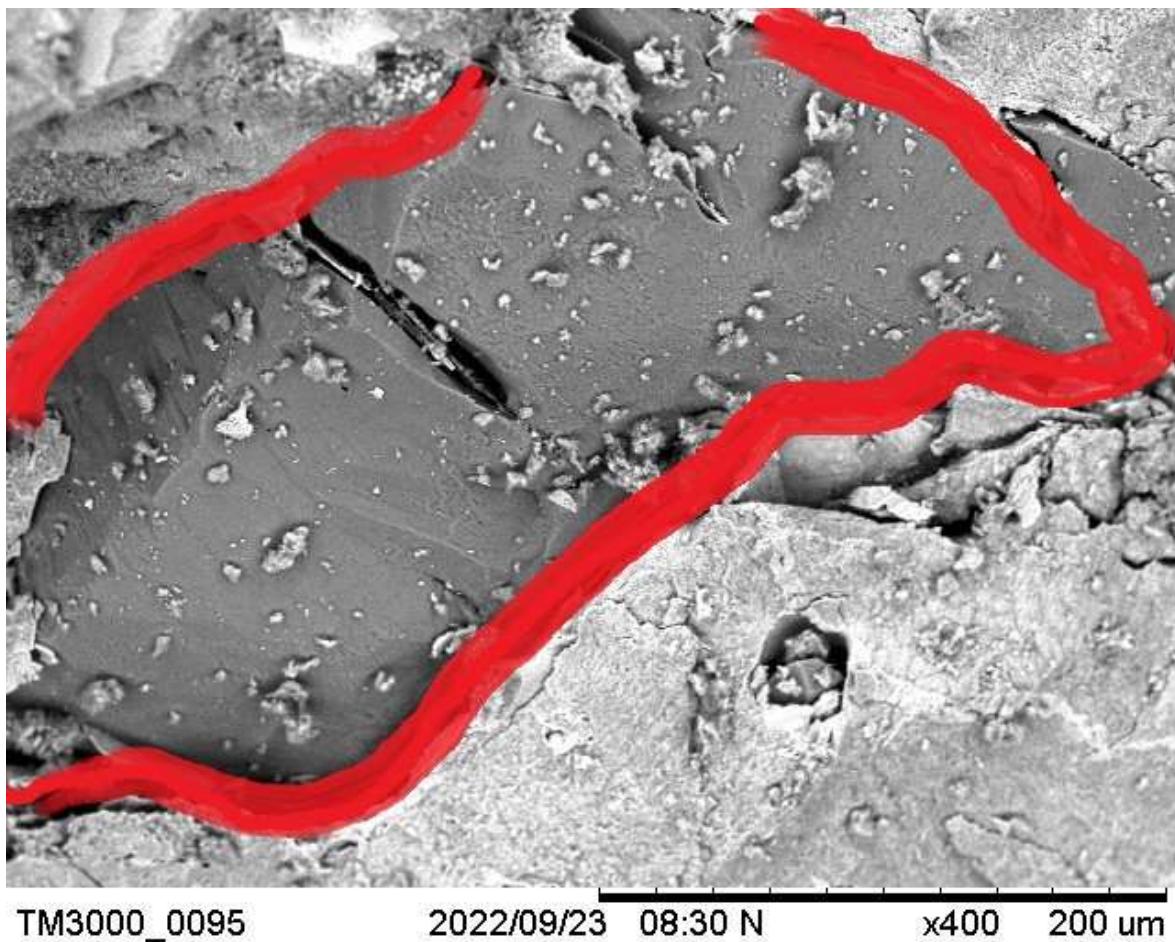


Figura 31 - Vista do formato irregular da EAF, melhorando a aderência entre o agregado e a matriz.

Na Figura 24, a substituição de 70% de EAF, demonstra-se o aparecimento de fissuras principalmente na área dos agregados graúdos, indicando maior densidade na área de contato entre o agregado e a matriz. Observa-se também um número significativo de estruturas fibrosas de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), as quais são em grande parte responsáveis pelas propriedades mecânicas da argamassa (maior densidade da matriz cimentícia). Da mesma forma, existem numerosos cristais prismáticos de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) perpendiculares ao agregado, que contribuem para a formação de fissuras por criarem uma superfície de fratura privilegiada e contribuem para a resistência da pasta devido à sua comparação com Superfície reduzida C-S-H.

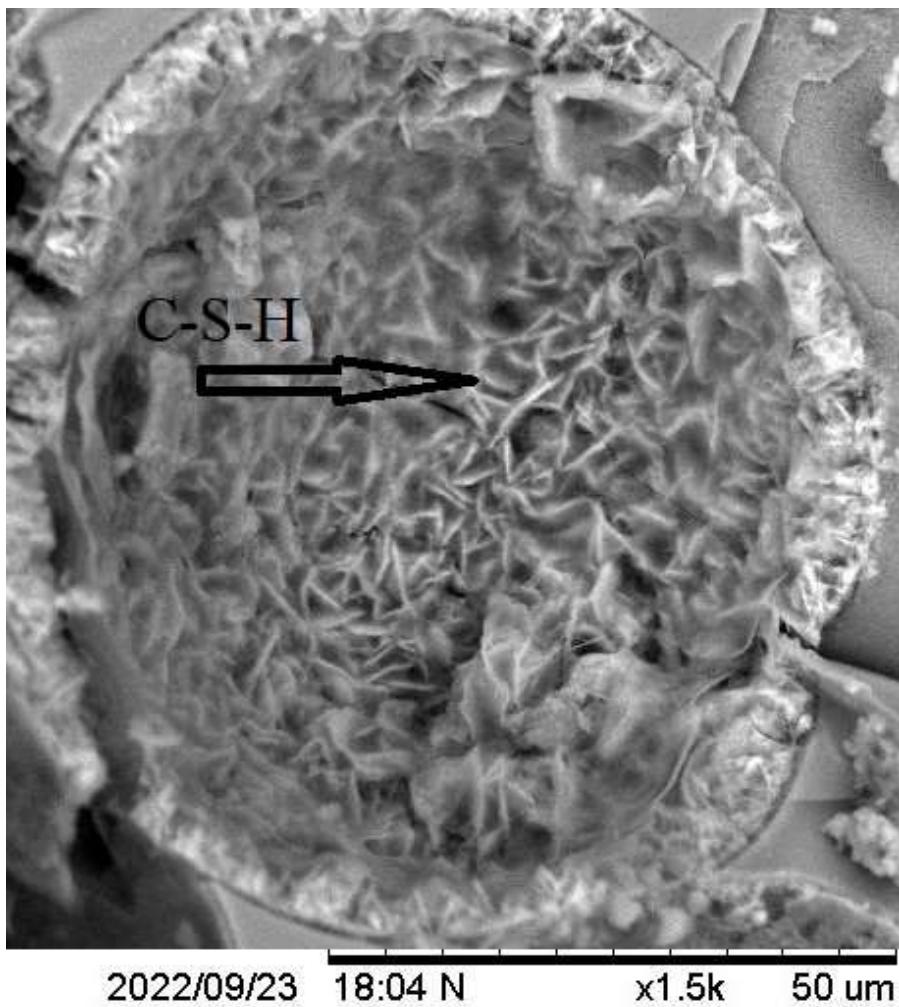
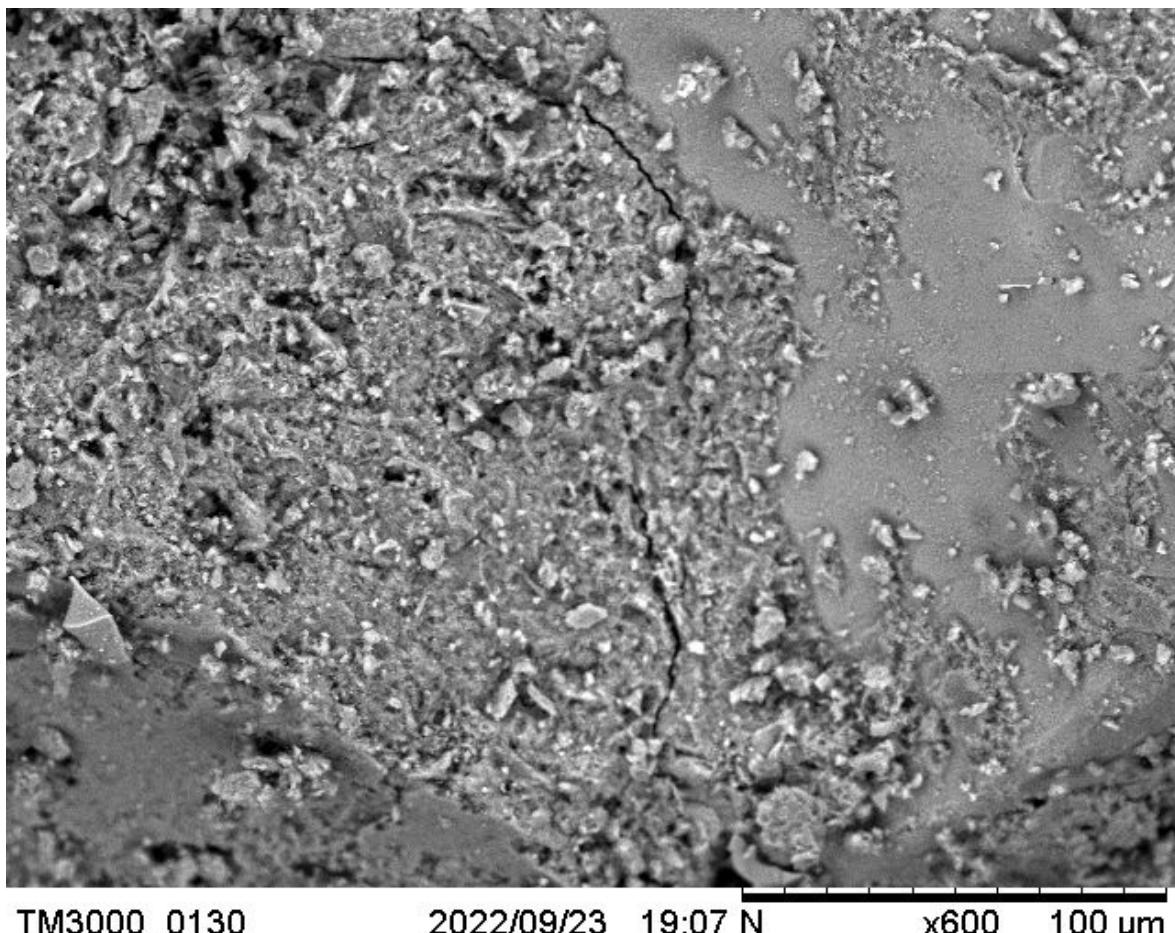


Figura 32 - Presença das fissuras somente na região do agregado de EAF, assim como grande quantidade de C-S-H

Na Figura 25, a substituição de 100% de EAF, demonstra-se a homogeneidade da mistura, indicando maior densidade na área de contato entre o agregado e a matriz, melhor ancoragem mecânica entre o resíduo industrial e a matriz cimentícia. Este fato está diretamente relacionado à melhoria nas propriedades mecânicas do concreto contendo EAF a 100% em relação ao concreto convencional.



TM3000_0130

2022/09/23 19:07 N

x600 100 μm

Figura 33 - Caminho da microfissura na pasta até o poro, funcionando como concentrador de tensões no concreto com substituição de 100% de EAF.

4.4 Análise das propriedades dos concretos

Os resultados obtidos sobre as propriedades dos concretos no estado endurecido foram submetidos a uma análise estatística de forma a validar as conclusões obtidas. A análise foi realizada para cada tipo de mistura por meio do método coeficiente de variação, com o objetivo de comprovar estatisticamente o impacto das variáveis estudadas, bem como a existência de possíveis interações entre essas variáveis.

4.4.1. Análise da Trabalhabilidade

Como parte do programa de ensaios, foram realizados ensaios de trabalhabilidade em concretos com escórias e de referência, nos quais esta propriedade foi avaliada com o padrão de determinação de consistência por meio de ensaio de abatimento de tronco de cone para todos os traços utilizados na matriz dos ensaios.

A trabalhabilidade foi verificada pelo ensaio de tronco de cone recomendado pela NBR16889 de (12/2020), que é considerado um fator de controle para concretos. Os

resultados de trabalhabilidade medidos durante a produção dos concretos ensaiados após 28 e 63 dias são apresentados nas Tabelas 24 e 25 e na Figura 26.

Tabela 24 - Propriedades do concreto no estado fresco, confeccionados para serem ensaiados aos 28 dias.

TRAÇO	ABATIMENTO (mm)
CR	76
CCEAF (50%)	71
CCEAF (70%)	69
CCEAF (100%)	58

Legenda: CR (Concreto referência); CCEAF (Concreto com escória de alto-forno).

Tabela 25 - Propriedades do concreto no estado fresco, confeccionados para serem ensaiados aos 63 dias.

TRAÇO	ABATIMENTO (mm)
CR	80
CCEAF (50%)	73
CCEAF (70%)	71
CCEAF (100%)	59

Legenda: CR (Concreto referência); CCEAF (Concreto com escória de alto-forno).

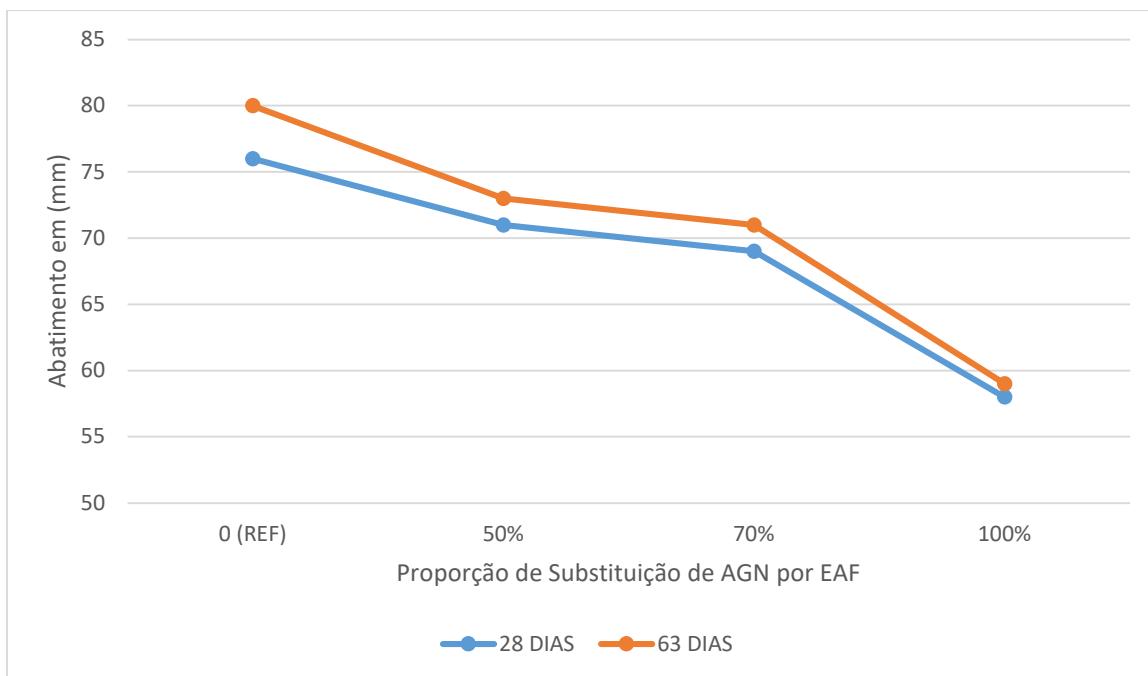


Figura 34 - Consistência do concreto (Slump test).

Após a incorporação da escória de alto forno na mistura, observou-se uma diminuição gradual na trabalhabilidade. Este efeito pode ser devido ao formato irregular e textura rugosa dos agregados de EAF, em contraste com o seixo, que possui formato esférico e textura lisa, o que facilita a penetração da argamassa e, assim, melhora a homogeneidade da mistura. Em outros estudos realizados por Belachia e Hebboub (2011), notou-se comportamento semelhantes e concluíram que para manter a trabalhabilidade, é necessário aumentar a relação a/c à medida que aumenta a taxa de substituição de agregados.

Em pesquisa realizada por Almeida (2014), resultados semelhantes também foram encontrados, onde concluiu-se que a trabalhabilidade foi afetada pelo aumento da taxa de substituição dos agregados pela escória, influenciando diretamente no aumento da relação a/c.

4.4.2. Avaliação da resistência à compressão axial

As tabelas 26 e 27 e Figura 27 apresentam uma análise comparativa do concreto sem escória e com adição de escória nas proporções de 50%, 70% e 100%. Verificou-se que após os 28 dias houve um aumento significativo da resistência à compressão dos concretos. Por outro lado, os concretos sem escória não obtiveram aumento significativo de resistência após 63 dias, enquanto os concretos com 50%, 70% e 100% apresentaram aumento de resistência mecânica em relação aos demais, o que deve ser levado em consideração é que o aumento na resistência após 63 dias está diretamente relacionada ao tipo de cimento CP-IV utilizado

no programa experimental e não ao uso de EAF, uma vez que este tipo de cimento contém materiais pozolânicos que contribuem para o aumento do desempenho com a idade.

Tabela 26 - Resultados individuais de resistência à compressão, aos 28 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno.

Concreto	Resistência à Compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Referência (0%)	22,00	23,58	1,11	4,70
	24,06			
	25,02			
	23,24			
EAF (50%)	23,46	25,37	1,30	5,14
	27,15			
	25,50			
	25,38			
EAF (70%)	26,31	27,30	1,22	4,47
	29,30			
	26,32			
	27,26			
EAF (100%)	24,34	25,21	0,74	2,93
	25,72			
	24,64			
	26,13			

Tabela 27 - Resultados individuais de resistência à compressão, aos 63 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno.

Concreto	Resistência à Compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Referência (0%)	24,24	24,47	0,36	1,48
	25,07			
	24,42			
	24,14			
EAF (50%)	24,74	26,10	0,89	3,40
	27,02			
	26,74			
	25,91			
EAF (70%)	28,34	28,83	1,76	6,09
	31,80			
	27,27			
	27,90			
EAF (100%)	25,53	26,49	0,84	3,18
	25,86			
	26,92			
	27,64			

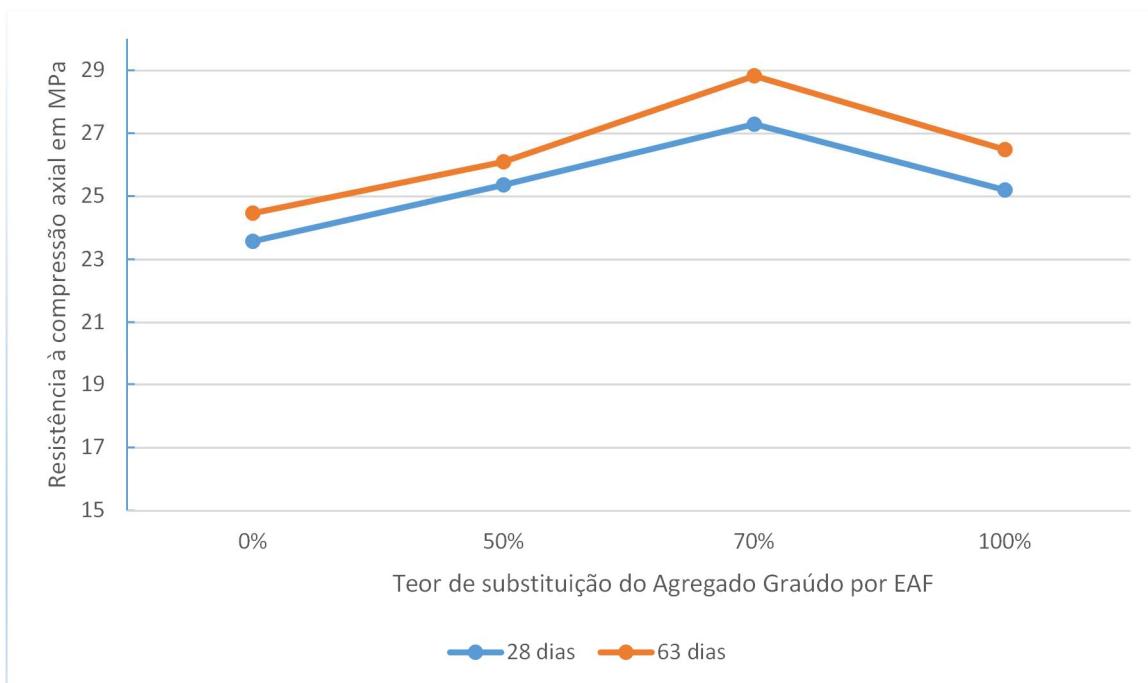


Figura 35– Resistência à compressão axial dos concretos para idades diferentes, em função do teor de substituição do agregado graúdo natural por escória de alto-forno.

O aumento da resistência dos concretos contendo escória pode ser explicado pela maior resistência dos resíduos industriais ao desgaste superficial em comparação aos agregados naturais. Além disso, a forma irregular e a estrutura áspera do EAF ajudaram a melhorar a adesão entre o EAF e a matriz cimentícia.

Segundo Monosi et al. (2015) ao substituírem 40% do agregado graúdo natural por escória de aciaria e compararem ao concreto sem adição de EAC, mantendo a mesma relação água/cimento de 0,54. Os concretos especiais obtiveram aumento de resistência de 40%. Isso após 28 dias, quando os concretos foram submetidos a um ensaio de compressão axial. Este aumento está relacionado à melhor resistência de união na interface pasta-agregado. Devido ao seu formato irregular e textura áspera, além do baixo desgaste superficial, o EAC apresenta alto índice de dureza.

De acordo com Maslehuddin et al. (2002) as propriedades mecânicas do concreto substituindo 50% de AGN por EAC melhoraram. Esta melhoria na resistência à compressão indica que o material pode ser utilizado com sucesso em concretos de cimento Portland.

Resultados semelhantes foram descritos por Sekaran, Palaniswamy e Balaraju (2015), que preparam concreto com teor de escória de aciaria de 50% de (EAC) e teor de cinzas volantes de 30%, que apresentou melhora significativa nas propriedades mecânicas (ensaio de resistência à compressão e flexão da viga) em comparação com concreto convencional e

concreto, que consiste apenas em aditivos naturais grossos (AGN) e 30% de cinza volante. Este ganho está relacionado à alta resistência à abrasão e compressão do EAC em comparação ao AGN. Em pesquisa, Vasconcelos et al. (2016), obtiveram resultados tecnicamente satisfatórios em termos de resistência à compressão com concretos produzidos a partir da escória de alto forno.

Dessa forma, adicionar esses resíduos industriais na forma de agregados graúdos à fabricação de concreto torna-se uma alternativa tecnicamente viável, visando limitar o acúmulo de resíduos industriais despejados e ao mesmo tempo contribuir diretamente para limitar a exploração de jazidas naturais.

4.4.3. Análise da resistência à tração por compressão diametral

A Figura 28 mostra os resultados entre concretos sem adição de escória e concretos com adição de escória nas proporções de 50%, 70% e 100%. Observou-se que após 28 dias através de cada substituição foi alcançado um aumento significativo nos parâmetros mecânicos em relação ao valor de referência de 0%. Em seguida observou-se que após 63 dias apresentaram ainda maior diferença significativa nos parâmetros mecânicos em relação aos demais concretos, tendo como destaque a proporção de 70% em que atingiram os maiores resultados. Acredita-se que esse aumento de resistência no grau 70% esteja relacionado ao aumento da força de interação entre o agregado e a pasta, pois o concreto fabricado neste grau continha maior proporção de agregado EAF em sua composição.

Tabela 28 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno.

Concreto	Tração por compressão diametral (MPa)	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Referência (0%)	1,60	1,53	0,05	3,31
	1,49			
	1,47			
	1,55			
EAF (50%)	1,73	2,01	0,17	8,25
	2,11			
	2,10			
	2,12			
EAF (70%)	2,03	2,09	0,12	5,58
	2,29			
	2,00			
	2,03			
EAF (100%)	1,92	2,32	0,23	9,91
	2,40			
	2,48			
	2,45			

Tabela 29 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral, aos 63 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno.

Concreto	Tração por compressão diametral (MPa)	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Referência (0%)	1,69	1,67	0,04	2,42
	1,72			
	1,66			
	1,61			
EAF (50%)	1,96	2,05	0,09	4,34
	1,97			
	2,12			
	2,16			
EAF (70%)	2,31	2,28	0,05	2,19
	2,34			
	2,22			
	2,25			
EAF (100%)	2,12	2,34	0,14	5,81
	2,47			
	2,43			
	2,34			

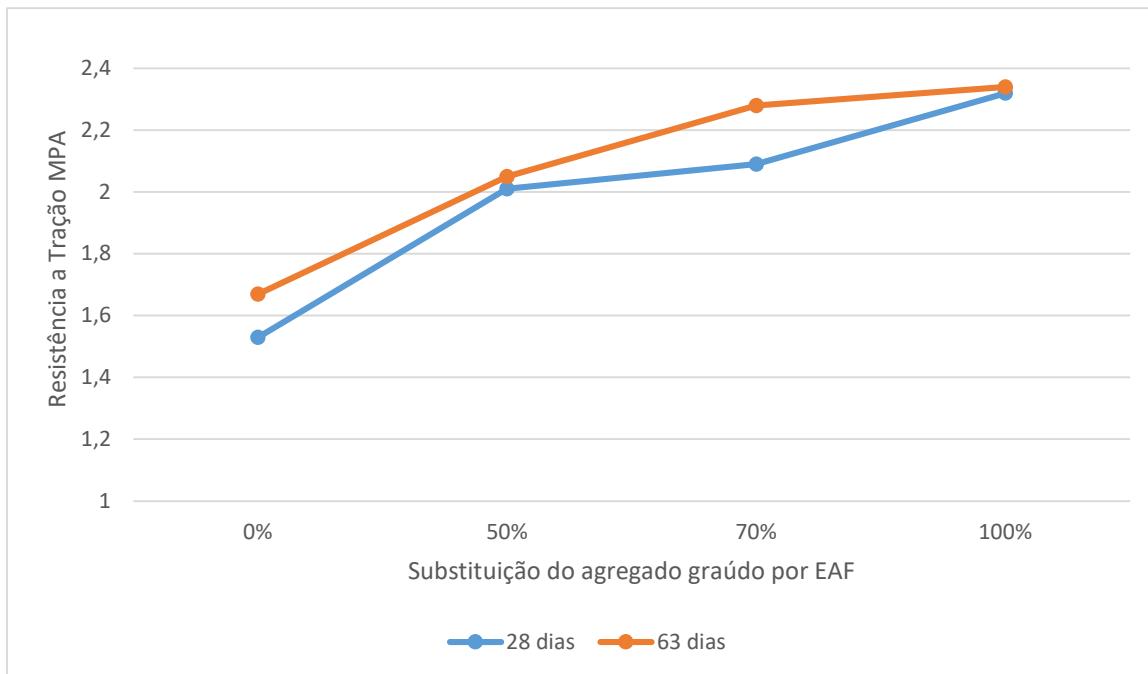


Figura 36: Resistência à tração por compressão diametral dos concretos para idades diferentes, em função do teor de substituição do agregado graúdo natural por escória de alto-forno. Valores expressos em média \pm desvio padrão.

Assim como a análise da resistência à compressão axial, a análise da resistência à tração é baseada na mesma consideração, ou seja, esse aumento de resistência deveu-se ao fato do EAF apresentar maior dureza superficial que o agregado natural, bem como sua forma e textura áspera o que melhorou a adesão na interface matriz-agregado.

Gomes et al. (2020), em estudo sobre o desempenho e características a partir da incorporação da escoria de alto-forno, considerando os critérios do ensaio de resistência à compressão axial (50% escória, 75% escória, 100% escória e convencional), verificaram que o ganho de resistência dos concretos dosados com escória foi aproximado ao do concreto convencional. Sendo o concreto composto por 75% de escória, aos 28 dias mais resistente em comparado ao convencional na mesma.

4.4.4. Análise do módulo de elasticidade

A Figura 29 apresenta os resultados entre concretos sem adição de escória e concretos com adição de escória nas proporções de 50%, 70% e 100%. Após os 28 dias observa-se um aumento significativo no módulo de deformação para as adições de 50% e 70% e 100% em comparação ao traço referência.

Tabela 30 - Resultados individuais do módulo de elasticidade, aos 28 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno.

Concreto	Módulo de elasticidade (GPa)	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Referência (0%)	21,35	21,67	1,19	5,48
	20,78			
	23,69			
	20,85			
EAF (50%)	25,10	25,99	0,73	2,83
	26,52			
	26,88			
	25,45			
EAF (70%)	26,23	26,81	0,94	3,50
	26,30			
	27,89			
	28,34			
EAF (100%)	25,61	25,62	0,62	2,42
	26,39			
	24,67			
	25,82			

Tabela 31 - Resultados individuais do módulo de elasticidade, aos 63 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno.

Concreto	Módulo de elasticidade (GPa)	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Referência (0%)	23,31	23,42	0,56	2,37
	22,87			
	24,34			
	23,15			
EAF (50%)	26,96	27,03	0,48	1,79
	26,28			
	27,56			
	27,33			
EAF (70%)	28,60	28,16	0,45	1,60
	27,54			
	28,57			
	27,91			
EAF (100%)	26,93	26	0,77	2,95
	26,58			
	25,22			
	25,26			

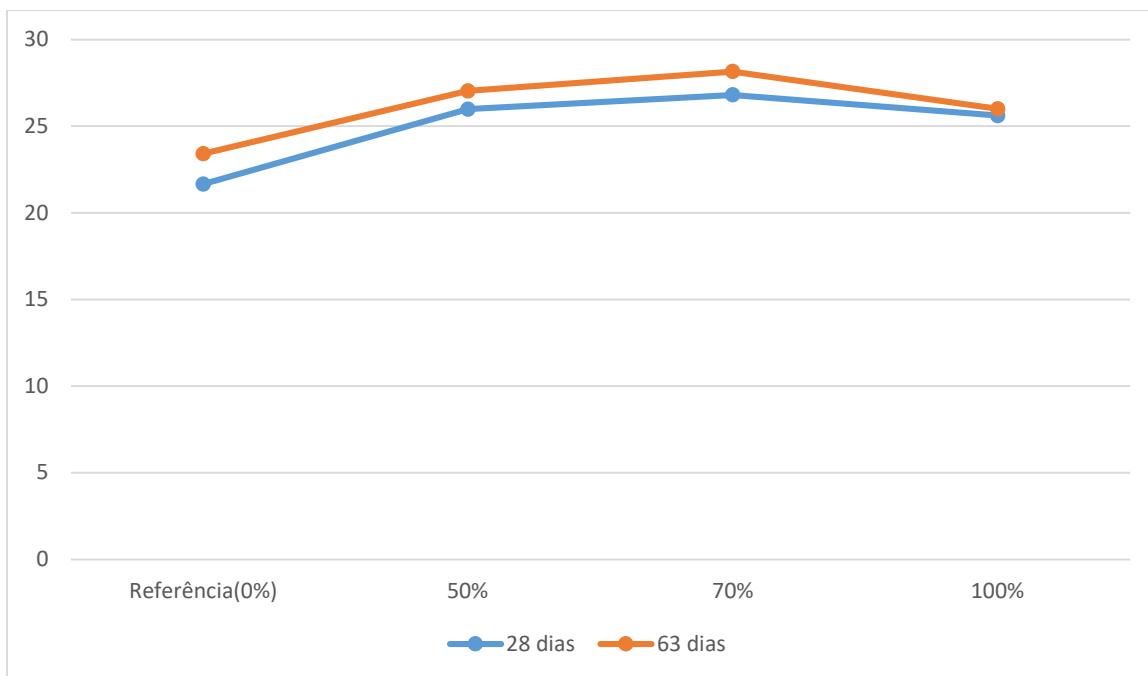


Figura 37 - Módulo de elasticidade dos concretos para idades diferentes, em função do teor de substituição do agregado graúdo natural por escória de alto-forno. Valores expressos em média.

O aumento do módulo de elasticidade dos concretos com substituição de 50% a 70% e 100% está associado à melhoria das propriedades físicas dos agregados de escória de alto-forno em relação ao agregado graúdo natural.

Ao substituíram agregados graúdos de silício-calcário de 50% e 100% em volume por escória de aciaria (EAC) e analisaram a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto de alta resistência com uma relação água/cimento constante de 0,3 com os resultados Adegooye et al. (2014) perceberam uma resistência 9% maior dos concretos especiais, o que está associado à maior resistência à abrasão da escória, além de possuir superfície irregular, o que permite melhor aderência dos agregados às superfícies do concreto.

5. Conclusão e Sugestões

5.1 Conclusão

Com base nos resultados desses ensaios como descritos na literatura, os concretos elaborados a partir da escória de alto forno analisada alcançam resultados tecnicamente satisfatórios em termos de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade.

Nesse sentido o estudo desenvolvido neste trabalho está alinhado com a linha de pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFPA, voltado para o desenvolvimento de soluções sustentáveis e inovadoras na construção civil. Os resultados obtidos corroboram os achados de Vasconcelos (2016), que, em sua investigação, observou um aumento significativo no desempenho mecânico de concretos com 30% e 40% de escória de alto-forno (EAF), em comparação com o concreto convencional. Este estudo amplia essa compreensão ao explorar proporções ainda mais elevadas de EAF, fornecendo dados que fortalecem o uso desse resíduo como alternativa sustentável no setor da construção, contribuindo assim para o avanço tecnológico e sustentável na área.

Através da análise da resistência à compressão axial nas proporções com substituições de 50%, 70% e 100% obtiveram-se valores de resistência com maiores resultados em relação ao concreto de referência, contudo deve-se ressaltar um desempenho mais significativo para a proporção de 70% sendo que se observou um ganho de resistência à compressão em média de 15% em relação ao concreto convencional de referência.

Para os concretos ensaiados quanto à resistência à tração pelo método de compressão diametral, pode-se concluir que os concretos com substituição de 50%, 70% e 100% obtiveram um aumento significativo de resistência em comparação ao concreto convencional, lembrando que o concreto com 70% se destaca com aumento na resistência à tração em média de 20% em relação ao concreto de referência.

Para os concretos submetidos à avaliação do módulo de elasticidade, observou-se que os concretos com 50%, 70% e 100% de EAF apresentaram um aumento significativo de resistência em relação ao concreto convencional, contudo o concreto com 70% se destaca com aumento no módulo de elasticidade em média de 20% em relação ao concreto de referência.

Ressalta-se que esses resultados devem ser considerados significativos dentro de certos limites, uma vez que as propriedades do resíduo analisado (escória de alto forno) podem

sofrer alterações dependendo da qualidade da matéria-prima e de eventuais alterações nos processos metalúrgicos utilizados para a produção de ferro gusa.

Em resumo, a importância da correta do descarte dos resíduos é hoje plenamente reconhecida e o desenvolvimento metodológico tem registado progressos significativos nos últimos anos. Entre as alternativas disponíveis para o tratamento e disposição final de resíduos industriais de EAF é a introdução destes resíduos no mercado da construção civil que representa uma solução técnica viável e com forte potencial de crescimento. Esta alternativa à disposição final de resíduos industriais de EAF pode também contribuir para o desenvolvimento sustentável da região de geração, evitando o uso de recursos naturais e o consumo de energia, reduzindo o impacto ambiental da extração de recursos naturais e melhorando a qualidade de vida para as pessoas e para o planeta.

5.2. Sugestões

Dada a grande quantidade de escória de alto-forno gerada nas siderúrgicas, cujo excedente é frequentemente armazenado em pátios, é crucial continuar investindo em pesquisas que explorem alternativas para o aproveitamento desses resíduos na construção civil. Em particular, é necessário consolidar e aprimorar suas propriedades como agregado na produção de concreto sustentável. A seguir, algumas sugestões para pesquisas futuras:

- Determinar a relação custo-benefício com a devida especificação da substituição de agregados naturais (AGN) por escória de alto-forno (EAF) em concretos.
- Analisar os impactos ambientais decorrentes do depósito de escórias nos pátios das empresas geradoras desse resíduo.
- Avaliar o comportamento mecânico e a durabilidade de concretos armados sustentáveis com teores de substituição de EAF em 50%, 70% e 100%.
- Estudar como a diferença de massa unitária entre EAF e AGN pode influenciar os resultados dos ensaios de compressão axial.
- Examinar o comportamento mecânico de concretos sustentáveis na fabricação de blocos estruturais com os mesmos teores de substituição utilizados neste estudo.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITCIN, PIERRE C. HIGH-PERFORMANCE CONCRETE. QUEBEC: E&FN SPON, 1998.

ALMEIDA, G.M. (2014). **Utilização de escória produzida em alto-forno a carvão vegetal como agregado graúdo e miúdo para concreto.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, XXXp.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. NBR NM 53. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. NBR NM 51. Rio de Janeiro. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. NBR NM 52. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação da composição granulométrica. NBR NM 248. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Terminologias. NBR 9935. Rio de Janeiro. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para concreto – Especificação NBR 7211. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Amostragem de resíduos sólidos. NBR 10007. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Análise química – Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férlico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. NBR 11582. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. NBR NM 67. Rio de Janeiro. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. NBR 5739. Rio de Janeiro. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. NBR 5738. Rio de Janeiro. 2015.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado – Determinação da massa unitária e dos espaços vazios. NBR NM 45. Rio de Janeiro. 2006.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. NBR 7215. Rio de Janeiro. 1997.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland Comum. NBR 5732. Rio de Janeiro. 1991.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118, Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7680, Concreto-Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto. Rio de Janeiro, 2007.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. NBR 7222. Rio de Janeiro. 2021.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal – Método de ensaio. NBR 5751. Rio de Janeiro. 2012.

BRASIL. Lei nº 12.305. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, 2 ago. 2010.

CALIXTO, J.M.F. Efeito da utilização de diferentes tipos de concreto no comportamento e na resistência de lajes mistas com forma de aço incorporada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, [S.I]. Anais... [S. l.: s.n], IBRACON, 2005. v. 1, p.1-15.

CANESSO, F.A.C.; BELUCO, J.A.; GOMES, A.M.; AGUILAR, M.T.P.; CETLIN, P.R. Influência da adição de escória granulada de alto-forno nas propriedades mecânicas do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 47., 2005, [S.I]. Anais... [S. l.: s.n], IBRACON, 2005 v. 5, p. 901-910.

CASTRO, L.F.A.; TAVARES, R.P.; KLEIN, C.A.; FUJIHARA, F.K. **Escoria de alto forno: formação e efeitos sobre processo.** In: 55º Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia (ABM), Rio de Janeiro. 2009. p.687 – 697.

FILHO, J,N,S. Estudos De Reaproveitamento Dos Resíduos Das Barragens De Minério De Ferro Para Uso Na Pavimentação De Rodovias E Fabricação De Blocos Intertravados. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do

CEFET-MG. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. Brasil. 2013.

FEILO e ROYSTER (1981) e LEE (1974), dado as escórias de alto forno se produzem mediante a completa fusão de seus constituintes seguido de um resfriamento em condições de certa forma controladas, o nível de variação de suas propriedades pode ser amplo.

FERREIRA G. E.; FONSECA JUNIOR C.A.F Mercado de agregados no Brasil. In: LUZ, A. B.; ALMEIDA S.L.M **Manual de Agregados para Construção Civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI,2012. Cap.1, p. 7 – 33.

FRAZÃO, E. B., 2002, Tecnologia de rochas na construção civil. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo, 132 p.

GALDEANO, O. V. R. et al. A experiência da CSN na reciclagem de resíduos sólidos nas sinterizações da CSN. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIOS E MATÉRIAS-PRIMAS, 25., 1994. Volta Redonda. Anais... Volta Redonda, 1994, p. 48-64.

GARCÍA, C; SAN JOSÉ, J.T. and URRETA, J.I. Reuse valorization in civil works of electric arc furnace (EAF) slag produced in C.A.P.V. In: GLOBAL SYMPOSIUM AND RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, 1999, Espanha. Anais...Espanha, 1999. p. 417-424.

GHOULEH, Z. et al. Production of carbonate aggregates using steel slag and carbon dioxide for carbon-negative concrete. **Journal of CO₂ Utilization**, v.18, p. 124-138, 2017.

GOMES, D. A.; XAVIER, E L. M. Análise de viabilidade econômico-financeira de sistema fotovoltaico para habitação de interesse social. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

ISAIA, G. C. *Concreto: ensino, pesquisa e realizações, volume I*. 1^a ed., São Paulo: IBRACON, 2005.

ISAIA, G. C. Materiais de Construção Civil d Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo. 2007.

JOHN, Vanderley M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.

LAMOND, Joseph F. and PIELERT James H. **Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making** STP 169D, 2010.

LOBATO, N.C.C. GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

LIU, J.; JIANG, W.; LIU, X. **Impact of carbon quota allocation mechanism on emissions trading:** Na Agent-Based Simulation. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2071-1050/8/8/826>. Acesso em: 18 de julho de 2021.

MASSUCATO, C. J. **Utilização de escória de alto forno a carvão vegetal como adição no concreto.** 2005. 122p. Dissertação (Mestrado em engenharia), Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo/ EUC, 2005.

MAUTHOOR, S. et al. Characterisation of electric arc furnace slags as concrete aggregate in a small island Developing state: A preliminary study. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 459-464, 2016.

MELO, A.C. NETO; HELENE, P. **Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos.** 44º Congresso Brasileiro: São Paulo: Ibracon, 2002.

MEHTA, P.K. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*, São Paulo: Editora Pini Ltda, 573p., 1994.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete Microstructure, Properties and Materials.** The McGraw-Hill. 3^a Ed. 2006.

METHA, P. K; MONTEIRO, P. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: IBRACON, 2008.

METHA, P. K; MONTEIRO, P. **Concreto: Microestrutura, propriedades e Materiais.** 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MONTINI, Marcelo. Aplicação de resíduos de bauxita e cinza pesada da indústria do alumínio na fabricação de cimento Portland – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos. UFSCAR. São Carlos, SP. Brasil, 2009.

MORENO SAMANIEGO, Yulena Tatiana. Ensaios Não Destrutivos para Avaliação da Resistência do Concreto: Estudo de Aplicação em Obras. [Distrito Federal] 2014. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

MUAN, A. OSBORN, E. I. **Phase equilibrant among oxides in steelmaking.** Wesley Publishing Company, 1975. 236 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** Tradução engenheiro Salvador E. Giamusso. 2º. edição, editora PINI, São Paulo, 1997.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J **Tecnologia do concreto.** 2 ed. Tradução de Ruy Alberto Cremoni. São Paulo: Bookman, 2010.

OLLIVER, J.P.; TORRENTI, J.M **A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte.** Tradução de Oswaldo Cascudo e Helena Carasek. São Paulo: Ibracon, 2014.

POPOVICS, SÁNDOR. **Fundamentals of portland cement concrete: a quantitative approach,** 1982.

SBRIGHI NETO, CLAUDIO. **CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações.** Ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005, 2V. 1600p.

SILVA, Luiza de Assis Ferrari. Utilização de rejeitos oriundos de processos siderúrgicos na fabricação de blocos intertravados. Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Engenharia Ambiental e Sanitária, 2018.

SILVA, J.B., HOTZA, D., SEGADÃES, A. M., ACCHAR, W., 2005. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Cerâmica** 51, 325–330. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132005000400004>.

SING J.; ORDONEZ M.I. Resource recovery from post-consumer waste: important lessons for the upcoming circular economy. **Journal of Cleaner Production**. V.134. p. 342-353. 2015.

SOUZA, D. S. J. **Estudo do comportamento de escórias de alto-forno a carvão vegetal produzidas a partir de ativação à quente.** 2007. 64 f. (Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 272–292, 2018.

VASCONCELOS, Adriano Luiz Roma. Efeito da Substituição Parcial do Agregado Graúdo por Escória de Alto-Forno nas Propriedades Mecânicas de Concretos. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2016.

VIEIRO, E. H. **Aplicação de areia de britagem de rochas basálticas na fabricação de concreto de cimento portland.** 2010. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do sul, 2010.

VIKLUND-WHITE, C.; YE, G. Utilization and treatment of steelmaking slags. In: GLOBAL SYMPOSIUM AND RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, 1999, Espanha. Anais...Espanha, 1999. p. 337-345.

HELENE, P. R. L., & TERZIAN, P. (1993). Manual de dosagem e controle do concreto. São Paulo: Pini.

DIFRAÇÃO DE RAIO-X. Disponível em: <https://sites.ifi.unicamp.br/lfmoderna/conteudos/difracao-de-raio-x>. Acesso em: 20 de agosto de 2023.

CALLISTER, W. D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. John Wiley & Sons, Inc., 2002. Difração de raio-x.

UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO A CARVÃO VEGETAL COMO ADIÇÃO NO CONCRETO. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/361821>. Acesso em: 21/08/2023