



Adriano Luiz Roma Vasconcelos

**Efeito da Substituição Parcial do
Agregado Graúdo por Escória de Alto-
Forno nas Propriedades Mecânicas de
Concretos**

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

2016

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



Adriano Luiz Roma Vasconcelos

**Efeito da Substituição Parcial do Agregado Graúdo por Escória
de Alto-Forno nas Propriedades Mecânicas de Concretos**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Marcelo de Souza Picanço

Belém
Abril de 2016

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Adriano Luiz Roma Vasconcelos.

TÍTULO: Efeito da Substituição Parcial do Agregado Graúdo por Escória de Alto-Forno nas Propriedades Mecânicas de Concretos.

GRAU: Mestre ANO: 2016

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.

Adriano Luiz Roma Vasconcelos

Rua Bernal do Couto, Cond. Real Seasons, nº901, Ed. Summer, apto. 1401, Umarizal 66055-080 Belém- PA – Brasil.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Central / UFPA, Belém – PA

Vasconcelos, Adriano Luiz Roma.

Efeito da Substituição Parcial do Agregado Graúdo por Escória de Alto-Forno nas Propriedades Mecânicas de Concretos / Adriano Luiz Roma Vasconcelos. – 2016.

Orientador: Marcelo de Souza Picanço.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2016.

1. Aproveitamento de Resíduos. 2. Concreto Especial. 3. Escória de Alto-Forno.

CDD - XX. ed. XXX.XXXXX



Adriano Luiz Roma Vasconcelos

**Efeito da Substituição Parcial do Agregado Graúdo por Escória
de Alto-Forno nas Propriedades Mecânicas de Concretos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPA. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Orientador

Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Prof. Dr. André Augusto Azevedo Montenegro

Duarte

Examinador Interno

Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Prof. Dr. Bernardo Borges Pompeu Neto

Examinador Externo

Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Prof. Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral

Examinador externo

Universidade Federal do Ceará - UFC

Belém, 08 de Abril de 2016.

Resumo

VASCONCELOS, A. L. R.(2016). **Efeito da Substituição Parcial do Agregado Graúdo por Escória de Alto-Forno nas Propriedades Mecânicas de Concretos.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, XXXp.

A escória de alto-forno a carvão vegetal é um resíduo gerado a partir da produção do ferro gusa em alto-forno. Nas siderúrgicas que operam em alto-forno a geração de resíduo é de aproximadamente 250 kg para cada tonelada de ferro gusa produzido. Nesse sentido, o estado do Pará figura como o segundo maior produtor nacional de ferro gusa, reforçando a importância de se ter uma investigação científica mais detalhada, visando minimizar o impacto ambiental provocado pelo acúmulo deste resíduo, através do desenvolvimento de aplicações apropriadas. Nesse contexto o presente trabalho de pesquisa tem como objetivo verificar as propriedades mecânicas de concretos produzidos com a substituição parcial do agregado graúdo natural (AGN) pela escória de alto-forno (EAF). Para isso realizou-se um processo de beneficiamento da EAF através da britagem em um britador de mandíbulas e peneiramento, em seguida foi realizado um estudo de dosagem em concreto com 100% de AGN, logo foi realizado a substituição (em massa) do agregado natural por agregado de escória de alto forno (0% - referência, 20%, 30% e 40%). 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 mostraram que a incorporação da EAF na mistura ocasionou uma queda progressiva de trabalhabilidade nos concretos. Assim como, o desempenho mecânico aumentou significativamente em relação ao concreto convencional a partir da incorporação de 30 % de EAF. Desta forma, a incorporação deste resíduo na produção de concretos especiais induz melhoras nas respostas em todas as propriedades mecânicas analisadas quando comparadas ao concreto convencional.

Palavras-chave

Aproveitamento de Resíduos; Escória de Alto-Forno; Concreto Especial.

Abstract

VASCONCELOS, A. L. R.(2016). **Partial Replacement of the Effect Aggregate for Blast Furnace Slag on Mechanical Properties of Concrete**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, XXXp.

The blast furnace slag charcoal is waste generated from the production of pig iron in blast furnaces. In the steel mills operating in blast furnace waste generation is approximately 250 kg per ton of pig iron produced. In this sense, the state of Pará figure as the second largest domestic producer of pig iron, reinforcing the importance of having a more detailed scientific research in order to minimize the environmental impact caused by the accumulation of this waste through the development of appropriate applications. In this context the present research aims to determine the mechanical properties of concrete produced with the partial replacement of natural coarse aggregate (AGN) for blast furnace slag (EAF). For this we performed a beneficiation process of the EAF by crushing in a jaw crusher and screening, then it performed a dose of study concrete with 100% AGN was performed immediately replacing (by mass) of natural aggregate by aggregate of blast furnace slag (0% - reference, 20%, 30% and 40%). tests were carried out in the fresh state (consistency) and in the hardened state (compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity) of concrete produced with partial replacement of AGN by EAF at the ages of 28 and 63 days as well as scanning electron microstructure (SEM) of concrete. The results showed that the incorporation of the EAF in the mixture caused a gradual decrease in concrete workability. As well as the mechanical performance increased significantly compared to conventional concrete from the incorporation of 30% of EAF. Thus, incorporation of this waste in special concrete production improvements induced responses in all the analyzed mechanical properties when compared to conventional concrete.

Keywords

Waste Recovery; Slag Blast Furnace; Special Concrete.

Lista de Tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1 - Dados comparativos entre o alto-forno à carvão vegetal e o alto-forno a coque (JACOMINO <i>et al.</i> , 2002).....	25
Tabela 2.2 – Composição química típica das escórias de alto-forno e do cimento Portland (JOHN, 1995)	28

Capítulo 3

Tabela 3.1 - Resumo do programa experimental.....	37
Tabela 3.2:Métodos de caracterização do agregado miúdo.....	38
Tabela 3.3:Métodos de caracterização do agregado graúdo convencional (seixo).	39
Tabela 3.4: Métodos de caracterização do agregado graúdo de escória de alto-forno.....	40

Capítulo 4

Tabela 4.1 - Características físicas do cimento Portland CP IV - 32	42
Tabela 4.2 - Características químicas do cimento Portland CP IV - 32	43
Tabela 4.3 - Características mecânicas do cimento Portland CP IV - 32.....	43
Tabela 4.4 - Características físicas do agregado miúdo	44
Tabela 4.5 - Características físicas do agregado graúdo	45
Tabela 4.6 - Análise química das amostras de escória de alto-forno	50
Tabela 4.7 - Quantidades de materiais.....	51
Tabela 4.8 - Quantidade em gramas dos materiais utilizados	51
Tabela 4.9 - Resistência à compressão das argamassas aos 7 dias.....	52
Tabela 4.10 - Características físicas e composição granulométrica da EAF.....	54
Tabela 4.11 - Traços auxiliares para execução da curva de dosagem.	56
Tabela 4.12 - Caracterização do agregado graúdo, bem como o consumo estimado para moldagem de 12 corpos de prova cilíndricos de (Ø 10 x 20) cm.	57
Tabela 4.13 - Caracterização do AGN e da EAF, bem como o consumo estimado para moldagem de 12 corpos de prova cilíndricos de (Ø 10 x 20) cm.	58
Tabela 4.14 - Propriedades do concreto no estado fresco, confeccionados para serem ensaiados aos 28 dias. Legenda: CR (Concreto referência); CCE (Concreto com escória de alto-forno).	64
Tabela 4.15 - Propriedades do concreto no estado fresco, confeccionados para serem ensaiados aos 63 dias. Legenda: CR (Concreto referência); CCE (Concreto com escória de alto-forno).	64

Capítulo 7

Tabela 7.1 - Resultados individuais de resistência à compressão, aos 28 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno.	83
Tabela 7.2 - Resultados individuais de resistência à compressão, aos 63 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno.	84
Tabela 7.3 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno.	85
Tabela 7.4 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral, aos 63 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno.	86
Tabela 7.5 - Resultados individuais do módulo de elasticidade, aos 28 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno.	87
Tabela 7.6 - Resultados individuais do módulo de elasticidade, aos 63 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno.	88
Tabela 7.7 - Teste de normalidade para todos os grupos de dados para análise de comparação no ensaio de resistência à compressão.	91
Tabela 7.8 - Teste de normalidade para todos os grupos de dados para análise de comparação no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.	92
Tabela 7.9 - Teste de normalidade para todos os grupos de dados para análise de comparação no ensaio de módulo de elasticidade.	92
Tabela 7.10 - Teste de Levene para homogeneidade dos dados no ensaio de resistência à compressão.	93
Tabela 7.11 - Teste de Levene para homogeneidade dos dados no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.	93
Tabela 7.12 - Teste de Levene para homogeneidade dos dados no ensaio de módulo de elasticidade.	93
Tabela 7.13 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (Resultados do ensaio de resistência à compressão).	94
Tabela 7.14 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral).	94
Tabela 7.15 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (Resultados do ensaio de módulo de elasticidade).	94
Tabela 7.16 - Anova de uma via para comparação entre grupos maiores que dois e independentes (Resultados do ensaio de resistência à compressão).	95

Tabela 7.17 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral).....	95
Tabela 7.18 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (Resultados do ensaio de módulo de elasticidade).	95
Tabela 7.19 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 dias (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P<0,05$).....	96
Tabela 7.20 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 63 dias (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P<0,05$).....	97
Tabela 7.21 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 dias (Os números que estão na cor vermelha indicam que há diferença significativa; $P<0,05$).....	98
Tabela 7.22 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 63 dias (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P<0,05$).....	98
Tabela 7.23 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 dias (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P<0,05$).....	99
Tabela 7.24 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 63 dias (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P<0,05$).....	100

Lista de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1- Estrutura da dissertação 7

Capítulo 2

Figura 2.1 - Secção polida de um corpo de prova de concreto (METHA & MONTEIRO, 2014)..... 8

Figura 2.2 - Representação esquemática da microestrutura do concreto (adaptado de METHA & MONTEIRO, 2008)..... 10

Figura 2.3 - Representação esquemática da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado (MONTEIRO, 1985)..... 11

Figura 2.4 - Representação esquemática do caminho de propagação de fissuras na zona de transição (MONTEIRO, 1985). 12

Figura 2.5 - Comportamentos típicos de tensão – deformação da pasta de cimento, agregado e concreto (Adaptado de Metha e Monteiro, 2008) 21

Figura 2.6 – Aplicações da escória de alto-forno (Relatório de Sustentabilidade 2014 do IBS)..... 23

Figura 2.7 - Representação esquemática de um alto-forno (adaptado de JACOMINO *et al.*, 2002)..... 25

Figura 2.8. Granulação da escória (adaptado de JACOMINO *et al.*, 2002)..... 30

Capítulo 3

Figura 3.1 – Organograma da caracterização física, mineralógica e química dos materiais empregados na pesquisa. 34

Figura 3.2 - Organograma da análise mecânica dos materiais empregados na pesquisa 35

Capítulo 4

Figura 4.1- Curva granulométrica do agregado miúdo, e limites da NBR NM 7211 (ABNT, 2009)..... 44

Figura 4.2- Curva granulométrica do AGN, e limites da NBR NM 7211 (ABNT, 2009). 46

Figura 4.3 - Amostra in natura (a); (b) moinho de bolas; (c) amostra passante na peneira 200; (d) britador de mandíbulas; (e) peneirador mecânico; (f) EAF com granulometria passante na peneira de 25 mm e retido na 4,8 mm..... 47

Figura 4.4 - Difrátograma de Raios-X da escória de alto-forno..... 49

Figura 4.5 - Avaliação da atividade pozolânica com cal da escória de alto-forno..... 52

Figura 4.6: Avaliação da atividade pozolânica com cimento Portland. 53

Figura 4.7- Curva granulométrica da EAF, e limites da NBR NM 7211 (ABNT, 2009). ..	55
Figura 4.8 - Diagrama de dosagem.....	57
Figura 4.9 - Quantidade de aditivo (%) em relação a massa de cimento adicionado as misturas.....	58
Figura 4.10 - Interface agregado-matriz do concreto de referência.	60
Figura 4.11 - Vista ampliada da interface pasta-agregado do concreto de referência.....	60
Figura 4.12 - Caminho da microfissura na pasta até o poro, funcionando como concentrador de tensões no concreto convencional.....	61
Figura 4.13 - Vista do formato irregular da EAF, melhorando a aderência entre o agregado e a matriz.....	62
Figura 4.14 - Presença das fissuras somente na região do agregado de EAF, assim como grande quantidade de C-S-H e pouca quantidade de Ca(OH) ₂	63
Figura 4.15 - Consistência do concreto (Slump test).....	65
Figura 4.16 - Resistência à compressão axial dos concretos para idades diferentes, em função do teor de substituição do agregado graúdo natural por escória de alto-forno. Valores expressos em média ± desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando $p < 0,05$ (ANOVA; Tukey, $p < 0,05$).66	66
Figura 4.17 - Desenvolvimento das resistências à compressão de concretos preparados a partir de agregados selecionados, (adaptado de Beshr, Almusallam, e Maslehuddin (2002))......	67
Figura 4.18: 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 ± desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando $p < 0,05$ (ANOVA; Tukey, $p < 0,05$)......	69
Figura 4.19 - Resistência à tração por compressão diametral de concretos preparados a partir de agregados selecionados, (adaptado de BESHHR <i>et al</i> , 2002).	70
Figura 4.20 - 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 ± desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando $p < 0,05$ (ANOVA; Tukey, $p < 0,05$).	71
Figura 4.21 – Linha de tendência dos valores médios do módulo elasticidade, aos 28 dias.	71

Capítulo 7

Figura 7.1 - Módulo de elasticidade dos concretos de referência (CR), concretos com 20% (EAF20), 30% (EAF30) e 40% (EAF40) de escória de alto-forno, aos 28 dias	89
Figura 7.2 - Módulo de elasticidade dos concretos de referência (CR), concretos com 20% (EAF20), 30% (EAF30) e 40% (EAF40) de escória de alto-forno, aos 63 dias	90

Lista de Siglas

Símbolo	Significado
<i>ABCP</i>	Associação Brasileira de Cimento Portland
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>ASTM</i>	American Society For Testing and Materials
<i>FGV</i>	Fundação Getúlio Vargas
<i>IAB</i>	Instituto Aço Brasil
<i>IBS</i>	Instituto Brasileiro de Siderurgias
<i>IPT</i>	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo
<i>LEC</i>	Laboratório de Engenharia Civil
<i>MME</i>	Ministério de Minas e Energia
<i>PAC</i>	Programa de Aceleração do Crescimento
<i>PIB</i>	Produto Interno Bruto
<i>SINOBRAS</i>	Siderúrgica Norte Brasil S. A
<i>UFPA</i>	Universidade Federal do Pará

Lista de Abreviaturas

Símbolo	Significado
<i>a/c</i>	<i>Relação água/cimento</i>
<i>AGN</i>	<i>Agregado Graúdo Natural</i>
<i>Al₂O₃</i>	<i>Óxido de alumínio</i>
<i>ANOVA</i>	<i>Análise de Variância</i>
<i>C</i>	<i>Concreto com Agregado Graúdo de Calcário</i>
<i>CA</i>	<i>Concreto Armado</i>
<i>Ca⁺</i>	<i>Íon Cálcio</i>
<i>CaF₂</i>	<i>Perímetro básico de controle</i>
<i>Cal</i>	<i>Calcita</i>
<i>CaO</i>	<i>Óxido de cálcio</i>
<i>CCE</i>	<i>Concreto com Escória</i>
<i>CD</i>	<i>Concreto com Agregado Graúdo de Calcário Dolomítico</i>
<i>CP IV</i>	<i>Cimento Portland pozolânico</i>
<i>CP</i>	<i>Concreto protendido</i>
<i>CP's</i>	<i>Corpos de prova</i>
<i>CPI</i>	<i>Cimento Portland comum</i>
<i>CPV – ARI</i>	<i>Cimento Portland de alta resistência inicial</i>
<i>CQ</i>	<i>Concreto com Agregado Graúdo de Calcário Quartzolítico</i>
<i>CR</i>	<i>Concreto de Referência</i>
<i>C-S-H</i>	<i>Silicato de Cálcio Hidratado</i>
<i>CV</i>	<i>Cinza Volante</i>
<i>EAC</i>	<i>Escória de Aciaria</i>
<i>EAF</i>	<i>Escória de alto-forno</i>
<i>F_c</i>	<i>Resistência à compressão axial (MPa)</i>
<i>f_{ct,sp}</i>	<i>Resistência à tração por compressão diametral (MPa)</i>
<i>Fe₂O₃</i>	<i>Óxido de ferro (III)</i>
<i>FeO</i>	<i>Óxido de ferro (II)</i>
<i>Hem</i>	<i>Hematita</i>
<i>MEV</i>	<i>Microscópio Eletrônico de Varredura</i>
<i>MgO</i>	<i>Óxido de magnésio</i>

<i>mm</i>	<i>Milímetro</i>
<i>MPa</i>	<i>Mega Pascal</i>
<i>Qtz</i>	<i>Quartzo</i>
<i>RPM</i>	<i>Rotações por Minuto</i>
<i>S</i>	<i>Enxofre</i>
<i>SiO₂</i>	<i>Óxido de silício</i>
<i>SiO₄</i>	<i>Tetraóxido de silício</i>
<i>TiO₂</i>	<i>Óxido de titânio</i>

Sumário

1.	Introdução	1
1.1.	Considerações Gerais	1
1.2.	Justificativa	2
1.3.	Objetivos	5
1.3.1.	Objetivo geral	5
1.3.2.	Objetivos específicos	6
1.4.	Estrutura da Dissertação	6
2.	Revisão Bibliográfica	7
2.1.	Concreto: Estrutura e Propriedades	7
2.1.1.	Macroestrutura do concreto	8
2.1.2.	Microestrutura do concreto	9
2.1.3.	Matriz e zona de transição entre a pasta e o agregado graúdo	10
2.1.4.	Influência da zona de transição nas propriedades do concreto	12
2.2.	Agregados	13
2.2.1.	Forma e textura superficial das partículas	15
2.2.2.	Composição granulométrica	16
2.2.3.	Resistência à abrasão	16
2.3.	Propriedades do Concreto	17
2.3.1.	Trabalhabilidade	17
2.3.2.	Resistência à compressão axial	18
2.3.3.	Resistência à tração por compressão diametral	19
2.3.4.	Módulo de elasticidade	20
2.4.	Histórico da Utilização da Escória de Alto-Forno	22
2.4.1.	Histórico brasileiro	22
2.4.2.	Produção da escória de alto-forno	23
2.4.3.	Hidraulicidade das escórias	26
2.4.4.	Composição química das escórias	26
2.5.	Resfriamento da Escória de Alto-forno	28
2.5.1.	Escória de alto-forno granulada	29

2.5.2.	Escória de alto-forno resfriada ao ar ou bruta	29
2.5.3.	Escória de alto-forno peletizada	30
2.5.4.	Utilização da escória de alto-forno como agregado para construção civil	31
3.	Materiais e Métodos	33
3.1.	Planejamento Experimental	33
3.1.1.	Variáveis de resposta	36
3.2.	Caracterização dos materiais	37
3.2.1.	Aglomerante hidráulico	37
3.2.2.	Agregado miúdo	37
3.2.3.	Agregado graúdo natural (seixo)	38
3.2.4.	Escória de alto-forno	39
3.2.5.	Água	40
3.2.6.	Aditivo	40
3.3.	Produção de Concretos	40
3.3.1.	Produção, moldagem e armazenamento dos corpos de prova	41
3.4.	Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	41
4.	Apresentação, Análise de Resultados e Discussão	42
4.1.	Caracterização dos Materiais	42
4.1.1.	Aglomerante hidráulico	42
4.1.2.	Agregado miúdo	43
4.1.3.	Agregado graúdo natural (seixo)	45
4.1.4.	Escória de alto-forno	46
4.1.5.	Aditivo	55
4.2.	Produção de concretos	56
4.3.	Análises em microscopia eletrônica de varredura através de elétrons secundários	59
4.4.	Avaliação das Propriedades do Concreto	63
4.4.1.	Avaliação da Trabalhabilidade	63
4.4.2.	Avaliação da resistência à compressão axial	65
4.4.3.	Avaliação da resistência à tração por compressão diametral	68
4.4.4.	Avaliação do módulo de elasticidade	70

5.	Conclusão e Sugestões	73
5.1.	Conclusão	73
5.2.	Sugestões	74
6.	Referências Bibliográficas	75
7.	Apêndices	83
7.1.	Apêndice A – Resultados dos Ensaios Mecânicos Realizados	83
7.2.	Apêndice B – Figuras do Módulo de Deformação Secante	89
7.3.	Apêndice C – Resultados das Análises Estatísticas Realizadas nos Ensaios Mecânicos.	91

1. Introdução

1.1. Considerações Gerais

O processo de produção e consumo adotado no modelo de desenvolvimento econômico vigente desconsidera, na sua grande maioria, a capacidade limitada dos recursos naturais. Quanto mais avanços tecnológicos, mais recursos naturais, isto é, necessita-se de uma maior quantidade de matéria-prima para produção e oferta da diversidade de bens de consumo à sociedade. Essa cultura consumista demonstra a falta de compromisso e de pertencimento planetário.

O aumento da degradação e dos níveis de poluição ambiental é mundialmente notório, resultante principalmente pela falta de gestão adequada dos resíduos gerados. Para combater tal situação, é necessário um novo agir de cada ser humano, das lideranças e de todos os segmentos da sociedade, estabelecendo novos modelos de gestão dos recursos naturais, bem como do aproveitamento de resíduos provenientes dos mais diversos segmentos.

O Brasil vem vivenciando um processo de inúmeras modificações, no tocante ao desenvolvimento econômico e social. Neste contexto, o setor da construção civil é responsável por grande parcela do produto interno bruto (PIB), sendo um grande consumidor de recursos não renováveis, principalmente os de origem mineral.

De acordo com (JOHN, 2008), a construção civil é o setor responsável pelo consumo de maior volume de recursos naturais, em estimativas que variam entre 15% e 50 % dos recursos extraídos, além de seus produtos serem grandes consumidores de energia, e por estas razões, é de fundamental importância o desenvolvimento de materiais alternativos que atendam a essa atividade.

O setor das atividades industriais vem crescendo rapidamente no mundo. Esse crescimento faz com que a poluição ambiental se alastre, gerando significativos impactos na qualidade de vida das pessoas e principalmente do meio ambiente.

Define-se como poluição qualquer alteração física, química ou biológica que produza modificação no ciclo biológico normal, interferindo na composição da fauna e da

flora do meio (AGUIAR; NOVAES; GUARINO, 2002). Dentre as inúmeras formas de poluição ambiental está a poluição por resíduos industriais, em que se apresentam graves problemas socioeconômicos e ambientais. Estão envolvidos neste problema a geração, o acondicionamento, o manuseio, a coleta, o transporte, o tratamento e a disposição final (JACOMINO *et al.*, 2002).

1.2. Justificativa

De acordo com o Instituto Aço Brasil (IABr, 2014), a produção nacional do aço bruto no ano de 2013 totalizou 34,2 milhões de toneladas, com redução de 1% comparada à do ano anterior. Entretanto, esse volume de produção ainda é significativo, desta forma, deve-se dar uma destinação adequada para os resíduos gerados.

No ano de 2013 as usinas siderúrgicas brasileiras geraram cerca de 17,7 milhões de toneladas de resíduos (IAB, 2014). De acordo com Khan e Shinde (2013), a escória depositada nos pátios siderúrgicos reduz a porosidade e a permeabilidade do solo, gerando acúmulo de água indevido. Uma vez que grandes quantidades destes resíduos são geradas diariamente, estes são considerados problemáticos e perigosos para as usinas e para o meio ambiente. Desta forma, o escoamento deste rejeito apresenta-se como um problema relevante, podendo ser reduzido a partir da utilização deste subproduto na confecção de concretos sustentáveis.

O estado do Pará possui uma economia essencialmente mineradora conforme classificação do Banco Mundial. Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), o estado atingiu em 2009 uma produção de 92 milhões de toneladas de minério de ferro, colocando-o na posição de segundo maior produtor nacional de ferro-gusa, sendo responsável por 25% da produção nacional, ficando atrás apenas do estado de Minas Gerais. No ano posterior o Sindicato das Indústrias de ferro gusa no Pará apresentou uma capacidade instalada de produção do minério de ferro de 2,9 milhões de ton/ano, onde seus principais mercados consumidores são a Ásia, América Latina e América do Norte. O polo industrial do Estado do Pará fica localizado na cidade de Marabá, distante 485 km da capital Belém, sendo formado por nove siderúrgicas, das quais a Siderúrgica Norte Brasil S/A (SINOBRAS) foi a fornecedora da escória de alto-forno (EAF) a ser estudada nesta dissertação.

Ao se analisar os dados expostos acima, conclui-se que no estado do Pará, a produção do ferro gusa utilizado nos altos-fornos a carvão vegetal geram uma quantidade significativa de resíduos siderúrgicos, os quais se não dispostos adequadamente podem se constituir em fontes poluidoras de solo, ar e água.

Com o crescimento da industrialização nos países em desenvolvimento, torna-se emergencial definir uma estratégia para gerenciar os resíduos sólidos produzidos a partir das atividades industriais. Os resíduos sólidos, muitas vezes de forte potencial tóxico, provêm, em quantidade cada vez maior das atividades industriais, da despoluição ou da depuração dos efluentes gasosos ou líquidos. Sua destinação, em grande parte é inadequada, gerando inúmeros problemas ambientais, sendo motivo de matérias veiculadas pela mídia, em geral, de conteúdo mal informado, comprometendo a imagem dos poderes governamentais, assim como das próprias indústrias siderúrgicas (CAMPOS, 2000).

Nesse sentido, as empresas siderúrgicas têm realizado diversas pesquisas em conjunto com universidades e instituições tecnológicas visando o desenvolvimento de alternativas técnicas, ambiental e economicamente viáveis para utilização de resíduos, transformando-os em produtos que podem ser reutilizados no próprio processo de produção do aço ou comercializados como insumos para utilização em outras atividades, a exemplo da construção civil.

Conforme Weinstock e Weinstock (2000), a construção civil pela sua abrangência e pela quantidade de materiais empregados, mão de obra e energia que manuseia, seguramente interfere em grande escala no meio ambiente. Tardamente, a cadeia produtiva demorou a perceber o grau de impacto gerado e atualmente vê-se forçada a mudanças culturais, tecnológicas e de comportamento para atender às demandas de uma sociedade cada vez mais esclarecida e exigente em relação à preservação do meio ambiente.

A cadeia produtiva das indústrias e da construção civil deve promover o desenvolvimento sustentável, buscando novas posturas ambientais com a pesquisa de materiais e tecnologias mais adequadas, sob o ponto de vista ambiental. Estas pesquisas visam à procura por materiais alternativos em substituição aos materiais convencionais, marcado pelo elevado consumo de matéria-prima e energia não renovável.

Por ser o segundo material mais consumido no mundo, o concreto exige uma boa qualidade dos agregados em grande volume. A disponibilidade de agregado graúdo natural (AGN) está se esgotando rapidamente a cada dia, em função da grande demanda no setor de infraestrutura no Brasil.

A situação atual do mercado de agregados é preocupante, em face de sua larga utilização nos investimentos de grande impacto, a exemplo do PAC (Programa de Aceleração do Crescimento), Minha Casa Minha Vida, Jogos Olímpicos de 2016, dentre outros que necessitarão de grande demanda de agregados.

No Brasil, os grandes centros consumidores, representados pelas principais regiões metropolitanas, estão, geralmente, localizados em áreas geologicamente favoráveis com reservas de boa qualidade (FGV. 2007). Atualmente no Estado do Pará, não há oficialmente estudos específicos e atualizados quanto à estimativa de reservas de seixo e areia. No entanto, são conhecidas as regiões com potencial mineral e as jazidas existentes.

O cascalho ou seixo rolado é encontrado em quantidade considerável nas regiões próximas a cidade de Belém. Souza *et al* (2006) define o seixo rolado como sendo um AGN, proveniente da erosão, transporte e decomposição de detritos de desagregação de rochas pelos agentes de intemperismo. Estes agregados, em geral, são mais econômicos, pois não necessitam do processo de britagem e existem em larga escala na natureza, sendo sua extração relativamente fácil. Apresenta-se normalmente depositado em leitos de rios com espessura variável, geralmente em torno de 0,50 a 2,00 metros, constituído por seixos de quartzo de diversos tamanhos, arredondados e subarredondados. Os referidos depósitos estão associados a sedimentos areno-argilosos e argilo-arenosos predominantemente de cores amareladas e avermelhadas. Estes depósitos situam-se numa faixa de direção que se estende do nordeste paraense ao sudeste do estado, abrangendo os municípios de Bragança e Ourém, aflorando ao longo das principais rodovias e nas margens de rios e igarapés (MACAMBIRA, 2001). É importante salientar que a degradação dos leitos dos rios Tocantins e Itacaiúnas provocada pela extração descontrolada de areias e de seixos, está alterando significativamente o ecossistema fluvial e a deterioração dos patrimônios público e privado.

De acordo com (ALMEIDA, G., 2014), a retirada da natureza dos agregados naturais se dá através de jazidas, para o agregado natural seco, e de fundo de rios, para o

agregado natural lavado. A degradação do meio ambiente pela extração deste material está ocasionando inúmeros problemas de assoreamento dos rios, assim como a diminuição da biodiversidade.

Diante disto, fica evidente que o excessivo consumo de agregados demandado pela cadeia produtiva da construção civil, está transformando-se em uma situação cada vez mais alarmante dada as perspectivas de garantia de suprimento futuro. Sendo assim, centros de pesquisas e universidades estão buscando materiais alternativos, que apresentem características técnicas e ambientais compatíveis ou similares aos convencionalmente empregados, atendo às necessidades ambientais de desenvolver-se de forma a não comprometer a capacidade das gerações futuras em fazê-lo também.

Assim sendo, adotou-se como objeto de estudo, a inserção do resíduo proveniente da fabricação do ferro gusa, na confecção de concretos sustentáveis. A partir disto, espera-se que os resultados obtidos nesta pesquisa possam fornecer informações fidedignas para viabilização do seu uso no concreto, tornando, assim, este trabalho importante sobre alguns aspectos. Primeiramente, por proporcionar à cadeia da construção civil a utilização de um novo agregado, possibilitando a produção de um concreto com propriedades semelhantes ao convencional, diminuindo a exploração dos agregados naturais. Posteriormente, buscase colher informações que possam viabilizar tecnicamente o uso deste rejeito, cujo acúmulo está revelando-se um problema sócio, econômico e ambiental às empresas siderúrgicas. Desta maneira, esta pesquisa apresenta-se com considerável importância, visto que poderá apresentar alguns benefícios técnicos da incorporação da escória de alto-forno, assim como transformar-se numa estratégia de sustentabilidade socioambiental para cadeia produtiva do aço e do concreto.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Avaliar sob o ponto de vista do desempenho mecânico: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade, por meio de concretos produzidos com adição de escória de alto-forno a carvão vegetal em substituição parcial ao agregado graúdo natural (seixo).

1.3.2. Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Verificar as diferenças nas propriedades mecânicas dos concretos com teores de 20 %, 30 % e 40 % de EAF.
- b) Avaliar a influência que estes teores exercem sobre a trabalhabilidade do concreto no estado fresco;
- c) 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 presente dissertação está dividida em 7 capítulos, conforme descrito a seguir, e demonstrado na Figura 1.1:

No primeiro capítulo é apresentada a introdução que engloba a contextualização do tema, as justificativas, os objetivos e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo é composto por uma revisão bibliográfica que explana sobre a estrutura e as propriedades do concreto, bem como sobre os agregados, as propriedades que serão avaliadas durante o programa experimental e por fim uma visão geral sobre a escória de alto-forno, a exemplo do processo de produção deste rejeito industrial, das técnicas de resfriamento, características químicas e suas aplicações correntes na indústria da construção civil.

No terceiro capítulo descreve-se toda parte experimental aplicada nesta pesquisa, descrevendo o planejamento e a execução dos ensaios, assim como a caracterização dos materiais utilizados na confecção dos concretos. Neste capítulo definem-se também todas as variáveis de estudo.

No quarto capítulo tem-se a apresentação, análise dos resultados e discussão obtidos no programa experimental, bem como a correlação entre as variáveis e as propriedades avaliadas.

No capítulo cinco são apresentadas as conclusões desta pesquisa, tal qual sugestões para futuras pesquisas que abordem temas semelhantes ao exposto nesta dissertação.

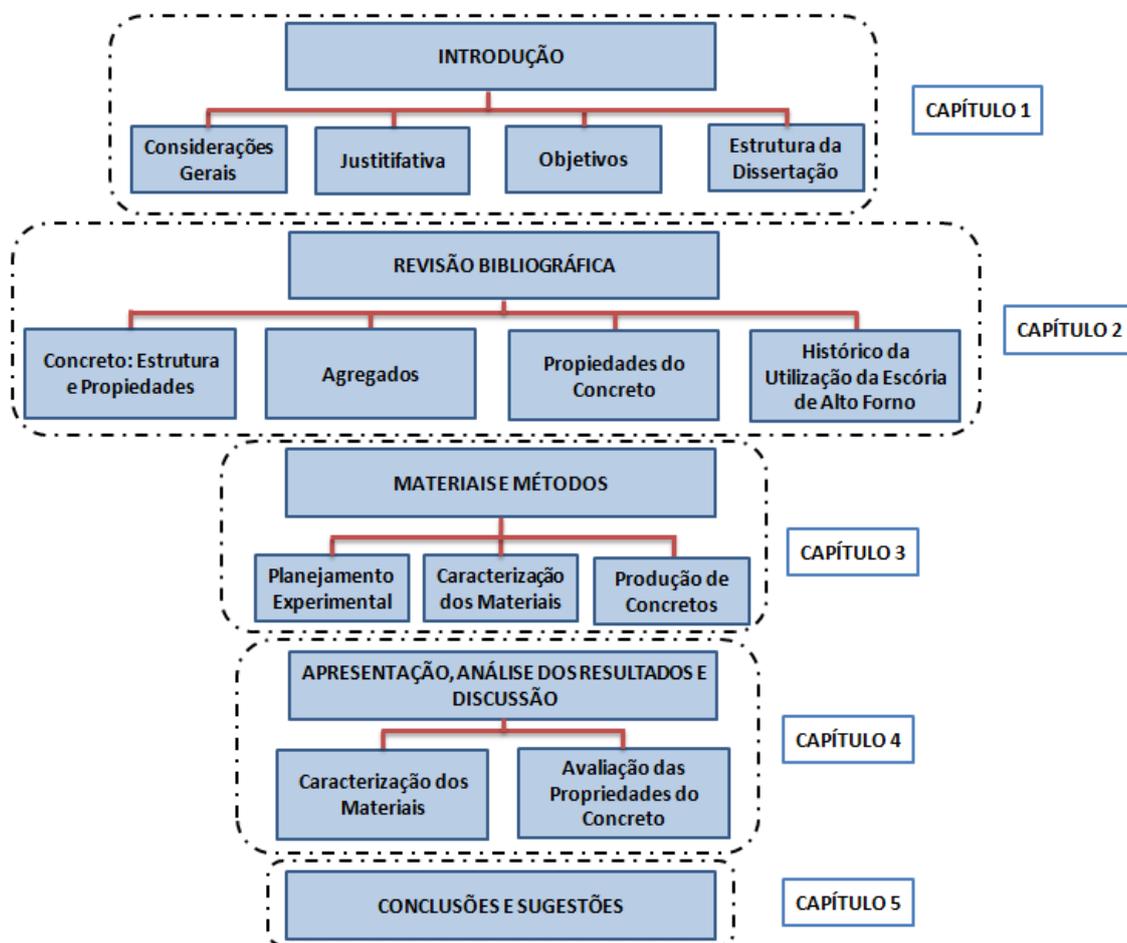


Figura 1.1- Estrutura da dissertação

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Concreto: Estrutura e Propriedades

O concreto é um material compósito comum feito com partículas grandes, onde as fases matriz e dispersa são compostas por materiais heterogêneos. Este material compósito consiste em um agregado de partículas que estão ligadas umas às outras em um corpo sólido através do cimento Portland. Desta forma, os ingredientes que compõem o concreto são o cimento Portland, agregado miúdo (geralmente areia), agregado graúdo (normalmente brita) e água (CALLISTER, 2005).

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.

2.1.1. Macroestrutura do concreto

Macroestruturalmente, o concreto possui dois constituintes principais: a pasta de cimento endurecida e as partículas de agregados graúdos e miúdos. 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 micro estruturais que ocorrem nos compostos formados na hidratação do cimento com o decorrer do tempo (METHA & MONTEIRO, 2014).

A Figura 2.1 demonstra duas fases que podem facilmente ser distinguidas a olho nu, as partículas de agregado com tamanhos e formas variados, e o meio ligante, composto de uma pasta de cimento hidratado constituída por numerosas e diferentes fases.

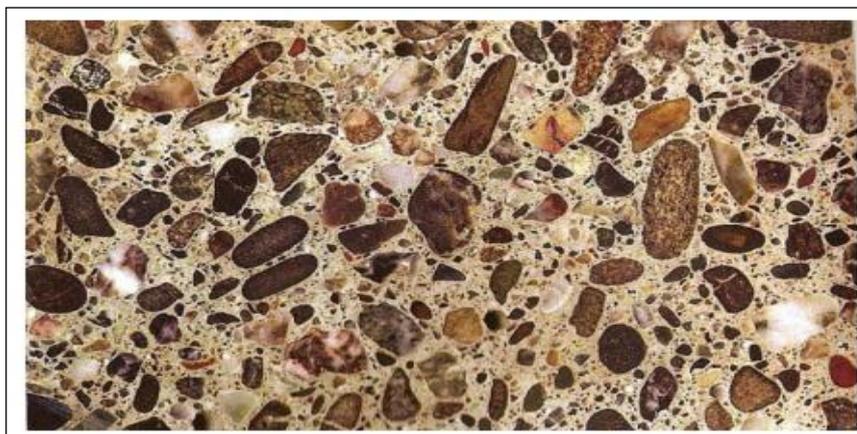


Figura 2.1 - Secção polida de um corpo de prova de concreto (METHA & MONTEIRO, 2014)

Sendo assim, em nível macroscópico o concreto pode ser considerado um material bifásico, composto por partículas de agregado dispersas em uma matriz cimentícia.

2.1.2. Microestrutura do concreto

O concreto de cimento Portland é um material poroso, que apresenta uma estrutura bastante heterogênea e complexa. 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 (Figura 2.2):

- Pasta: geralmente constituído por pasta de cimento Portland, tem como principal função envolver os agregados, preenchendo os vazios formados e possibilitar ao concreto a trabalhabilidade adequada para sua aplicação;
- 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;
- 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, conseqüentemente, exerce uma influência muito maior sobre o comportamento mecânico do concreto do que pode ser esperado pela sua dimensão.

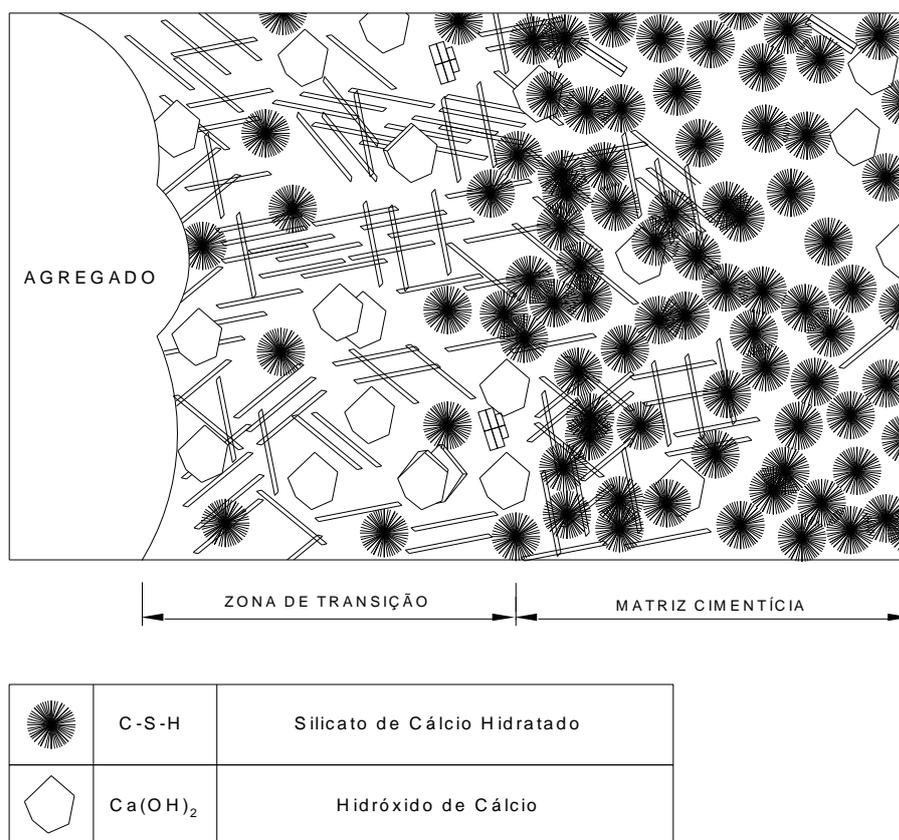


Figura 2.2 - Representação esquemática da microestrutura do concreto (adaptado de METHA & MONTEIRO, 2008)

Ao se analisar a microestrutura de um concreto, por intermédio de um microscópio, observa-se que a pasta de cimento em contato com o agregado possui características diferentes do restante da pasta, podendo ser considerada mais uma fase constituinte do concreto, denominada de zona de transição.

O conhecimento dos elementos da microestrutura do concreto é essencial no entendimento de propriedades importantes do concreto, tais como a resistência à compressão, módulo de elasticidade, retração, porosidade e durabilidade.

2.1.3. Matriz e zona de transição entre a pasta e o agregado graúdo

A matriz de pasta do cimento que envolve os agregados é composta por diferentes tipos de compostos hidratados do cimento. Os mais importantes são os silicatos hidratados,

C-S-H, que se assemelham a estruturas fibrosas, o hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , que cristaliza em grandes placas hexagonais superpostas e por fim a etringita, que se solidifica no início da pega na forma de agulhas.

A zona de transição caracteriza-se por ser uma região com maior porosidade e heterogeneidade que o restante da pasta. Esta porosidade é decorrente da elevação na relação água/cimento na mistura em virtude do filme de água em que se forma em volta do agregado durante a exsudação e sedimentação do concreto. Os maiores espaços permitem a formação de grandes cristais de Ca(OH)_2 (portlandita) com o seu eixo orientado perpendicularmente ao agregado, produzindo planos preferenciais de ruptura, como pode ser visto na Figura 2.3.

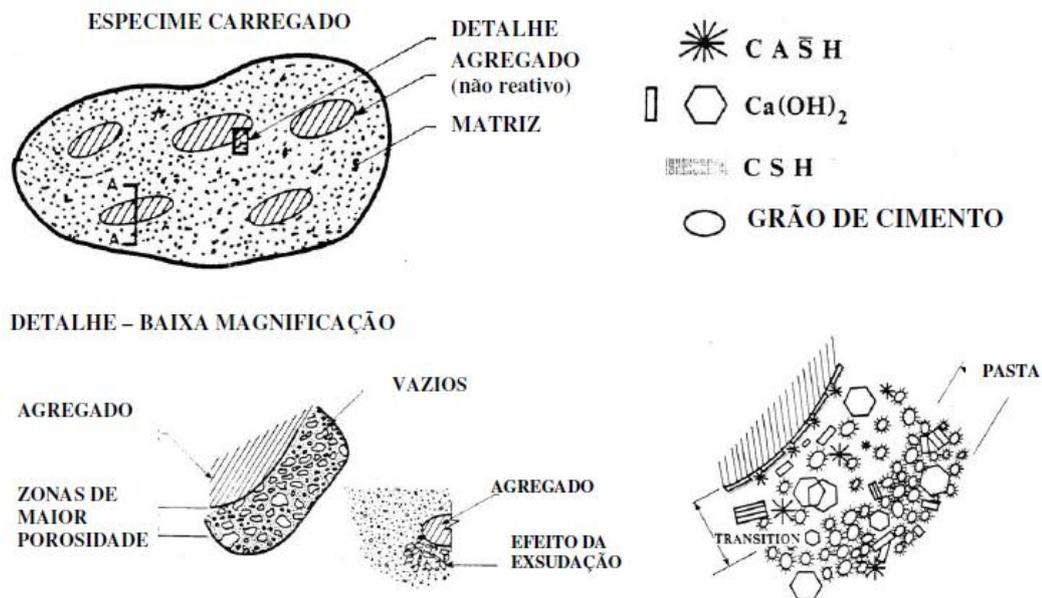


Figura 2.3 - Representação esquemática da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado (MONTEIRO, 1985)

A zona de transição estará sujeita à micro fissuração muito facilmente. A Figura 2.4 expõe o caminho das microfissuras para diferentes idades do concreto, utilizando ou não agregado reativo.

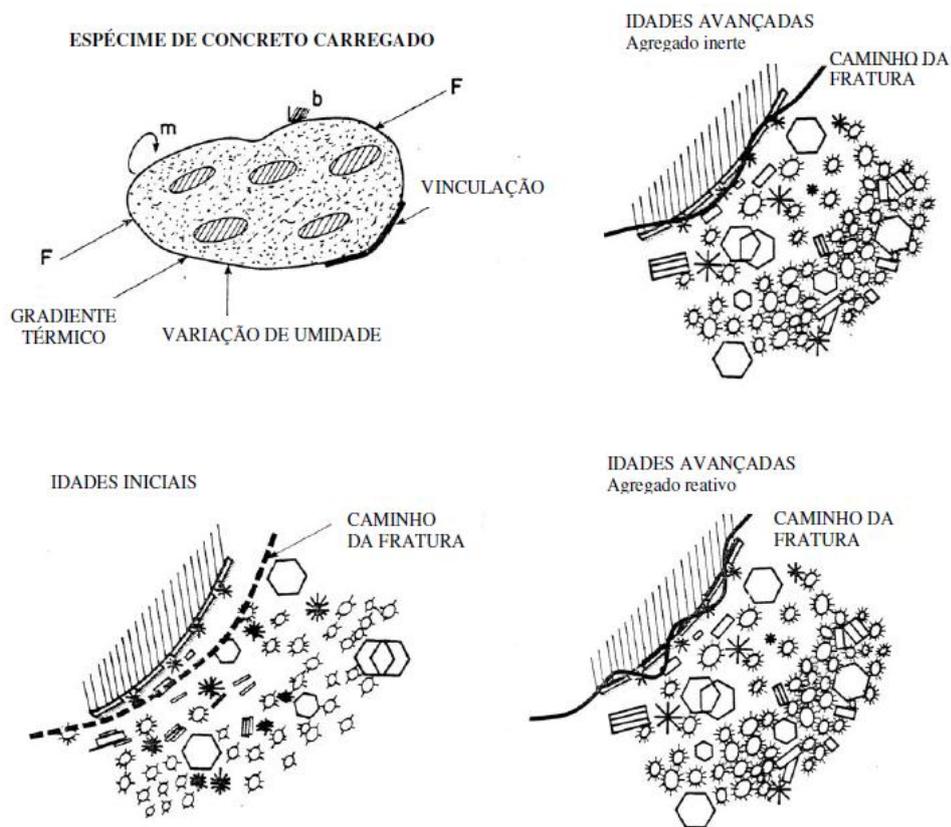


Figura 2.4 - Representação esquemática do caminho de propagação de fissuras na zona de transição (MONTEIRO, 1985).

Quando o concreto é submetido ao carregamento, nas primeiras idades, as microfissuras tendem a se propagar na zona de transição, em função da mesma apresentar um alto índice de porosidade. No entanto, com o tempo a zona de transição é preenchida com produtos de hidratação e as fissuras passam a se propagar pelo filme de hidróxido de cálcio (MONTEIRO, 1985).

A relação entre a quantidade de água e cimento (relação a/c) deve ser a menor possível, dentro das características exigidas pelo concreto e pela qualidade dos materiais disponíveis para sua confecção. A relação a/c afeta diretamente a zona de transição. Quanto maior a relação água/cimento, mais poroso é o concreto e, conseqüentemente, menos resistente é a ligação entre a pasta de cimento hidratada e o agregado.

2.1.4. Influência da zona de transição nas propriedades do concreto

A zona de transição, geralmente o “elo mais fraco da corrente”, é considerada a fase de resistência limite no concreto. É em função do surgimento da zona de transição que

o concreto rompe a um nível de tensão consideravelmente inferior a resistência dos dois constituintes principais (pasta e agregados).

Em níveis não muito elevados de energia para estender as fissuras já existentes na zona de transição, a partir de tensões de 40 % a 70 % da resistência última, já se percebe incrementos de deformação por unidade de força aplicada. A partir de níveis de tensão superiores a 70 % da carga última já se formam novas fissuras, que vão se propagando gradativamente até unirem-se às fissuras presentes na zona de transição. Este fato, que pode levar o material à ruptura. Sob cargas de tração, as fissuras se propagam a um nível consideravelmente mais baixo. Com relação ao módulo de elasticidade, a estrutura da zona de transição, principalmente o volume de vazios considerado e a presença de microfissuras, provoca grande interferência. No concreto, a zona de transição serve de ponte entre a matriz e o agregado graúdo. Mesmo que os materiais constituintes (pasta e agregado graúdo) possuam elevada rigidez, a rigidez do material composto pode ser baixa em função da presença de vazios e das microfissuras presentes na zona de transição, as quais não permitem transferência de resistência (METHA & MONTEIRO, 1994).

2.2. Agregados

Agregados são relativamente baratos e não entram em reações químicas complexas com a água; portanto, tem sido usualmente tratados como um material de enchimento inerte no concreto. Entretanto, devido à crescente compreensão de muitas propriedades importantes do concreto, este ponto de vista tradicional dos agregados como materiais inertes estão sendo seriamente questionados.

De acordo com a NBR 9935 (ABNT, 2011), agregado é um material granular, geralmente inerte com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa e concreto. Como citado acima, o agregado não se apresenta como um material exclusivamente inerte, pois as propriedades físicas, térmicas e, em alguns casos químicos têm influência no desempenho do concreto (NEVILLE, 1997).

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).

Responsáveis em média por 75 % do volume de concreto, os agregados influenciam em inúmeras propriedades do concreto. As características dos agregados que são importantes para a tecnologia do concreto incluem porosidade, composição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial das partículas, resistência à compressão, módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias presentes. Estas características derivam da composição mineralógica da rocha matriz (que é afetada pelos processos geológicos de formação da rocha), das condições de exposição às quais a rocha foi submetida antes de gerar o agregado, e dos tipos de operação equipamento usados na produção do agregado.

- Características dos agregados e sua importância

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.

- Influência dos agregados nas propriedades do concreto

A resistência à compressão, a resistência à abrasão e o módulo de elasticidade dos agregados são propriedades inter-relacionadas, que são influenciadas pela porosidade. A resistência do concreto não depende exclusivamente da resistência mecânica dos agregados, mas também, de sua absorção e características de aderência. Segundo (NEVILLE, 1997), o módulo de elasticidade do concreto é diretamente proporcional ao módulo dos agregados graúdos e o percentual que o constitui. O módulo de elasticidade dos agregados também influencia na retração e fluência do concreto. Uma considerável diferença entre o módulo de elasticidade do agregado e da pasta de cimento hidratada irá

propiciar o desenvolvimento de microfissuras na interface agregado-matriz, isto é, zona de transição do concreto (NEVILLE, 1997).

2.2.1. Forma e textura superficial das partículas

A forma e a textura das partículas dos agregados influenciam mais nas propriedades do concreto no estado fresco do que endurecido. Comparadas às partículas lisas e arredondadas, as partículas que apresentam textura áspera, angulosas requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis, e, portanto, aumentam o custo final do concreto.

De acordo com (ISAIA, 2007), a forma dos agregados está diretamente relacionada à sua geometria tridimensional. No entanto, é difícil representar tridimensionalmente corpos irregulares, sendo assim é mais conveniente classificá-los em função de características geométricas bidimensionais, a exemplo do alongamento, achatamento, cubicidade, esfericidade, angulosidade, entre outros.

As partículas alongadas, em forma de lâmina, devem ser evitadas ou limitadas a no máximo 15%, em massa, do total do agregado. Este critério se aplica não apenas para agregado graúdo, mas também para areias artificiais (resultantes da britagem de rochas), que contêm grãos alongados e produz concreto muito áspero, os agregados devem ser relativamente, isentos de partículas alongadas e lamelares e o índice de forma deve estar abaixo de 3, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Methta e Monteiro (2014) citam que concretos com partículas de textura áspera, angulosa e alongada carecem de um volume maior de pasta de cimento que partículas arredondadas e lisas. Esse aumento no volume de pasta afeta diretamente no custo final do produto.

Caso o concreto seja constituído de partículas menos angulosas, este apresentará ângulos de atrito interno relativamente baixo, conduzindo a um melhor arranjo das partículas e, conseqüentemente, implicará em melhores níveis de trabalhabilidade e compactidade (COUTINHO, 2000).

2.2.2. Composição granulométrica

Ao se analisar a granulometria dos agregados, verifica-se que os agregados que possuem maiores dimensões máximas características tendem a gerar um maior índice de microfissuras na zona de transição entre o agregado graúdo e a pasta de cimento, o que por sua vez prejudica a permeabilidade e o desempenho mecânico do concreto. Ressalta-se que a micro fissuração na zona de transição apresenta um efeito mais danoso na resistência à flexão e no módulo de deformação do que na resistência do concreto à compressão axial (METHA & MONTEIRO, 2014). Composições granulométricas racionais garantem uma melhor trabalhabilidade do concreto no estado fresco, e uma menor permeabilidade no concreto endurecido, aumentando seu desempenho mecânico e durabilidade frente a agentes agressivos.

2.2.3. Resistência à abrasão

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a resistência à abrasão se inter-relaciona com propriedades tais como resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade.

O ensaio de Abrasão Los Angeles permite aferir a resistência ao desgaste sofrido pelo material, quando submetido a um determinado número de revoluções na máquina Los Angeles, juntamente com uma carga abrasiva à velocidade de 30 a 33 RPM NBR NM 51 (ABNT, 2001). O valor obtido pelo ensaio serve como parâmetro de qualidade do material a ser inserido no concreto, visto que representa a capacidade de fragmentação por choque e atrito das partículas graúdas.

No caso dos agregados provenientes de resíduos siderúrgicos, apesar de ainda não existir uma referência normativa que estabeleça o limite máximo de perda de massa por resistência à abrasão, seu conhecimento é de suma importância, pois interfere nas principais propriedades do concreto.

2.3. Propriedades do Concreto

2.3.1. Trabalhabilidade

As propriedades do concreto no estado plástico são de suma importância, pois para produzir concretos endurecidos de boa qualidade é necessário garantir deste, também no estado fresco.

De acordo com a ASTM C 125 (1995), a trabalhabilidade do concreto é definida como sendo a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade. O termo manipular inclui as operações referentes às primeiras idades como lançamento, adensamento e acabamento.

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 (METHA & MONTEIRO, 2014). Coutinho (1997b) define trabalhabilidade como a “maior ou menor com que o concreto é transportado, lançado, adensado e acabado e a maior ou menor facilidade com que se desagrega ou segrega durante essas operações é designada pelo termo genérico trabalhabilidade”. Segundo Neville (2013), a trabalhabilidade pode ser definida como a quantidade de trabalho interno útil necessário à obtenção do adensamento total. Este trabalho interno útil é uma propriedade física inerente do concreto, sendo o trabalho ou energia suficiente para vencer o atrito interno entre as partículas individuais do concreto.

De acordo com Coutinho (1997b), existem várias propriedades físicas que interferem na trabalhabilidade dos concretos. Pode-se citar: o ângulo de atrito, coesão, viscosidade (interferem na maior ou menor mobilidade da massa; a massa específica que interfere na compactação; a segregação e exsudação que interferem na estabilidade da mistura que constitui o concreto fresco). Em contrapartida, Metha e Monteiro (2014) apontam que essas propriedades físicas dos concretos são governadas por características

físicas e químicas dos materiais que dão origem às misturas. A trabalhabilidade das misturas de concreto é afetada pelo consumo de água ou de cimento, pela granulometria do agregado e por outras características físicas, pelos aditivos, adições e pela perda de abatimento.

No que diz respeito ao consumo de água, misturas com consistência muito fluida tendem a segregar e exsudar, afetando adversamente o acabamento e no caso de misturas com consistência muito seca tornam-se difíceis de serem lançadas e adensadas, e o agregado graúdo pode segregar no lançamento. Com relação ao consumo do cimento, este se apresentar uma redução considerável, pode produzir misturas ásperas com acabamento insatisfatório. As misturas de concreto com consumo muito elevado de cimento, ou alta proporção de finos, apresentam excelente coesão, no entanto tendem a ficar viscosas. Quando a quantidade de água de uma mistura de concreto é mantida constante, a incorporação de aditivos redutores de água aumenta o abatimento (aumenta a fluidez). (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Partículas mais finas necessitam de mais água para molhagem de suas grandes superfícies específicas, enquanto a forma irregular e textura de um agregado anguloso demandam mais água que um agregado arredondado (NEVILLE, 2013).

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).

2.3.2. Resistência à compressão axial

A resistência de um material é definida como capacidade para resistir à tensão sem se romper. No concreto a resistência está relacionada à tensão necessária para causar a ruptura, sendo definida como a tensão máxima que a amostra de concreto pode suportar.

A resistência à compressão do concreto geralmente é considerada como sendo o parâmetro mais importante. Diversas outras propriedades do concreto (módulo de

elasticidade, estanqueidade ou impermeabilidade e resistência a intempéries), estão relacionadas com a resistência à compressão. No projeto de estruturas de concreto o valor da resistência à compressão, aos 28 dias, é mundialmente aceito como um índice da resistência (METHA e MONTEIRO, 2014).

A resistência à compressão simples é a propriedade mecânica mais importante do concreto, não somente porque o concreto trabalha predominantemente à compressão, como também porque fornece outros parâmetros físicos que podem ser relacionados empiricamente à resistência à compressão. (CORDEIRO, 2013)

Segundo COUTINHO (1997a), a resistência do concreto só não é influenciada pela resistência do agregado graúdo caso os seus valores sejam muito superiores aos valores de resistência do concreto, como por exemplo, valores de resistência das rochas maiores que 60 a 70 MPa. Caso contrário, a resistência dos agregados deve ser levada em consideração na avaliação dos fatores que influenciam a resistência final dos concretos.

A porosidade (volume relativo de poros ou vazios na pasta de cimento) influencia diretamente na resistência do concreto. Os vazios podem ser considerados como causa de diminuição da resistência. O agregado também pode afetar na capacidade de resistência do concreto, através da presença de falhas em sua estrutura, além de ser causador de micro fissuração na interface com a pasta de cimento (NEVILLE, 2013).

Sekaran, Palaniswamy e Balaraju (2015), realizaram um estudo para avaliar o desempenho mecânico do concreto com agregado convencional (brita granítica) e 30 % de cinza volante em substituição ao cimento Portland, em comparação ao concreto com substituição de 50 % de brita granítica por escória de aciaria, mantendo a mesma substituição no aglomerante, obteve aos 7, 28 e 90 dias valores de resistência superiores de 47, 15 e 12,04 % respectivamente em relação ao concreto com 100 % de agregado natural.

2.3.3. Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração dos concretos geralmente apresenta-se como uma característica mecânica secundária, uma vez que é sabido que o concreto não se apresenta como um bom material para resistir aos esforços de tração das estruturas. No entanto, ao se

fazer um estudo criterioso das propriedades do concreto, principalmente quando são utilizados novos materiais, esta propriedade mecânica não pode ser desprezada.

ALIZADEH *et al* (1996), realizou uma pesquisa para avaliar o efeito da escória proveniente da produção do aço no concreto endurecido. Os resultados experimentais indicaram que os concretos confeccionados com a escória obtiveram valores mais elevados de resistência à compressão axial, resistência à flexão e módulo de elasticidade, em comparação a concretos confeccionados com os agregados naturais.

2.3.4. Módulo de elasticidade

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).

O módulo de elasticidade do concreto é um dos parâmetros utilizados no cálculo estrutural e, sob o aspecto de projeto, é muito importante conhecer as propriedades elásticas do concreto para que se conheçam as deformações dos elementos estruturais que o concreto compõe.

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).

O concreto convencional é um material compósito que possui um meio aglomerante (cimento Portland) no qual são adicionados materiais granulares (agregados miúdos e graúdos), mais a água (METHA & MONTEIRO, 2008). Em função da sua composição heterogênea, o concreto possui um módulo de elasticidade diferente dos

metais como o aço e o ferro, pois ele varia em função das matérias-primas que o compõe, diretamente relacionados com a resistência mecânica da peça estrutural.

O estudo do módulo de elasticidade do concreto é bastante complexo, pois este é um material elástico dentro de certos limites (NEVILLE, 1997). Há dois tipos de deformações, que são a deformação elástica e plástica. Na primeira, as deformações desaparecem quando o carregamento é cessado; já na segunda, ocorre um deslocamento permanente dos átomos do material (VAN VLACK, 1970).

Metha e Monteiro (2008), afirmam que a curvatura da relação tensão – deformação do concreto (Figura 2.5) deve-se à presença da zona de transição localizada entre o agregado graúdo e a pasta de cimento. Essa zona possui características que influenciam no módulo de elasticidade do concreto, tais como a presença de espaços vazios, concentração de hidróxido de cálcio e as microfissuras. A zona de transição está sujeita ainda à porosidade controlada por fatores como a relação água-cimento, distribuição granulométrica do agregado, interação química entre o agregado e a pasta de cimento e o grau de hidratação.

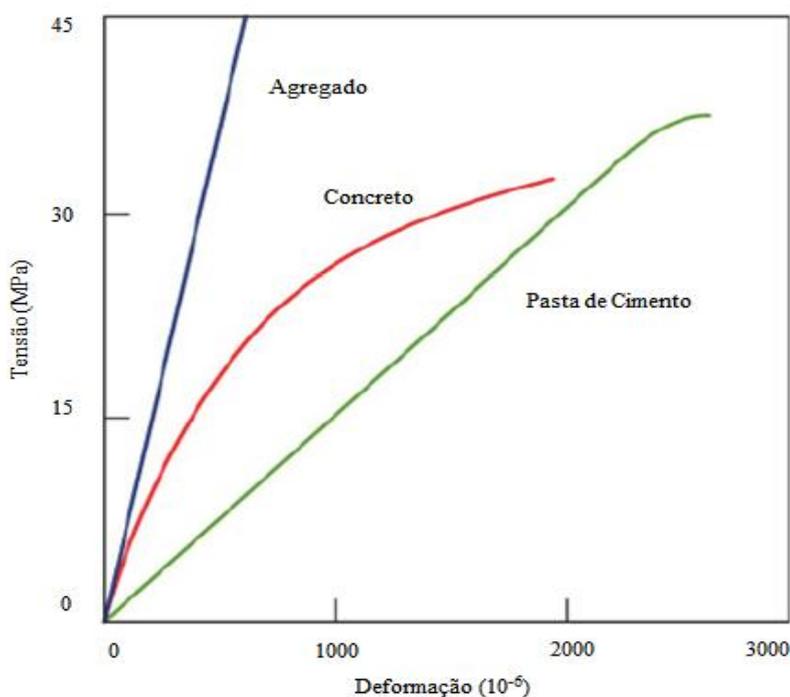


Figura 2.5 - Comportamentos típicos de tensão – deformação da pasta de cimento, agregado e concreto (Adaptado de Metha e Monteiro, 2008)

De acordo com a Figura 2.5, o agregado e a pasta de cimento submetido separadamente ao carregamento uniaxial apresentam comportamentos lineares, desta maneira é possível verificar a importância dos agregados durante a avaliação do módulo de elasticidade do concreto. Já o comportamento do concreto não permanece com as características lineares do agregado e da pasta de cimento e, na medida em que o carregamento aumenta a curvatura tende a ficar mais acentuada.

O módulo de elasticidade pode ser classificado em função do método adotado no ensaio realizado para sua determinação, esta classificação está dividida em estático, dinâmico, à flexão e a tração. Neste estudo empregou-se o módulo de elasticidade estático.

KAMA *et al* (2002), apresentou um estudo sobre o uso da EAF, que após passar por britamento e peneiramento, apresentou granulometria semelhante a do AGN. Os resultados mostraram que as propriedades mecânicas do concreto endurecido, tais como compressão e flexão foram mais elevadas para o concreto com adição de escória em comparação ao concreto confeccionado apenas com agregado natural. Além disso, a utilização deste resíduo industrial melhorou as propriedades elásticas da peça estrutural, através do aumento no módulo de elasticidade e diminuição na razão de Poisson.

2.4. Histórico da Utilização da Escória de Alto-Forno

2.4.1. Histórico brasileiro

O primeiro cimento produzido no Brasil foi em 1892, pelo Engenheiro Louis Nóbrega, por um período de três meses. Várias outras tentativas ocorreram sem sucesso. No ano de 1926 foi inaugurada no Brasil a Companhia Brasileira de cimento Portland, na cidade de Perus, no estado de São Paulo. Esta data foi um marco para indústria brasileira de cimento. Nesta época, o Brasil produzia 13 mil toneladas anuais de cimento e importava 400 mil toneladas. Em 1929, o Brasil já produzia 96 mil toneladas de cimento (MASSUCATO, 2005).

No Brasil, a fabricação do cimento com escória foi iniciada em 1952, com 72 mil toneladas pela Cimento Tupi S.A, localizada em Volta Redonda no estado do Rio de Janeiro, utilizando 30% de escória proveniente da Companhia Siderúrgica Nacional e no ano de 1954, o teor foi aumentado para 50% (BATAGIN e ESPER, 1988).

Somente em 1977, que foi admitido o uso de até 10% de escória no cimento Portland comum através da NBR 5732, antiga EB-1, e em 1991 foi normalizado o cimento Portland de alto-forno.

Atualmente, o uso da escória de alto-forno, como adição ao cimento Portland ou como constituinte, está consagrado no mundo todo, haja vista as vantagens que oferece relativamente à economia de energia, baixo custo por se tratar de um resíduo siderúrgico industrial e pelas propriedades específicas superiores ao cimento Portland comum (ALMEIDA, J., 2009).

Segundo o relatório de Sustentabilidade 2014 do IBS – Instituto Brasileiro de siderurgias, em 2013, a geração média de resíduos (pós, lamas e agregados siderúrgicos) pelo setor foi equivalente a 594 kg por tonelada de aço produzido, dos quais a escória de alto-forno representa 37% e a escória de aciaria (EAC) 29%. Deste modo, a escória de alto-forno representa a maior parcela de geração de coprodutos e resíduos. A produção do cimento Portland e a construção civil figuram como as principais aplicações da escória de alto-forno (Figura 2.6).

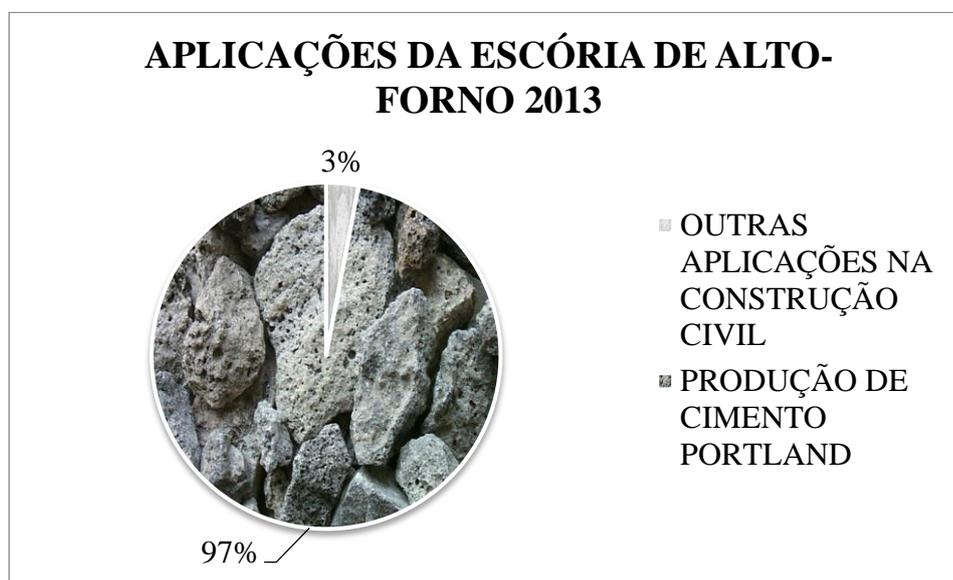


Figura 2.6 – Aplicações da escória de alto-forno (Relatório de Sustentabilidade 2014 do IBS).

2.4.2. 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 (minério de ferro + impurezas) e dos fundentes (coque ou carvão vegetal), através de reações químicas formam a escória. Além de aluminossilicatos cálcicos, ocorrem secundariamente a formação de sulfetos de cálcio e manganês e óxidos de ferro e manganês (MASSUCATO, 2005).

Com a utilização de fundentes (CaO, MgO, CaF₂ e em alguns casos, um fundente ácido SiO₂) é possível reduzir o ponto de fusão da ganga e, desta forma, por meio de reações químicas, a um temperatura entre 1350°C e 1500°C, obter a escória líquida, que pode ser facilmente separada do metal em função da sua fusibilidade, atividade química, poder de dissolução e baixa densidade (DAL MOLIN *et. al.*, apud. SILVA, 2005).

Os combustíveis utilizados no alto-forno podem ser o coque e o carvão vegetal. Ambos são fontes de carbono, no entanto existem diferenças básicas entre os processos, a exemplo da origem do carvão vegetal e do coque (ALMEIDA, J., 2009).

O carvão vegetal é proveniente da carbonização da madeira com um teor de carbono fixo (entre 56% e 75%) e o coque é proveniente do carvão mineral com teor de carbono fixo em torno de 88% (JACOMINO *et al.*, 2002).

Em função das diferenças de propriedades existentes entre o coque e o carvão vegetal, o alto-forno também irá apresentar algumas diferenças, a exemplo do seu tamanho.

O uso do carvão vegetal limita o tamanho do forno porque este produto não suporta altas pressões de carga. A indústria siderúrgica se caracteriza por ter uma elevada economia de escala. Assim sendo, este fator técnico favorece a siderúrgica à coque. Entretanto, o coque tem que ser importado, pois o carvão nacional não apresenta qualidade satisfatória (SOARES, 1982).

A Tabela 2.1 apresenta as principais diferenças entre o alto-forno à carvão vegetal e a coque, assim como a Figura 2.7 apresenta esquematicamente um alto-forno.

Tabela 2.1 - Dados comparativos entre o alto-forno à carvão vegetal e o alto-forno a coque (JACOMINO *et al.*, 2002)

Descrição	Coque	Carvão vegetal
Produção	2000 a 1200 t/dia	40 a 1200 t/dia
Diâmetro do cadinho	8 a 14 m	1,5 a 6 m
Altura do forno	~32 m	~16 m
Produtividade	> 2 t / dm ³	1,6 a 2 t / dm ³
Volume de escória	250 a 300 kg/t gusa	100 a 150 kg/t gusa
(CaO/SiO ₂) da escória	> 1	< 1

A figura 2.7 representa esquematicamente a produção de ferro gusa e geração da EAF, assim como se observa no cadinho situado na parte inferior do forno, dois líquidos separados por diferença de densidade: o gusa apresenta uma densidade acima de 7 g/cm³ e a escória tem uma densidade menor, cerca de 2,8 g/cm³. Logo, a escória flutua no topo do ferro-gusa e pode ser drenada separadamente em intervalos regulares (MASSUCATO, 2005).

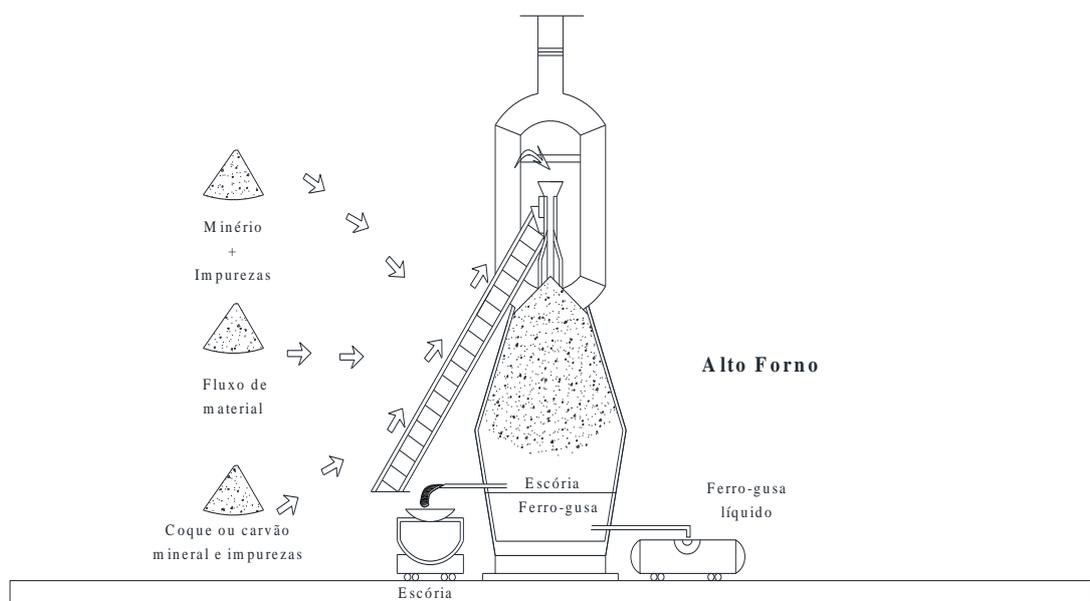


Figura 2.7 - Representação esquemática de um alto-forno (adaptado de JACOMINO *et al.*, 2002)

Os principais constituintes da escória de ferro são: óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), que representam cerca de 95% da composição desse material. Elementos secundários como óxidos de manganês e ferro também fazem parte da composição. As características físicas como densidade, porosidade e tamanho da partícula estão diretamente ligadas ao tipo de resfriamento da escória e a sua composição química. Outro fator preponderante é o poder aglomerante da escória, que depende da relação entre a quantidade dos compostos SiO_2 , CaO e MgO presentes na escória. Este poder aglomerante é definido como reatividade hidráulica (SILVA, 2006).

2.4.3. Hidraulicidade das escórias

Segundo (MARQUES, 1994), a atividade hidráulica da escória granulada de alto-forno à carvão vegetal ou à coque, irá depender de vários fatores, a exemplo da composição química, grau de vitrificação, tipo de resfriamento, estrutura cristalina, composição mineralógica, granulometria, superfície específica, micro heterogeneidade e os defeitos superficiais.

Salienta-se que a composição química e o grau de vitrificação são os fatores de que mais dependem à atividade hidráulica das escórias (BATAGIN e ESPER, 1988).

2.4.4. Composição química das escórias

A composição química das escórias está relacionada à homogeneidade da escória líquida, a sua elevada capacidade de dessulfuração e a baixa viscosidade (MASSUCATO, 2005).

A composição química, assim como a estrutura física das escórias de alto-forno, podem variar de acordo com os constituintes e proporções dos minerais utilizados, fundentes e outras matérias primas, estado de pureza do material a ser fabricada, eficiência de operação do forno, métodos de resfriamento e das diferenças nos processos de fabricação. Desta forma, do ponto de vista químico, este rejeito industrial tem uma composição que requer atenção especial dos metalurgistas, haja vista que desvios nos processos podem causar demandas significativas de energia e custos adicionais (ALMEIDA, G., 2014).

De acordo com SILVA, 2005 apud. SAMENT esta reatividade hidráulica depende da composição química, fase vítrea do resíduo e da granulometria do grão da escória.

Este índice de hidraulicidade ou módulo de basicidade pode ser calculado da seguinte forma:

$$V = \frac{\% CaO}{\% SiO_2} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

V = Índice de Basicidade;

%CaO = Porcentagem de óxido de cálcio;

%SiO₂ = Porcentagem de óxido de silício.

Assim, tem-se que se:

V ≥ 1 = Escória básica

V < 1 = Escória ácida

Vários autores correlacionam a composição química das escórias com o desenvolvimento das propriedades hidráulicas. Sendo assim, a composição química é adotada como o método mais usual. Em linhas gerais, quanto mais básica, mais hidráulica será a escória.

A Tabela 2.2 apresenta a composição química média das escórias de alto-forno básicas e ácidas produzidas no Brasil e, como referência, a do cimento Portland.

Tabela 2.2 – Composição química típica das escórias de alto-forno e do cimento Portland (JOHN, 1995)

Composição química	Escória básica (BATAGGIN & ESPER, 1988)	Escória ácida (adaptado de SOARES, 1982)	Cimento Portland (TAYLOR, 1990)
CaO	40-45	24-39	66
SiO ₂	30-35	38-55	22
Al ₂ O ₃	11-18	8-19	5
MgO	2,5-9	1,5-19	1
Fe ₂ O ₃	0-2	0,4-2,5	3
FeO	0-2	0,2-1,5	-
S	0,5-1,5	0,03-0,2	-
CaO/SiO ₂ (média)	1,31	0,68	3

Os óxidos mais importantes na composição química da escória de alto-forno são CaO, SiO₂, Al₂O₃ e MgO, os quais representam 95% a 96% do total de óxidos (ALMEIDA, G., 2014).

2.5. Resfriamento da Escória de Alto-forno

A partir do processo de resfriamento utilizado, tem-se a geração de escórias com diferentes propriedades e aplicações.

MARQUES (1994) comenta que a temperatura da escória líquida dentro do alto-forno e as condições de resfriamento são fatores que modificam as valências de coordenação e as energias de ligação das escórias e, consequentemente, sua reatividade.

Quanto à forma de resfriamento, a escória de alto-forno classifica-se como:

- Escória de alto-forno granulada;
- Escória de alto-forno resfriada ao ar ou bruta;
- Escória de alto-forno peletizada.

2.5.1. Escória de alto-forno granulada

A granulação da escória de alto-forno foi originalmente introduzida por volta de 1853 por Lange, na Alemanha, e visava facilitar a sua remoção das siderúrgicas (JOHN, 1995).

A escória de alto-forno granulada é obtida pelo resfriamento rápido da escória líquida numa estrutura química vitrificada, pois jatos de água em alta pressão são lançados diretamente na saída da escória fundida. Nesse processo a escória se solidifica rapidamente, o que impede a formação de núcleos cristalinos, permitindo o surgimento de propriedades altamente reativas.

A escória resfriada rapidamente apresenta-se como um material granular, de formato anguloso, textura superficial áspera e coloração esbranquiçada, amarelada, acinzentada ou acastanhada. A distribuição granulométrica deste resíduo industrial é similar a de uma areia natural fina. Quanto maior a rapidez que se processa o resfriamento, maior será o grau de amorfização e maior potencial hidráulico. Impedindo a formação de núcleos cristalinos, o que mantém as características hidráulicas necessárias para produzir, por ativação ou combinação com a cal liberada pela hidratação do clínquer, produtos aglomerantes similares aos gerados pelo cimento Portland, com vasta utilização na produção de agregados graúdo e miúdo, argamassas, painéis, tijolos e blocos de vedação vertical, além de pré-fabricados e artefatos de concreto e, principalmente como adição a cimentos e concretos (SILVA, 2005).

2.5.2. Escória de alto-forno resfriada ao ar ou bruta

A escória resfriada ao ar é formada através da perda lenta de calor num poço ao ar livre, originando um produto maciço e cristalizado, que depois de devidamente britado, possui composição granulométrica semelhante a de um agregado graúdo convencional (METHA & MONTEIRO, 2008).

No que tange às características físicas a escória de alto-forno bruta apresenta cavidades internas em sua superfície, grãos com o formato indefinidos tendendo à partículas lamelares ou alongadas, além de possuírem uma natureza vesicular e áspera, o que lhe confere uma maior superfície específica quando comparadas a outros agregados

mais lisos. Este resíduo industrial apresenta boa resistência à desintegração frente às condições climáticas, a líquidos corrosivos e às mudanças bruscas de temperatura (ALMEIDA, G., 2014).

A escória resfriada ao ar livre pode ser considerada como um material inerte, pois ao produzir a sua própria cristalização os óxidos perdem energia interna, comprometendo as propriedades aglomerantes. Em função da sua elevada dureza e resistência à abrasão este tipo de escória pode ser aplicada como agregados para construção civil e à pavimentação (Nacional, Rodoviária, & Moreira, 2006).

É importante salientar que, este processo de resfriamento, é o utilizado na escória analisada durante este estudo.

2.5.3. Escória de alto-forno peletizada

Neste processo, a escória ainda líquida cai sobre um cilindro dentado giratório (300 RPM), refrigerado por jatos de água fria (1 ton/ton), que arremessa a escória em grãos para o ar (Figura 2.8). Este processo gera uma distribuição variada de grãos. Os de maior diâmetro possuem uma estrutura porosa e são parcialmente cristalinos,. Os grãos menores são semelhantes aos grãos da areia, de composição vítrea, utilizados como aglomerante (JOHN; AGOPYAN, 2000).

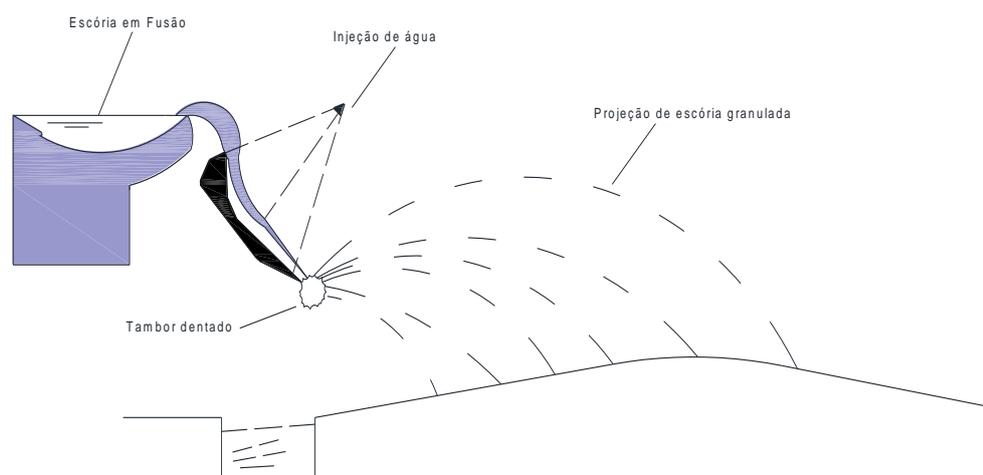


Figura 2.8. Granulação da escória (adaptado de JACOMINO *et al*, 2002).

Por efeito de tensão superficial, as partículas apresentam uma fórmula mais ou menos esférica, e como os mesmos se deslocam em um meio que contém gotas de água, os glóbulos se resfriam rapidamente, adquirindo uma estrutura vítrea na superfície. No interior da partícula, a velocidade de resfriamento é mais lenta tomando, então, uma forma cristalina (MALHOTRA *et al.*, apud. SILVA, 2005).

Como consequência, as partículas de granulometrias variadas são projetadas para o ar. Os grãos de maior diâmetro possuem uma estrutura porosa e são parcialmente cristalinos (JOHN; AGOPYAN, 2000). A partícula possui uma granulometria similar a do agregado graúdo convencional, com dimensão máxima característica entre 9,5 e 32,0 mm e massa específica variando de 0,6 g/cm³ a 0,9 g/cm³, particularidades que justificam a sua aplicação em concretos leves, estruturais, enchimento de pavimentação e blocos de concreto para fins estruturais ou não, enquanto que os grãos menores, semelhantes aos das areias, são predominantemente vítreos, com possibilidade de ser aplicado na produção de aglomerantes (ALMEIDA, G., 2014).

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

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).

As EAF podem ser britadas para serem utilizadas como agregado graúdo, uma vez que, dependendo da composição química e do tipo de resfriamento do resíduo a ser beneficiado, produz-se um determinado tipo de agregado com característica e aplicabilidade específica.

A escória resfriada ao ar é geralmente aproveitada como agregado para bases de estradas e pavimentos asfálticos e também pode ser usada como agregado para produção de concretos especiais.

A EAF pode apresentar um teor excessivo de sulfeto de ferro na sua composição, que poderá ocasionar problemas de manchamento, além de afetar a durabilidade do concreto e ocasionar um possível aumento da massa específica do concreto, em virtude da considerável porcentagem de ferro presente (METHA & MONTEIRO, 2014).

Nos Estados Unidos, Japão e alguns países da Europa, utiliza-se a escória de alto-forno cristalizada, como agregado graúdo e miúdo para concreto de cimento Portland. Países como a Bélgica, Reino Unido e França estabeleceram limites claros e rigorosos preconizados por normas técnicas específicas (BATTAGIN; SBRIGHI, 2002).

Na Alemanha, esse coproduto é aplicado como agregado na construção de estradas de rodagem, juntamente com escórias brutas, assim como na produção de concretos e blocos para vedação vertical (ALMEIDA, G., 2014).

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.

Queiroz *et al.* (2007), avaliou a resistência à compressão axial em estruturas de concreto produzidas com substituição da brita gnaisse pela escória de alto-forno a carvão vegetal britada, os resultados mostraram um aumento médio de 6.9 % na resistência dos concretos produzidos com o resíduo industrial.

Rosário *et al.* (2010), analisou as propriedades de concretos produzidos com vários percentuais de substituição do AGN (seixo) pelo resíduo siderúrgico (EAF). Neste estudo, os autores constataram a presença de um teor ideal de substituição de aproximadamente 25 % com o aumento da resistência mecânica, reforçando a possibilidade de se aplicar este coproduto na produção de concretos.

3. Materiais e Métodos

3.1. Planejamento Experimental

Para realização desta pesquisa foi desenvolvido o seguinte programa de ensaios tomando-se como base a produção de concretos com a utilização de agregados graúdos de escória de alto-forno em substituição parcial, em massa (20%, 30% e 40%) em relação ao agregado graúdo natural (seixo).

Os ensaios de caracterização dos materiais, avaliação do desempenho mecânico das argamassas e avaliação do desempenho mecânico dos concretos estão distribuídos de acordo com as Figuras 3.1 e 3.2.

Os ensaios de massa específica, massa unitária, absorção de água, abrasão Los Angeles, índice de forma, atividade pozolânica com cal, atividade pozolânica com cimento Portland, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEC), localizado na Universidade Federal do Pará (UFPA).

Os ensaios de difração de Raios-X, fluorescência de Raios-X e análise da microestrutura através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizados no Laboratório de Análises Químicas do Instituto de Geociências da UFPA.

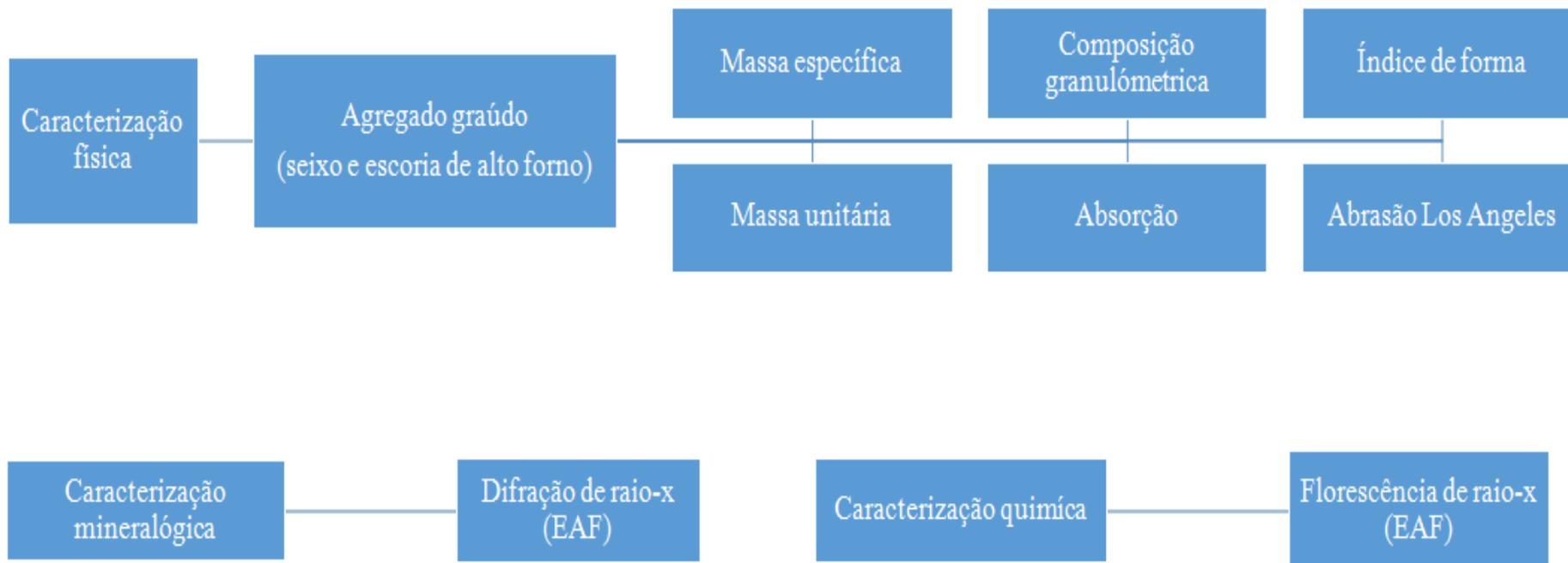


Figura 3.1 – Organograma da caracterização física, mineralógica e química dos materiais empregados na pesquisa.

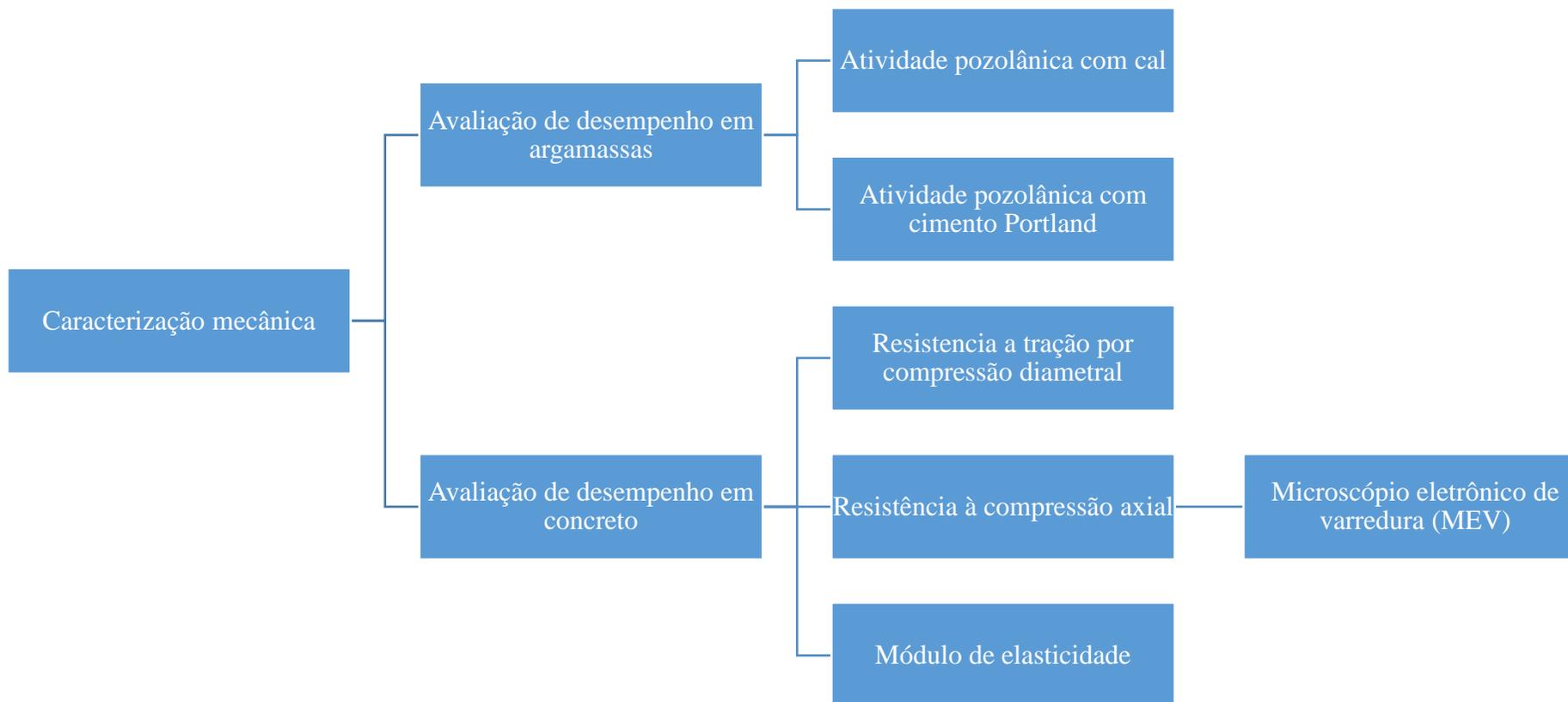


Figura 3.2 - Organograma da análise mecânica dos materiais empregados na pesquisa

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.

Verificou-se 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, 2011);
- Módulo de elasticidade NBR 8522 (ABNT, 2008).

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

- a) **Teores de substituição:** Os teores irão variar de 0%, 20%, 30% e 40% de substituição do AGN (seixo) pela EAF.
- b) **Idade do concreto (Ensaio mecânicos):** Foram adotados 28 e 63 dias, para o acompanhamento da evolução no tempo do desempenho mecânico do concreto.
- c) **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 foi baseada na classe de agressividade II, imposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Para cada betonada foram 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. Realizou-se 8 betonadas até o fim do experimento, sendo que o número final de corpos de prova irá totalizar em 96 (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - 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
20 % DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	0,64	4	4	4	4	4	4
30 % DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	0,64	4	4	4	4	4	4
40 % DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	0,64	4	4	4	4	4	4
Número de corpos de prova		32		32		32	
TOTAL: 96							

3.2. Caracterização dos materiais

Neste item são descritas as características dos materiais utilizados na produção dos concretos, os quais são provenientes do estado do Pará. Algumas destas características foram determinadas em laboratório e outras fornecidas por fabricantes e fornecedores.

3.2.1. Aglomerante hidráulico

Foi empregado o cimento Portland pozolânico (CP IV - 32), disponível comercialmente na região metropolitana de Belém.

3.2.2. Agregado miúdo

Utilizou-se areia de origem quartzosa, provenientes de depósitos naturais do município de Ourém (PA), a areia passou pelo processo de secagem, com o auxílio de

estufa, e foi armazenada em tonéis. Para caracterização do agregado miúdo empregado nesta pesquisa realizou-se alguns ensaios listados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Métodos de caracterização do agregado miúdo

Ensaio realizado	Norma
Dimensão máxima característica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Classificação	NBR 7211 (ABNT, 2009)

3.2.3. Agregado graúdo natural (seixo)

O agregado graúdo natural utilizado durante a confecção dos concretos é proveniente da região metropolitana de Belém. O material foi seco e armazenado em tonéis. Para caracterização do agregado graúdo empregado neste estudo foram realizados os ensaios listados na Tabela 3.3

Tabela 3.3: Métodos de caracterização do agregado graúdo convencional (seixo).

Ensaio realizado	Norma
Dimensão máxima característica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Absorção de água	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Abrasão Los Angeles	NBR NM 51 (ABNT, 2001)
Índice de forma	NBR 7809 (ABNT, 2009)
Classificação	NBR 7211 (ABNT, 2009)

3.2.4. Escória de alto-forno

- **Coleta de amostra**

Do volume de escória gerado pela Siderúrgica Norte Brasil (SINOBRAS-PA), coletou-se 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 foi acondicionada em recipientes plásticos, que foram encaminhados para o Laboratório de Engenharia Civil. A escória utilizada nesta pesquisa foi retirada desta amostra.

- **Ensaio de caracterização**

O resíduo industrial proveniente da região Sudeste do Pará foi utilizado na confecção dos concretos com adição de escória. A caracterização do agregado empregado nesta pesquisa foi realizada a partir dos ensaios listados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Métodos de caracterização do agregado graúdo de escória de alto-forno.

Ensaio realizado	Norma
Dimensão máxima característica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Absorção de água	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Abrasão Los Angeles	NBR NM 51 (ABNT, 2001)
Índice de forma	NBR 7809 (ABNT, 2009)
Classificação	NBR 7211 (ABNT, 2009)

3.2.5. Água

Utilizou-se a água proveniente da rede pública de abastecimento local.

3.2.6. Aditivo

Empregou-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 baseou-se nos procedimentos do IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992), que consiste em ajustar o teor ideal de argamassa estabelecendo, como parâmetro de controle, o valor do abatimento do tronco de cone, que neste estudo fixou-se em 70 ± 20 m.

3.3.1. Produção, moldagem e armazenamento dos corpos de prova

Durante a produção dos concretos seguiu-se o procedimento descrito no método IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992). A moldagem e o armazenamento dos corpos de prova seguiram 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 foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura da marca LEO, modelo 1430 VP. As amostras foram retiradas de fragmentos dos corpos de prova provenientes do ensaio de resistência à compressão axial, estes foram fixados em um suporte de alumínio através da fita adesiva de carbono. Para metalização das amostras utilizou-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 foram 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 Instituto de Geociências da UFPA, no Laboratório de Análises 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

Utilizou-se na confecção dos concretos o cimento Portland do tipo CP IV 32 produzido na região. As tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 indicam respectivamente os ensaios físicos, químicos e mecânicos, respectivamente do cimento utilizado.

Tabela 4.1 - Características físicas do cimento Portland 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 4.2 - Características químicas do cimento Portland 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 4.3 - Características mecânicas do cimento Portland 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

O agregado miúdo utilizado na produção dos concretos atende aos requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2009). A tabela 4.4 informa a caracterização física da amostra, e na Figura 4.1 compara-se a curva granulométrica do agregado miúdo com os limites das zonas granulométricas.

Tabela 4.4 - Características físicas do agregado miúdo

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRAS		NBR 7211 (ABNT, 2009)			
	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	1000	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				

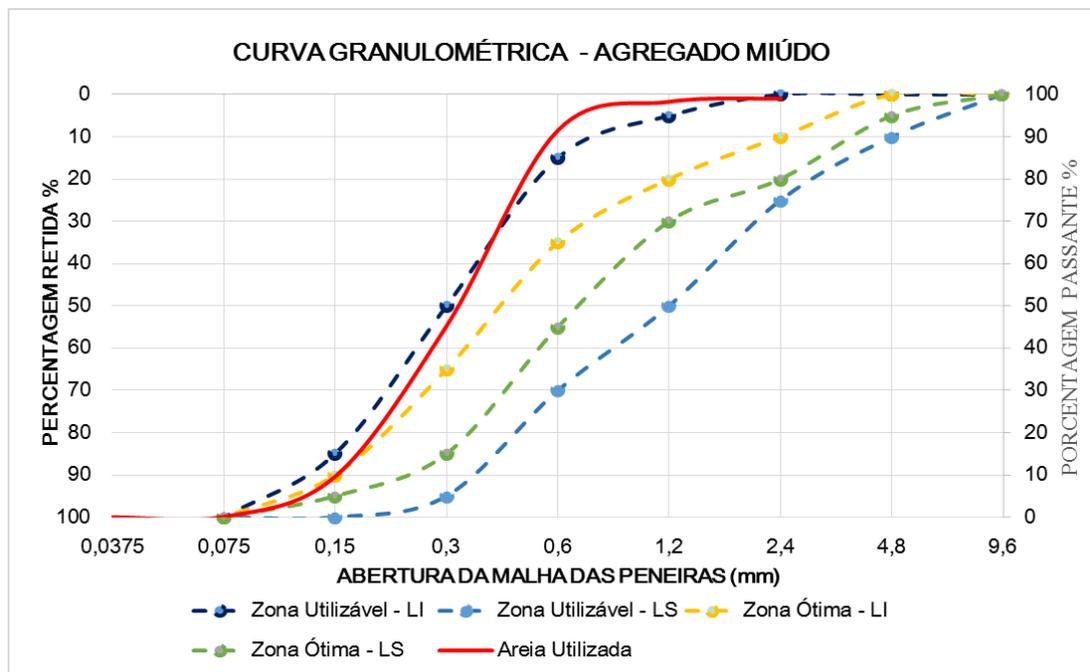


Figura 4.1- Curva granulométrica do agregado miúdo, e limites da NBR NM 7211 (ABNT, 2009).

Pelos resultados obtidos observa-se que o agregado miúdo enquadrou-se na zona utilizável do limite inferior.

4.1.3. Agregado graúdo natural (seixo)

O AGN (seixo) utilizado na confecção dos concretos atende aos requisitos descritos na NBR 7211 (ABNT, 2009), quanto aos parâmetros avaliados. A tabela 4.5 indica os resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo, assim como na Figura 4.2 compara-se a curva granulométrica do agregado graúdo natural com os limites das zonas granulométricas.

Tabela 4.5 - Características físicas do agregado graúdo

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRAS		NBR 7211 (ABNT, 2009)				
	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 b - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo 5% em apenas um dos limites marcados com 2				
Dimensão máxima (mm)		25					
Massa específica (g/cm ³)		2,63					
Massa unitária (g/cm ³)		1,76					
Absorção de água (%)		2,66					
Abração Los Angeles (%)		49,7					
Índice de forma		2,16					

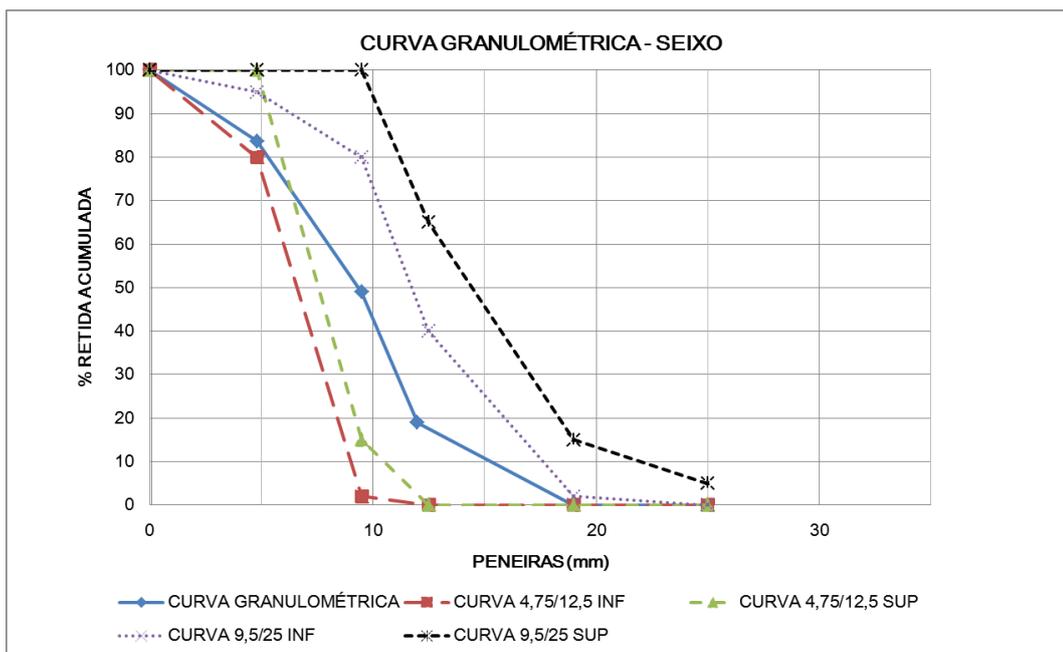


Figura 4.2- Curva granulométrica do AGN, e limites da NBR NM 7211 (ABNT, 2009).

O AGN analisado se enquadra nos requisitos impostos pela NBR NM 7211 (ABNT, 2009), pois o seixo está dentro da faixa de graduação 4,75/12,5, além de apresentar um desgaste superficial inferior ao limite de até 50% de perda de massa, assim como seu índice de forma inferior a 3,0.

4.1.4. Escória de alto-forno

Para análise técnica da utilização da escória de alto-forno na produção de concretos, foram necessárias várias etapas, as quais estão demonstradas no fluxograma da Figura 4.3 e serão descritos a seguir:

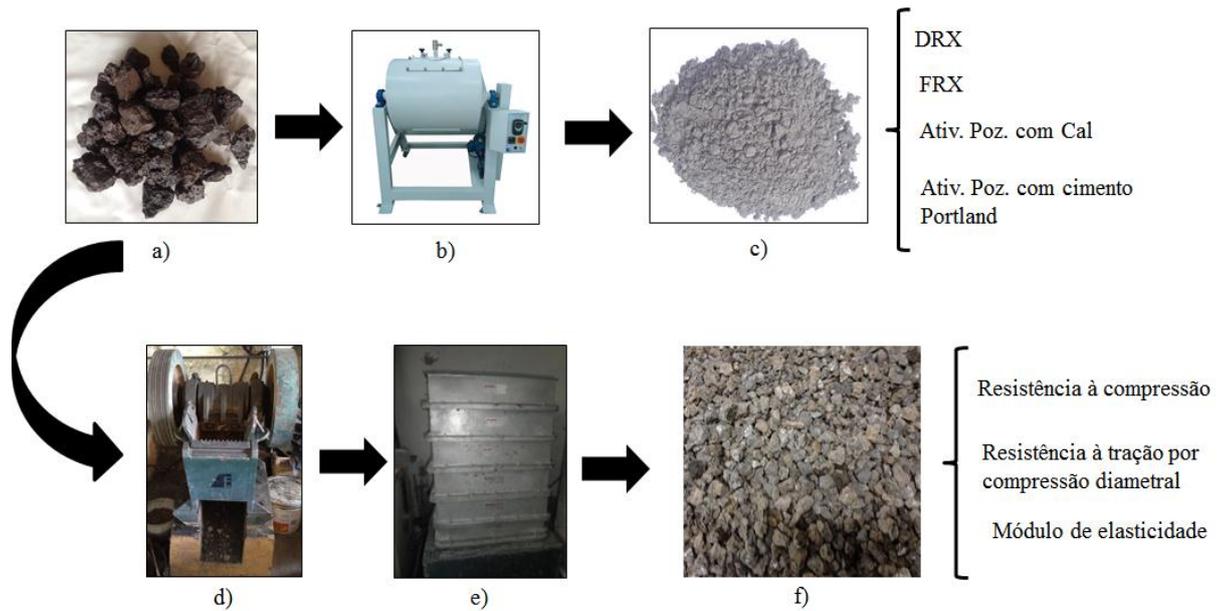


Figura 4.3 - Amostra in natura (a); (b) moinho de bolas; (c) amostra passante na peneira 200; (d) britador de mandíbulas; (e) peneirador mecânico; (f) EAF com granulometria passante na peneira de 25 mm e retido na 4,8 mm.

- **1ª Etapa:** Obtenção da amostra para análise

A escória foi coletada na Siderúrgica Norte Brasil S.A. (SINOBRAS) segundo as recomendações NBR 10007 (ABNT, 2004) Amostragem de resíduos sólidos.

- **2ª Etapa:** Beneficiamento da EAF através da moagem

Para análise do grau de cristalinidade, presença de minerais e composição química do resíduo industrial, utilizou-se das técnicas de Difração de raios – X e Fluorescência de raios – X, respectivamente.

Para realização do ensaio de Difração de Raios-X, a amostra passou por um processo de moagem no moinho de bolas da marca EMIC com velocidade de 12 RPM por aproximadamente 5 horas, até que apresentasse a granulometria semelhante à do cimento Portland. Posteriormente, a amostra foi pulverizada em almofariz para obter uma granulometria compatível com o porta amostra específico utilizado para análise.

A difração é o efeito da interferência entre ondas que reforça as intensidades de picos. As partículas são formadas por estruturas cristalinas com padrões de difrações distintos e características de cada fase. O feixe de raios-X é incidido em ângulos variáveis

na amostral de policristal (em forma de pó e com arranjo atômico ou molecular com estrutura que se repete de forma periódica e tridimensional) (BLEICHER e SASAKI, 2000).

As análises foram realizadas utilizando o difratômetro X'Pert MPD PRO (PW 3040/60), da PANalytical, com goniômetro PW3050/60 (Θ/Θ), tubo de raios-X cerâmico e anodo de Cu ($K\alpha_1 = 1,540598 \text{ \AA}$), modelo PW3373/00 com foco fino (2200 W / 60 Kv), e filtro $K\beta$ de Níquel. O detector utilizado é do tipo RTMS, X'Celerator. Os registros foram realizados no intervalo de 5 a $75^\circ 2\Theta$ (Figura 4.2).

As condições instrumentais utilizadas foram as seguintes: varredura de 3 a 75° em 2Θ , voltagem de 40 kV, corrente de 30 mA, tamanho do passo de $0,02^\circ$ em 2Θ , tempo/passos 82 s, fenda divergente de $1/4^\circ$ e anti-espalhamento de $1/2^\circ$, 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.

Como resultado, este ensaio fornece o difratograma, que é um gráfico do ângulo de espalhamento (2Θ) versus intensidade dos picos de incidência. Este ângulo é aquele formado entre a onda incidente e a onda espalhada (Figura 4.4).

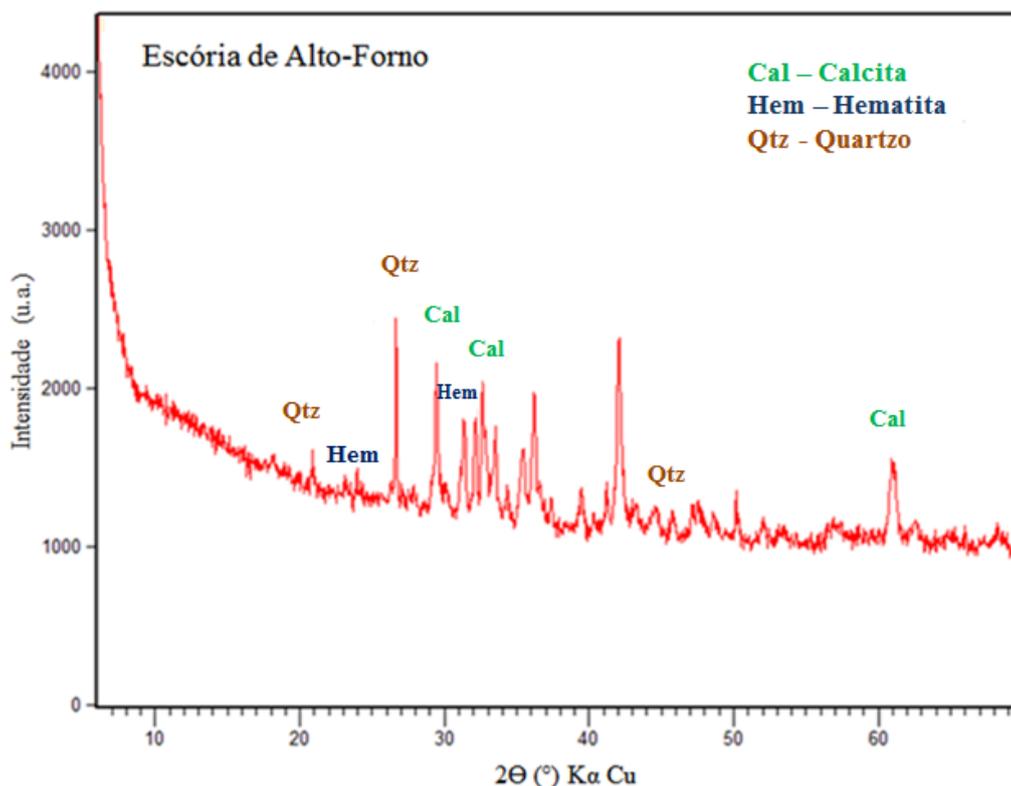


Figura 4.4 - Difratoograma de Raios-X da escória de alto-forno.

Ao analisar a imagem acima, tem-se a presença de inúmeros picos de difração, embora esta ainda apresente um discreto halo de amorfização. Esses picos de difração corroboram 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 maciço e cristalizado, que depois de devidamente britado, apresentará composição granulométrica semelhante a do agregado natural. Além do mais se observa a predominância do mineral Calcita, seguido da Quartzo e da Calcita, ambos em menor quantidade.

A análise da composição química (Tabela 4.6), foi realizada em um Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X, modelo Axios Mineral, proveniente da PANalytical, com tubo de raios-X cerâmico anodo de Ródio, e potência de 2,4 kW. As determinações foram geradas no programa IQ+ Semiquant. A aquisição dos dados foi feita com o software SuperQ Manager, e o tratamento dos mesmos com o software IQ+. A preparação das amostras para as análises foram realizadas a partir de pastilhas fundidas, com a utilização de 1 g de amostra para 6 g de Tetraborato de Lítio, que é o fundente.

Tabela 4.6 - Análise química das amostras de escória de alto-forno

Fluorescência (Escória de alto-forno)	
Constituinte	(%)
Al ₂ O ₃	15,59
CaO	33,69
Fe ₂ O ₃	0,89
K ₂ O	1,09
MgO	2,44
MnO	5,09
Na ₂ O	0,33
P ₂ O ₅	0,03
SO ₃	0,38
SiO ₂	39,65
TiO ₂	0,81

A partir deste ensaio a relação CaO/SiO₂ foi inferior a 1, desta forma esta escória pode ser classificada como ácida, fator que segundo MASSUCATO (2005) inviabiliza sua utilização como adição mineral, reforçando o estudo de sua possível aplicação como agregado para concreto.

- **3ª Etapa:** Avaliação do desempenho mecânico das argamassas

Com intuito de reforçar a hipótese de que a EAF analisada não poderia ser empregada como material pozolânico ao cimento Portland, buscou-se avaliar o desempenho mecânico de argamassas confeccionadas com e sem a escória.

- Avaliação da atividade pozolânica com cal

A atividade pozolânica é avaliada em função do desempenho mecânico das argamassas, preparadas com traço (proporcionamento) e consistência padronizados, de acordo com a NBR 5751 (ABNT, 2012).

A Tabela 4.7 apresenta a caracterização dos materiais necessários para se realizar este ensaio.

Tabela 4.7 - Quantidades de materiais

Materiais	Massa específica (g/cm³)
Material pozolânico (Escória)	3,06
Hidróxido de cálcio (Ca(OH) ₂)	2,58
Água (H ₂ O)	1,00
Areia normal	2,56

A quantidade de água mostrada na Tabela 4.8 foi suficiente para alcançar a consistência de 230 mm. A quantidade de areia inserida na Tabela abaixo corresponde a quantidade necessária para cada fração granulométrica utilizada durante o procedimento de mistura das argamassas.

Tabela 4.8 - Quantidade em gramas dos materiais utilizados

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

A Figura 4.5 apresenta a resistência à compressão média dos corpos de prova ensaiados, assim como a resistência mínima prevista na NBR 12653 (ABNT, 2012).

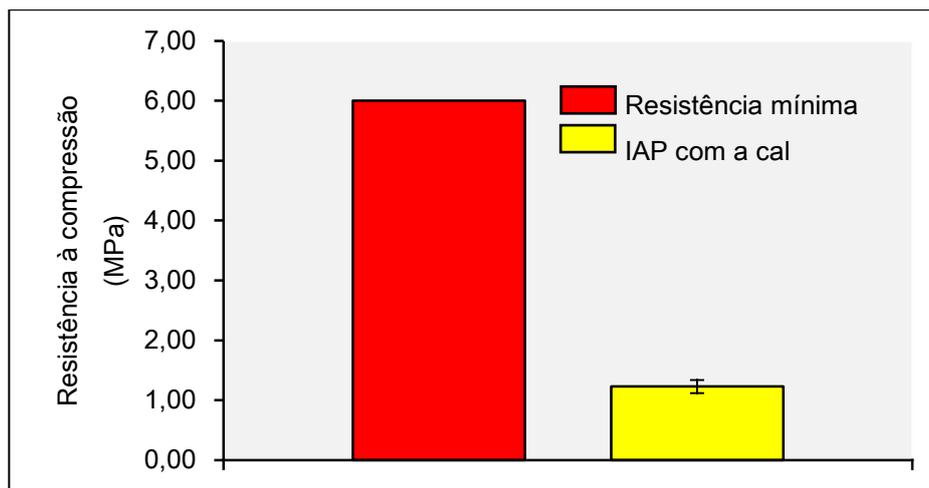


Figura 4.5 - Avaliação da atividade pozolânica com cal da escória de alto-forno.

Através dos resultados obtidos, demonstra-se que a amostra ensaiada alcançou aproximadamente 20 % da resistência mínima exigida pela NBR 12653 (ABNT, 2012).

○ 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).

A Tabela 4.9 demonstra que o efeito pozolânico da escória com o cimento Portland em estudo pode ser comprovado a partir das resistências de corpos de prova de argamassas, confeccionadas com a relação água/cimento de 0,30, com a consistência variando de 180 a 246,5 mm e com substituição de cimento por escória em 35 %.

Tabela 4.9 - Resistência à compressão das argamassas aos 7 dias.

Argamassa	Substituição de escória (%)	a/c	Consistência (mm)	Resistência média à compressão (MPa)
Referência	0	0,3	180	23,22
Escória	35	0,3	246,5	8,68

O índice de atividade pozolânica com cimento Portland foi de aproximadamente 37 %. Através dos resultados obtidos (Figura 4.6), demonstra-se que as argamassas com

adição de escória de alto-forno obtiveram uma significativa queda de resistência em relação às argamassas de referência. Fator este que, corrobora a hipótese inicial de que EAF estudada não apresenta propriedades compatíveis para ser utilizada como material pozolânico ao cimento Portland, deste modo a mesma deverá passar por um processo de beneficiamento (britagem) para ser adicionada no concreto, em substituição ao agregado graúdo natural (seixo).

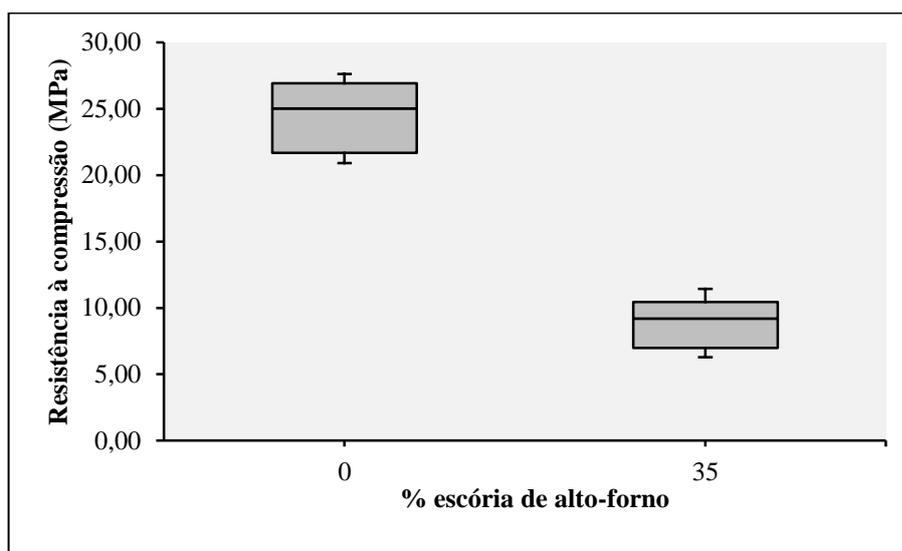


Figura 4.6: Avaliação da atividade pozolânica com cimento Portland.

- **4ª Etapa:** Beneficiamento da EAF, através da britagem.

Em virtude da granulometria da amostra ser superior a utilizada convencionalmente como agregado graúdo na produção de concretos, a escória bruta foi cominuída através do britador de mandíbulas RETSCH, modelo HSM100. A faixa granulométrica desse material foi limitada em passante na peneira de # 25 mm e retido na peneira # 4,8 mm, semelhante aos dos agregados convencionais utilizados durante a confecção dos concretos. Para garantir a homogeneização do material, foram realizados quarteamentos segundo o método da pilha cônica, preconizado pela NBR NM 21 (ABNT, 2001). Para a conferência das dimensões dos grãos utilizou-se o peneirador mecânico e, ao final do processo de britagem, obteve-se a escória com granulometria semelhante a do agregado graúdo natural.

- **5ª Etapa:** Caracterização física e composição granulométrica da escória de alto-forno após a britagem.

O resíduo industrial utilizado nesta pesquisa foi a escória de alto-forno, proveniente da fabricação do ferro gusa. Os resultados dos ensaios de caracterização e da composição granulométrica estão descritos na Tabela 4.10, bem como na Figura 4.7 compara-se a curva granulométrica da EAF com os limites das zonas granulométricas.

Tabela 4.10 - Características físicas e composição granulométrica da EAF.

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRAS	
	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
38	0,0	0,0
25	1,2	1,2
19	16,3	17,5
12,5	56,8	74,3
9,5	15,3	89,5
4,75	9,7	99,3
2,58	0,7	100
1,18	0,0	100
0,6	0,0	100
0,3	0,0	100
0,15	0,0	100
Módulo de Finura		7,07
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		2,52

A massa específica da escória é superior à massa específica do seixo, fato este relacionado aos elementos químicos presentes na composição química do resíduo industrial. A absorção de água da EAF foi ligeiramente superior a do AGN, sendo que esta diferença de absorção não influenciou na quantidade de água de amassamento utilizada durante as betonadas. O desgaste superficial da escória foi consideravelmente inferior ao máximo imposto pela NBR NM 7211 (ABNT 2009). A escória apresentou uma textura áspera e um formato irregular, além de deter o índice de forma dentro do limite permitido por norma. É importante salientar que a forma da EAF está diretamente relacionada com a forma de beneficiamento na qual a mesma foi submetida (britagem). A EAF analisada se enquadra nos requisitos impostos pela NBR NM 7211 (ABNT, 2009), pois esta está dentro da faixa de graduação 4,75/12,5 (Figura 4.7).

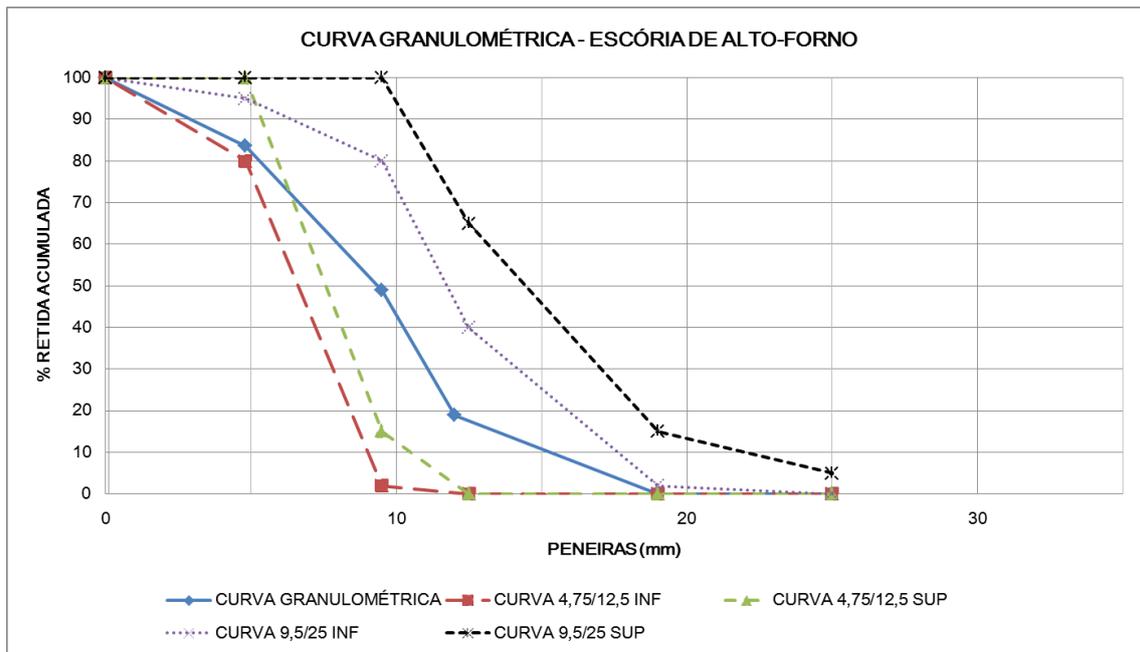


Figura 4.7- Curva granulométrica da EAF, e limites da NBR NM 7211 (ABNT, 2009).

4.1.5. Aditivo

Empregou-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 à 0,65 % sobre a massa do aglomerante (cimento Portland).

4.2. Produção de concretos

O método de dosagem adotado na confecção das misturas experimentais foi o desenvolvido pelo IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1995). Neste método, fixa-se o valor do abatimento para o desenvolvimento das misturas, que neste estudo foi mantido em 70 ± 20 mm. A partir do qual, parte-se para obtenção do teor ideal de argamassa para os materiais empregados, adotando-se o traço principal de 1:5. O teor de argamassa ideal foi de 61 % e a relação água/cimento de 0,64. Após a execução do traço principal, partiu-se para confecção das misturas 1:3,5 e 1:6,5, definidos como traços auxiliares, necessários para produção da curva de dosagem.

Na idade de 28 dias os corpos de prova foram ensaiados para determinação da resistência à compressão axial. Para este ensaio foi empregada uma prensa informatizada de modelo EMIC, com capacidade de carga de 200 toneladas e taxa de carregamento controlada. De posse dos resultados da tabela 4.11, traçou-se a curva de dosagem, conforme mostra a Figura 4.8.

Tabela 4.11 - Traços auxiliares para execução da curva de dosagem.

Dosagem (traço)	α (%)	Traço					Propriedades			Consumo cimento (Kg/m ³)
		cim	a	p	m	a/c	H(%)	slump (mm)	fc (Mpa)	
1:3,0	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

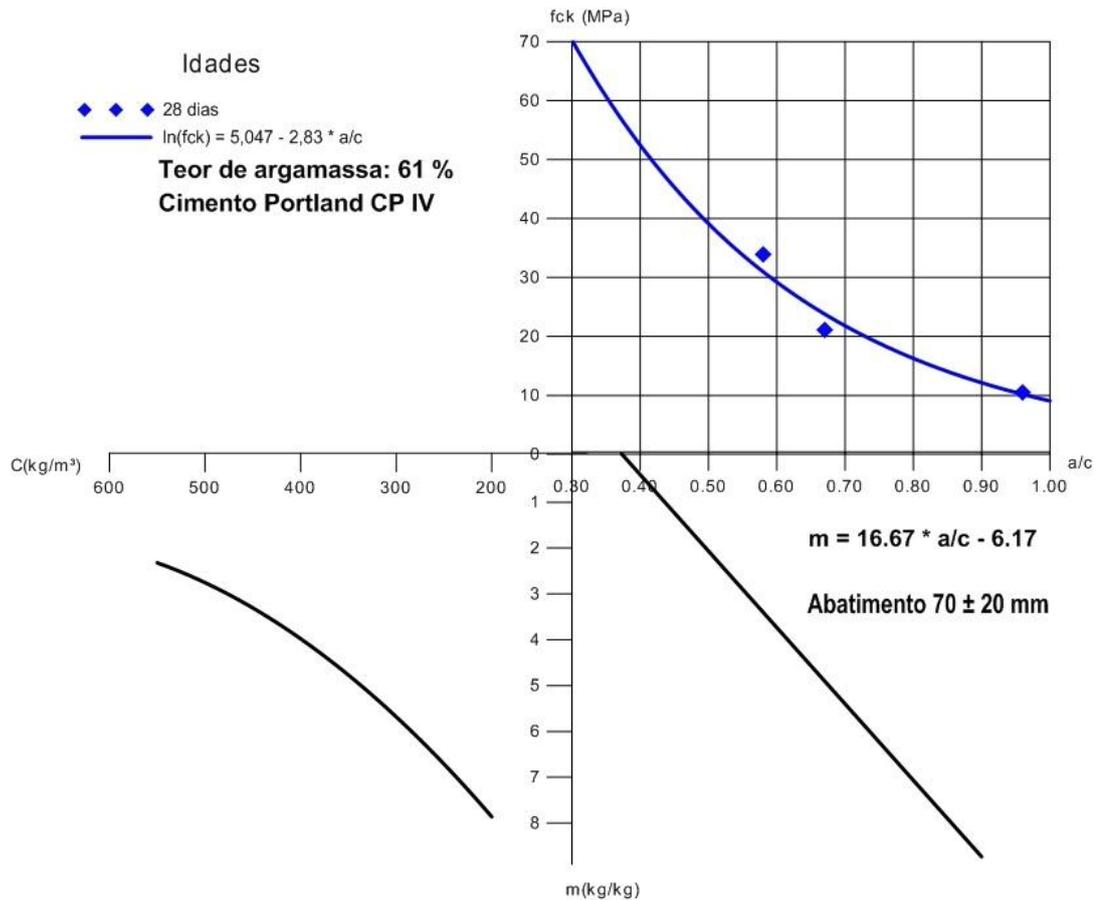


Figura 4.8 - Diagrama de dosagem.

A partir da curva de dosagem, estabeleceu-se o traço do concreto convencional para faixa de resistência de 25 Mpa (Tabela 4.12).

Tabela 4.12 - Caracterização do agregado graúdo, bem como o consumo estimado para moldagem de 12 corpos de prova cilíndricos de (\varnothing 10 x 20) cm.

Concreto referência						
Traço			Consumo (Kg)			Massa específica (g/cm ³)
Cimento	Areia	Seixo	Cimento	Areia	Seixo	Seixo
1	2,35	2,15	9,3	21,86	20	2,63

Com base nas misturas experimentais definiram-se os traços com 20 %, 30 % e 40 % com escória de alto-forno, para realização do estudo, mantendo-se constante a relação água-cimento (0,64), de acordo com a Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Caracterização do AGN e da EAF, bem como o consumo estimado para moldagem de 12 corpos de prova cilíndricos de (Ø 10 x 20) cm.

Concreto com 20 % de escória de alto-forno								
Traço			Consumo (Kg)				Massa específica (g/cm ³)	
Cimento	Areia	Seixo	Cimento	Areia	Seixo	Escória	Seixo	Escória
1	2,35	2,15	9,3	21,86	16	4	2,63	3,06

Concreto com 30 % de escória de alto-forno								
Traço			Consumo (Kg)				Massa específica (g/cm ³)	
Cimento	Areia	Seixo	Cimento	Areia	Seixo	Escória	Seixo	Escória
1	2,35	2,15	9,3	21,86	14	6	2,63	3,06

Concreto com 40 % de escória de alto-forno								
Traço			Consumo (Kg)				Massa específica (g/cm ³)	
Cimento	Areia	Seixo	Cimento	Areia	Seixo	Escória	Seixo	Escória
1	2,35	2,15	9,3	21,86	12	9,31	2,63	3,06

Para a mistura dos concretos além dos materiais estabelecidos anteriormente, fixou-se o tempo de mistura em 5 minutos, foi o tempo médio necessário para que os concretos alcançassem a consistência pré-fixada de 70 ± 20 mm. Para cada teor de substituição de seixo por escória de alto forno, foi necessária uma maior quantidade de aditivo superplastificante necessário para alcançar a consistências semelhantes, exceto para o teor de 20 % que, assim como o de referência não precisou do uso de aditivo (Figura 4.9).

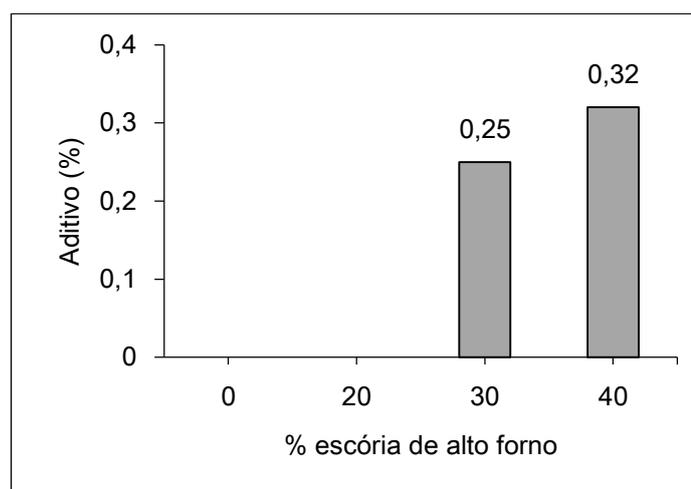


Figura 4.9 - Quantidade de aditivo (%) em relação a massa de cimento adicionado as misturas.

Ainda fixou-se a ordem de mistura sendo: primeiro adicionou-se parte da água (metade), 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 (quando necessário). Utilizou-se o procedimento de mistura citado por (HELENE; TERZIAN, 1995), desta forma no intervalo de 2,5 minutos de mistura a betoneira era parada e os materiais que ficavam aderidos à superfície interna da betoneira eram manipulados com uma colher de pedreiro para serem inclusos na mistura, garantindo uma homogeneidade dos concretos.

Seguindo as prescrições 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 e, em seguida, as superfícies dos corpos de prova foram protegidas com filme plástico para evitar a evaporação da água presente na superfície. A desforma foi realizada no dia seguinte à dosagem, posteriormente, os corpos de prova foram colocados imersos em tanques com água e cal para continuar o regime de cura até a idade de controle. Antes dos ensaios mecânicos os corpos de prova foram retificados com o objetivo de proporcionar uma distribuição uniforme dos esforços nas suas superfícies.

4.3. Análises em microscopia eletrônica de varredura através de elétrons secundários

As análises com elétrons secundários permitiram observar a estrutura e a morfologia dos concretos produzidos. Foi possível visualizar a estrutura cristalina dos diferentes componentes do concreto, sua aderência entre as ligações agregado-matriz, assim como a formação e propagação das fissuras.

Foram analisadas amostras de concreto com e sem presença da EAF como agregado graúdo. Primeiramente realizou-se uma varredura num nível de observação menor, buscando visualizar o aparecimento de fissuras, que poderiam ser vistas a olho nu. Posteriormente, a varredura deu-se através do aumento do grau de observação, através da ampliação da lente. Na figura 4.10 verificou-se a diferença entre o AGN (seixo) e a matriz de cimento. Além da presença de ar aprisionado na matriz, evidenciando a estrutura da pasta.

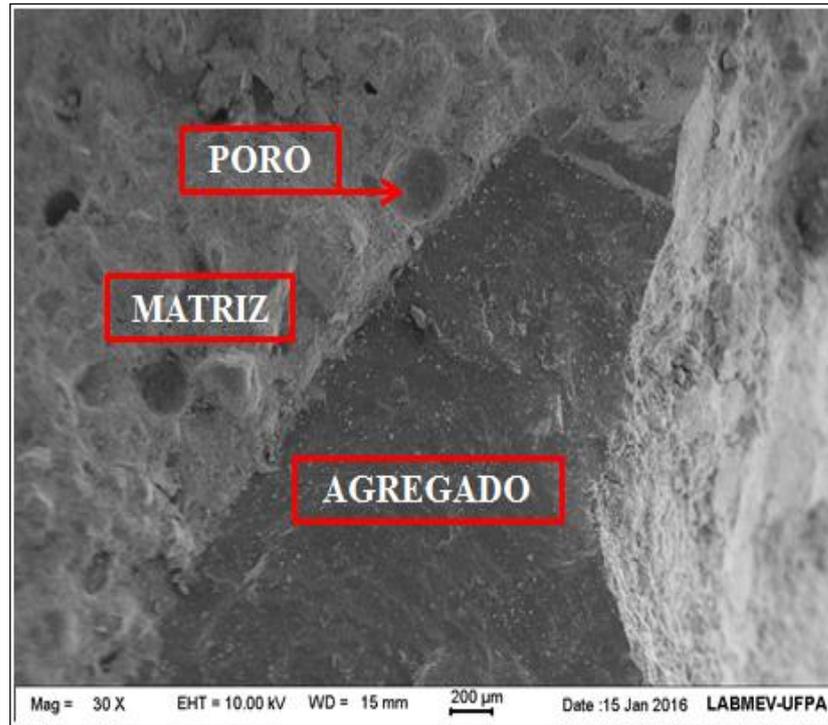


Figura 4.10 - Interface agregado-matriz do concreto de referência.

Na figura 4.11 é possível verificar com mais precisão a zona de interface entre o agregado e a pasta. Destacou-se com a cor vermelha o delineamento da zona de interface entre o agregado gráudo e a pasta de cimento.

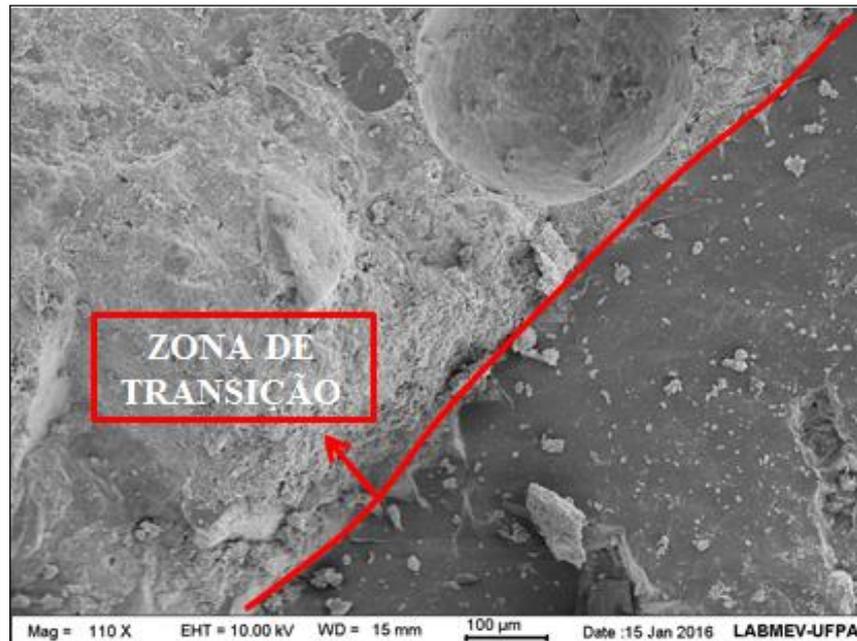


Figura 4.11 - Vista ampliada da interface pasta-agregado do concreto de referência.

Na figura 4.12 nas regiões com presença de vazios, as microfissuras tendem a procurar o caminho preferencial por dentro do poro, por ser uma região de grande concentração de tensões. Pois de acordo com Barbirato (1999), o furo age com um concentrador de tensões, provocando o colapso do material na ponta do entalhe, ultrapassando a resistência do material.

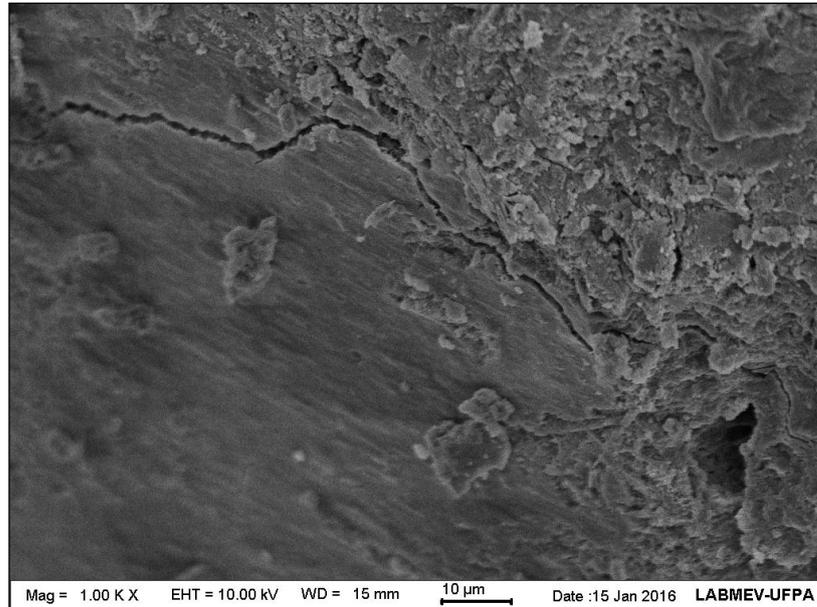


Figura 4.12 - Caminho da microfissura na pasta até o poro, funcionando como concentrador de tensões no concreto convencional.

Na figura 4.13 com 20 % de EAF, observa-se que o agregado graúdo de escória apresenta um formato irregular, proporcionando uma melhor ancoragem mecânica entre o resíduo industrial e a matriz de cimento. Fato este, diretamente relacionado ao aumento do desempenho mecânico dos concretos contendo escória, em relação ao concreto convencional.



Figura 4.13 - Vista do formato irregular da EAF, melhorando a aderência entre o agregado e a matriz.

Na figura 4.14 com 40 % de EAF, observa-se o surgimento das fissuras somente na região do agregado graúdo de escória, evidenciando a maior densificação na região de interface entre o agregado e a matriz. Observa-se também um número considerável de estruturas fibrosas de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), grande responsável pelas propriedades mecânicas da pasta (maior densificação da matriz cimentícia). Assim como, tem-se a presença de poucos cristais prismáticos de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), perpendiculares ao agregado, que contribuem para o aparecimento de fissuras, em função da criação do plano preferencial de ruptura, além de contribuírem pouco para resistência da pasta em função da sua baixa área superficial, em relação ao C-S-H.

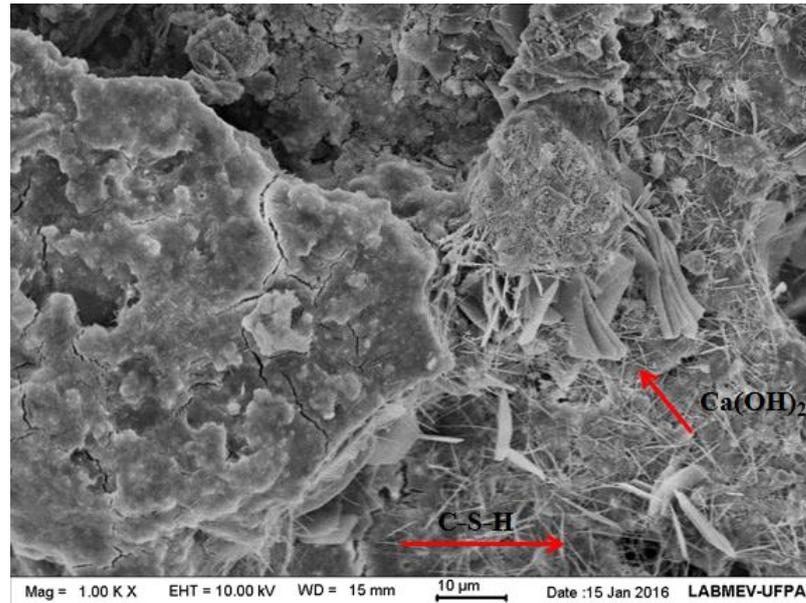


Figura 4.14 - Presença das fissuras somente na região do agregado de EAF, assim como grande quantidade de C-S-H e pouca quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

4.4. Avaliação das Propriedades do Concreto

Os resultados encontrados referentes às propriedades do concreto no estado endurecido foram analisados com base na análise estatística, para dar confiabilidade às conclusões obtidas (Apêndices A, B e C). A análise foi feita para cada tipo de ensaio, com o objetivo de comprovar estatisticamente a influência das variáveis investigadas, assim como a existência de possíveis interações entre estas variáveis. Os dados foram analisados quanto a sua normalidade utilizando-se o teste de Shapiro Wilk. Concomitantemente, os dados foram analisados quanto a sua homogeneidade utilizando-se o teste de Levene. Confirmando-se a homogeneidade das variâncias dos mesmos, esses foram comparados utilizando-se o teste T de Student para amostras independentes quando havia duas condições experimentais, para condições experimentais maiores que duas os dados foram analisados a partir da análise de variância de uma via (ANOVA – one way). Em seguida caso os dados apresentassem desigualdade nas médias, para identificação dos grupos responsáveis pela desigualdade, estes eram analisados utilizando-se a análise de variância de Tukey. Foram consideradas diferenças estatísticas quando $P < 0,05$.

4.4.1. Avaliação da Trabalhabilidade

Dentro do programa experimental, foi realizado o estudo da trabalhabilidade dos concretos de referências e com escória, em que se avaliou esta propriedade pela norma de

determinação de consistência através do ensaio de abatimento do tronco de cone para todos os traços apresentados na matriz dos experimentos.

A trabalhabilidade foi controlada através do ensaio de abatimento do tronco de cone, preconizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), sendo este considerado um fator de controle nos concretos. Os resultados da trabalhabilidade medida na confecção dos concretos que foram ensaiados aos 28 e 63 dias, respectivamente estão apresentados nas Tabelas 4.14 e 4.15 e na Figura 4.15.

Tabela 4.14 - Propriedades do concreto no estado fresco, confeccionados para serem ensaiados aos 28 dias. Legenda: CR (Concreto referência); CCE (Concreto com escória de alto-forno).

Traço	Abatimento (mm)
CR	77
CCE (20 %)	72
CCE (30 %)	66
CCE (40 %)	57

Tabela 4.15 - Propriedades do concreto no estado fresco, confeccionados para serem ensaiados aos 63 dias. Legenda: CR (Concreto referência); CCE (Concreto com escória de alto-forno).

Traço	Abatimento (mm)
CR	81
CCE (20 %)	75
CCE (30 %)	68
CCE (40 %)	58

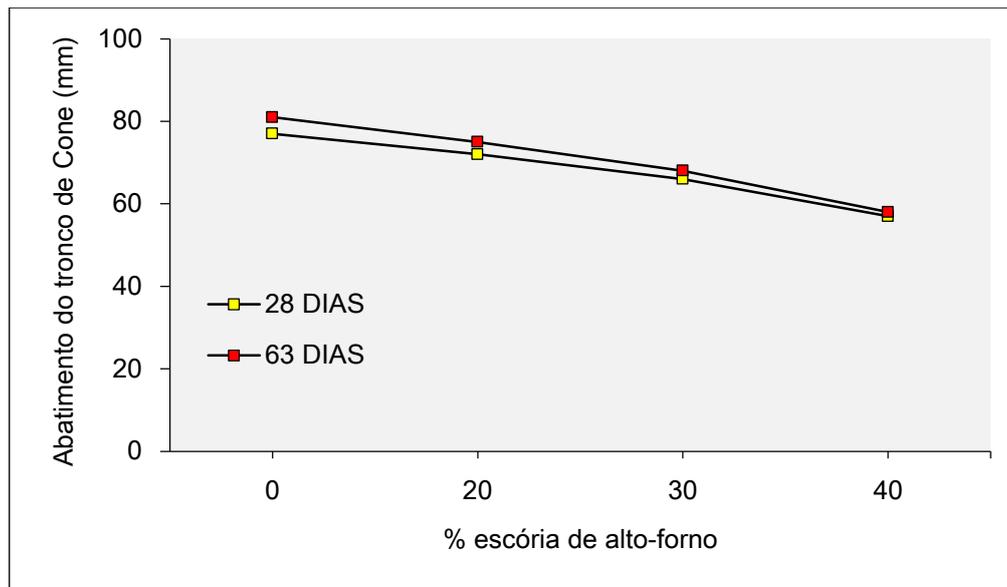


Figura 4.15 - Consistência do concreto (Slump test).

Houve uma queda progressiva de trabalhabilidade a partir da incorporação de escória de alto-forno na mistura. Este efeito pode ter ocorrido em função da forma irregular e textura áspera dos agregados de EAF, diferentemente do seixo rolado que apresenta um formato esférico e textura lisa, facilitando o envolvimento da argamassa e consequentemente melhorando a trabalhabilidade da mistura.

4.4.2. Avaliação da resistência à compressão axial

A Figura 4.16 apresenta uma análise comparativa entre os concretos sem escória, e os concretos com adição de escória nas proporções de 20%, 30% e 40%. Observa-se que aos 28 dias, não houve incremento de resistência à compressão nos concretos com 20% em relação aos de referência. Enquanto que nas substituições de 30 e 40% obteve-se um aumento significativo de desempenho mecânico ($P < 0,05$). Já, aos 63 dias os concretos sem escória e com 20% e 30% de EAF não obtiveram aumento significativo de resistência, ao passo que os concretos com 40% apresentaram um ganho de desempenho mecânico em relação aos outros, ressalta-se que esse ganho de resistência aos 63 dias está diretamente ligado ao tipo de cimento utilizado durante o programa experimental, e não mais diretamente pelo emprego da EAF, tendo em vista que este tipo de cimento apresenta materiais pozzolânicos na sua composição que irão contribuir para o aumento de desempenho em idades avançadas.

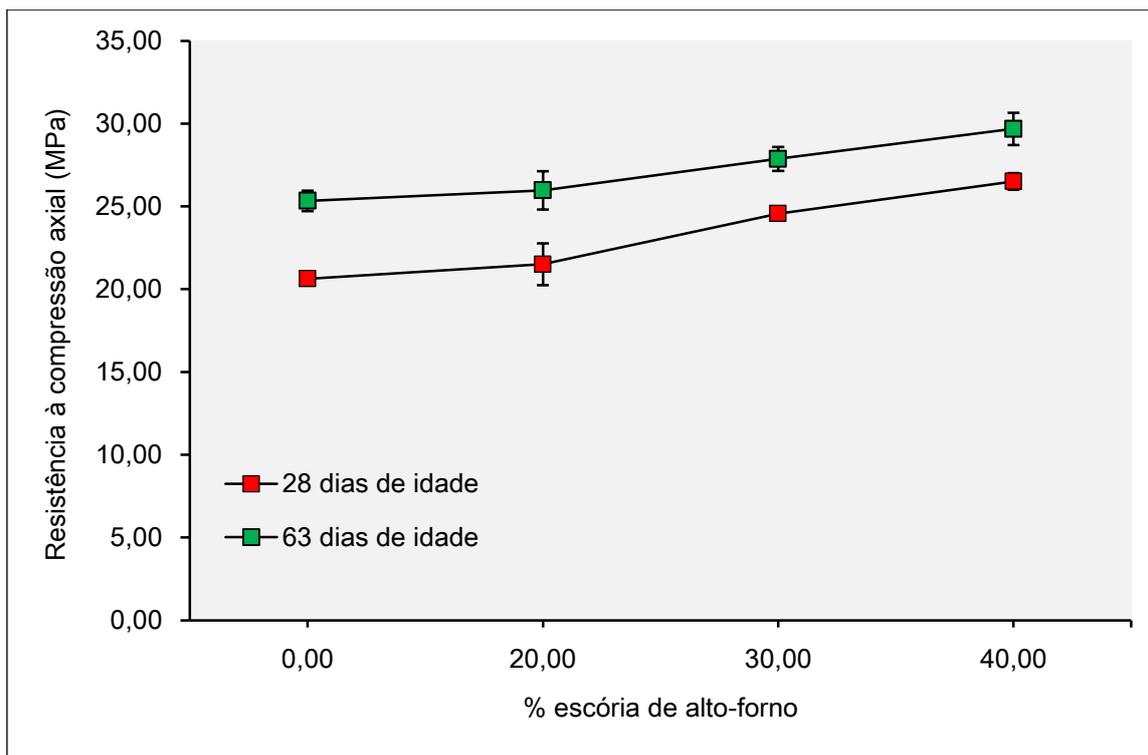


Figura 4.16 - Resistência à compressão axial dos concretos para idades diferentes, em função do teor de substituição do agregado graúdo natural por escória de alto-forno. Valores expressos em média \pm desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando $p < 0,05$ (ANOVA; Tukey, $p < 0,05$).

O aumento de resistência nos concretos contendo escória podem ser explicados em função do resíduo industrial apresentar uma maior resistência ao desgaste superficial, em relação ao agregado graúdo natural. Assim como, o formato irregular e a textura áspera da EAF contribuíram para melhora na aderência entre a EAF e a matriz de cimento.

MONOSI *et al* (2015), substituiu 40 % do agregado graúdo natural por escória de aciaria, em massa, e comparou com concretos sem adição de EAC, mantendo a mesma relação água-cimento de 0,54. Aos 28 dias os concretos foram ensaiados à compressão axial, onde os concretos especiais obtiveram um ganho de resistência de 40 %. Este aumento está relacionado à melhor força de ligação entre a interface pasta-agregado, em função do seu formato irregular e sua textura áspera, assim como o a EAC apresentou um elevado índice de dureza, em função do seu baixo desgaste superficial.

Beshr, Almusallam, e Maslehuddin (2002), analisaram as propriedades mecânicas de 4 traços de concretos produzidos com agregado graúdo de calcário (C), calcário dolomítico (CD), calcário quartzolítico (CQ) e escória de aciaria (EAC). Os corpos de

prova desses concretos foram ensaiados à compressão axial aos 3, 7, 14, 28 e 180 dias de cura. A Figura 4.17 indica que o agregado graúdo influencia significativamente na capacidade resistente do concreto, sendo que a maior resistência alcançada foi com a amostra confeccionada com EAC.

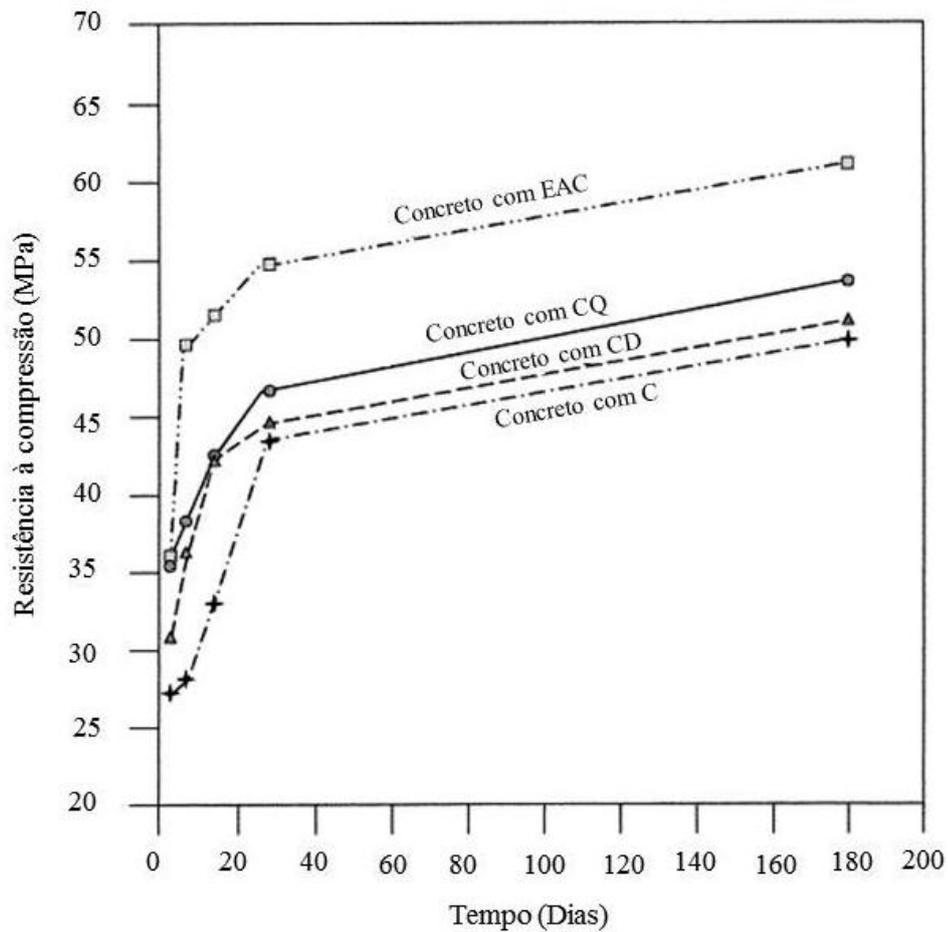


Figura 4.17 - Desenvolvimento das resistências à compressão de concretos preparados a partir de agregados selecionados, (adaptado de Beshr, Almusallam, e Maslehuddin (2002)).

Os dados neste estudo indicam que em concretos com EAC, a maior parte do carregamento de compressão é suportada pelos agregados, ao invés de somente a pasta de cimento.

MASLEHUDDIN *et al* (2002), aumentou o desempenho mecânico do seu concreto ao substituir 50% de AGN por EAC. Esta melhora na capacidade de resistência à compressão indica que este material pode ser utilizado benéficamente em concretos de cimento Portland.

Sekaran, Palaniswamy e Balaraju (2015), confeccionaram um concreto com 50 % de escória de aciaria (EAC) e 30 % de cinza volante (CV), que apresentou um aumento significativo de desempenho mecânico (ensaio de resistência à compressão e flexão de vigas) em relação ao concreto convencional e ao concreto feito apenas com agregado graúdo natural (AGN) e 30% de CV. Este ganho está relacionado à elevada resistência à abrasão e ao esmagamento da EAC em comparação ao AGN. Desta forma, a adição deste resíduo industrial como agregado graúdo na produção de concreto, torna-se uma alternativa tecnicamente viável, visando à diminuição do acúmulo de resíduo industrial depositado, bem como ajuda diretamente na redução da exploração de jazidas naturais.

4.4.3. Avaliação da resistência à tração por compressão diametral

A Figura 4.18 apresenta os resultados entre os concretos sem adição de escória, e os concretos com adição de escória nas proporções de 20%, 30% e 40%. Observa-se que aos 28 dias, não houve incremento de resistência à tração nos concretos com 20% em relação aos de referência. Enquanto que nas substituições de 30 e 40% obteve-se um aumento significativo de desempenho mecânico, em relação ao de referência e o de 20% ($P < 0,05$). No entanto, ao correlacionar as resistências nos concretos com 30 e 40 %, identifica-se que ambos não apresentam diferença significativa entre eles. Já, aos 63 dias somente o concreto com 40% de escória apresentou diferença significativa de desempenho mecânico em relação aos outros concretos ($P < 0,05$). Acredita-se que esse aumento de resistência no teor de 40% está relacionado à maior força de interação entre o agregado e a pasta, haja vista que os concretos confeccionados com esse teor tinham na sua composição uma maior quantidade de agregados de EAF.

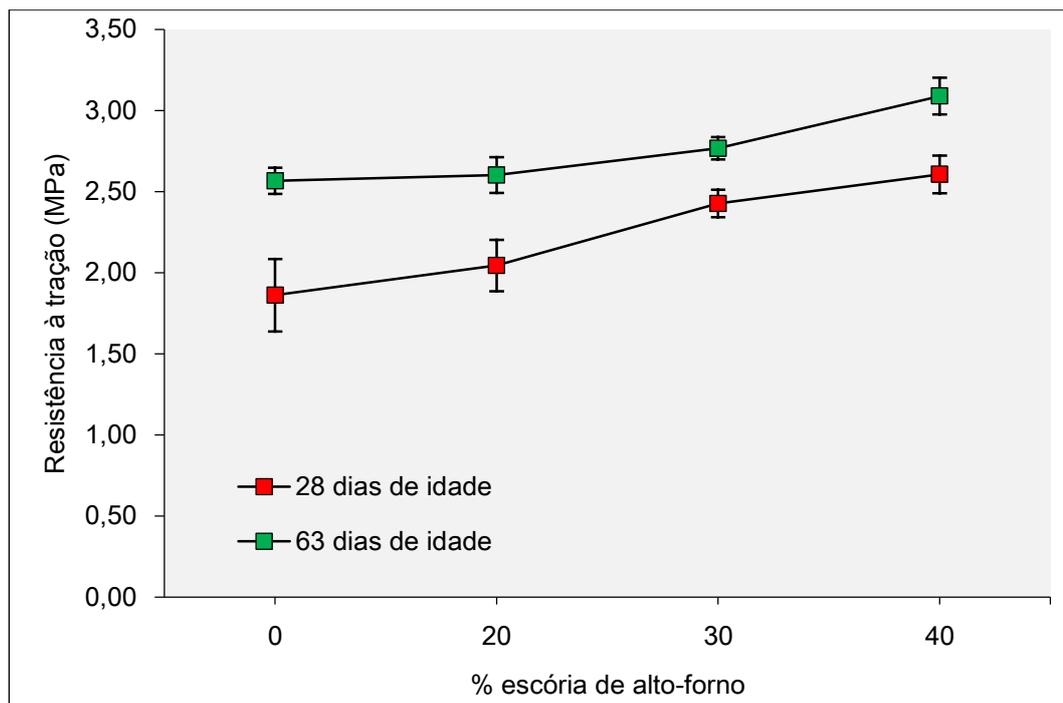


Figura 4.18: Resistência à tração por compressão diametral dos concretos para idades diferentes, em função do teor de substituição do agregado graúdo natural por escória de alto-forno. Valores expressos em média \pm desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando $p < 0,05$ (ANOVA; Tukey, $p < 0,05$).

Da mesma maneira que a análise de resistência à compressão axial, a análise do desempenho mecânico à tração, segue a mesma linha de pensamento, isto é, este incremento de resistência se deu em função da EAF apresentar uma maior dureza superficial em relação ao agregado natural, assim como a sua forma e textura áspera, que melhoraram a aderência entre a interface matriz-agregado.

Beshr, Almusallam, e Maslehuddin (2002), estudaram a resistência à tração por compressão diametral nos 4 tipos de concretos feitos com agregados distintos, e obtiveram o maior desempenho mecânico no concreto com EAC (Figura 4.19).

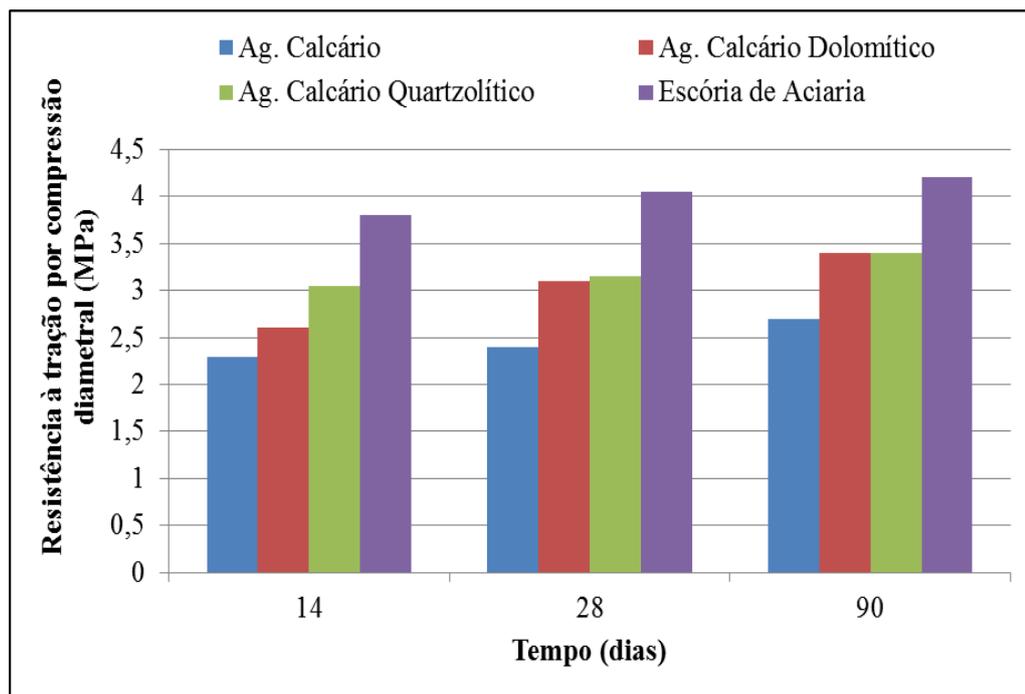


Figura 4.19 - Resistência à tração por compressão diametral de concretos preparados a partir de agregados selecionados, (adaptado de BESHAR *et al*, 2002).

Este ganho de resistência está relacionado ao formato irregular, textura áspera e boa resistência à abrasão da escória, estas características densificam a zona de transição entre o agregado graúdo e a pasta de cimento.

4.4.4. Avaliação do módulo de elasticidade

A Figura 4.20 apresenta os resultados entre os concretos sem adição de escória, e os concretos com adição de escória nas proporções de 20%, 30% e 40%. Aos 28 dias, a substituição de 20 % do agregado graúdo natural por EAF não apresentou uma diferença significativa de módulo de elasticidade em relação ao concreto confeccionado sem escória. Enquanto que nas adições de 30 e 40% observa-se um ganho significativo do módulo de deformação ($P < 0,05$), em relação aos outros teores, no entanto ao correlacionar os dois últimos teores conclui-se que ambos não diferem significativamente entre si. De forma análoga a Figura 4.21 mostra a linha de tendência dos valores médios do módulo de elasticidade dos concretos analisados aos 28 dias.

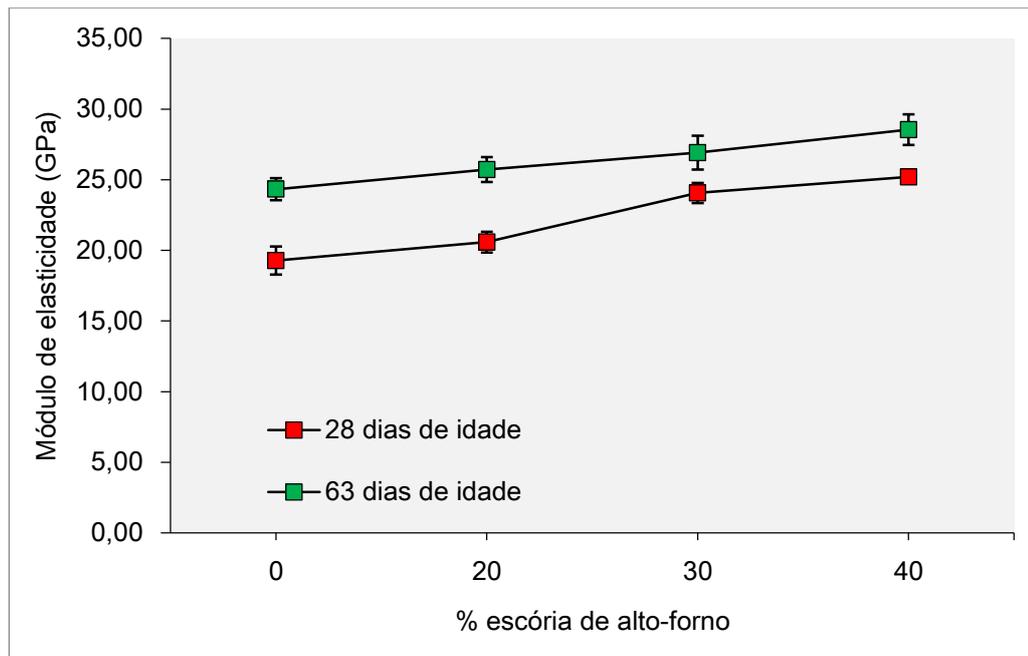


Figura 4.20 - Módulo de elasticidade dos concretos para idades diferentes, em função do teor de substituição do agregado graúdo natural por escória de alto-forno. Valores expressos em média \pm desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando $p < 0,05$ (ANOVA; Tukey, $p < 0,05$).

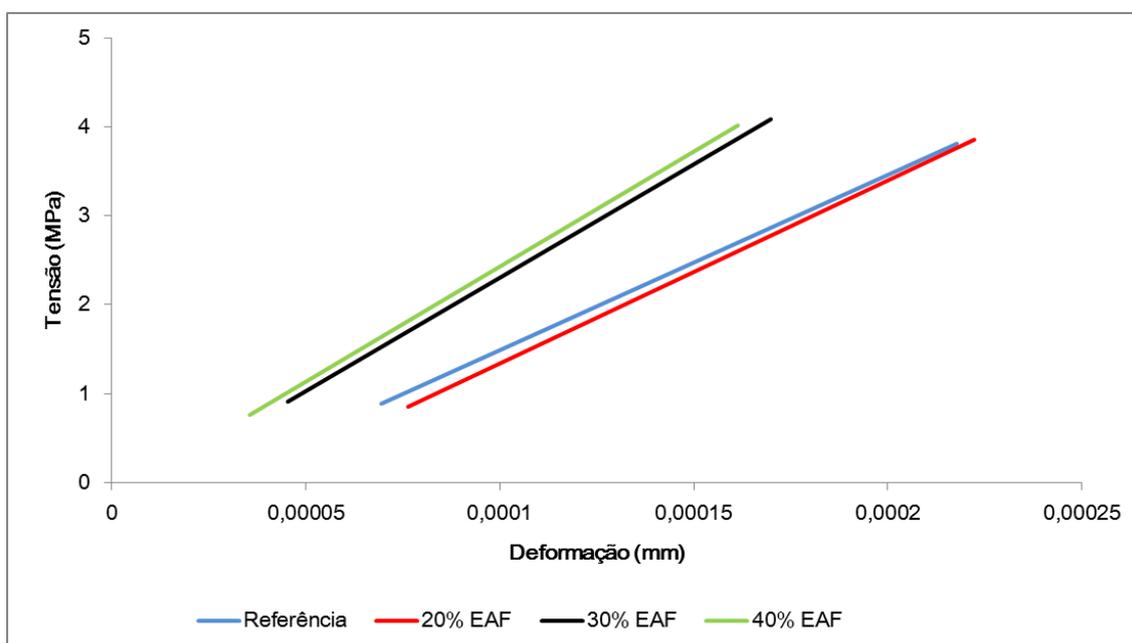


Figura 4.21 – Linha de tendência dos valores médios do módulo de elasticidade, aos 28 dias.

O aumento no módulo de elasticidade dos concretos contendo as substituições de 30 e 40% está relacionado às melhores propriedades físicas encontradas no agregado de escória de alto-forno.

ADEGOLOYE *et al* (2014), substituiu 50 e 100% de agregado graúdo natural de sílico-calcário por escória de aciaria (EAC), em volume, analisando a resistência à compressão e módulo de elasticidade em concretos de alta resistência com relação água-cimento fixada em 0,3. Os resultados indicaram um ganho de 9% na resistência em concretos especiais, fato este relacionado à maior resistência à abrasão da escória, além desta apresentar uma superfície áspera gerando um melhor grau de aderência do agregado com a pasta de cimento. O módulo dinâmico aumentou em média 10 % nos concretos contendo EAC, pois o maior peso específico da escória influenciou diretamente na capacidade de deformação elástica dos concretos.

5. Conclusão e Sugestões

5.1. Conclusão

De acordo com os resultados deste estudo, em concordância com o que descreve a literatura, os concretos produzidos com a escória de alto-forno analisada, geram resultados tecnicamente satisfatórios de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade.

Através da análise da resistência à compressão axial obtiveram-se valores de resistência semelhantes para os concretos convencionais e os concretos com 20 % de EAF, enquanto que os concretos com 30 % e 40 % de EAF apresentaram um aumento significativo de desempenho mecânico em relação ao concreto convencional.

Para os concretos submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral pode-se concluir que os concretos convencionais e os concretos com 20 % de EAF apresentaram propriedades mecânicas semelhantes, ao passo que os concretos contendo 30 % e 40 % de EAF obtiveram um aumento significativo de resistência em comparação ao concreto convencional.

Nos concretos submetidos à avaliação do módulo de elasticidade, observou-se que o comportamento dos concretos com 20 % de EAF foi semelhante ao concreto convencional, enquanto que os concretos contendo 30% e 40 % de EAF apresentaram um ganho significativo de resistência em relação ao concreto convencional.

É importante salientar que estes resultados devem ser considerados relevantes dentro de certos limites, pois as características do resíduo estudado (escória de alto-forno) podem ser alteradas em função da qualidade da matéria-prima e de possíveis modificações nas operações piro metalúrgicas de fabricação do ferro gusa.

Dito isto, conclui-se que a importância da destinação correta de resíduos é hoje plenamente reconhecida, sendo que o seu desenvolvimento metodológico apresentou, nos últimos anos, um progresso significativo. Entre as alternativas de tratamento e disposição final de resíduos industriais disponíveis, a incorporação desse rejeito no mercado da construção civil apresenta-se como uma solução técnica viável e de grande potencial de crescimento. Esta alternativa para a disposição final de resíduos industriais pode, ainda, contribuir para a sustentabilidade da região, onde o acúmulo se deposita, por meio da redução do uso de recursos naturais não renováveis e do consumo de energia, diminuindo

os impactos ambientais, gerados pela extração de jazidas naturais e melhorando a qualidade de vida para os cidadãos e para o planeta.

5.2. Sugestões

Considerando a enorme quantidade de geração de escórias de alto-forno pelas siderúrgicas e o excedente depositado em pátios de armazenamento, é importante que se dê continuidade nos estudos, cujo objetivo é buscar alternativas de aplicação deste resíduo na construção civil, sobretudo com o intuito de consolidar e melhorar o seu desempenho como agregado para produção de concretos sustentáveis. Sendo assim, descreve-se a seguir algumas propostas de trabalhos para futuras pesquisas:

- Realizar um estudo de dosagem através do método IPT/EPUSP, com os traços (pobre, normal e rico) sendo confeccionados com 100% de EAF como agregado graúdo para concreto;
- Avaliar o desempenho mecânico dos concretos sustentáveis com teores mais elevados de substituição de EAF por AGN, como por exemplo, 50% e 100% de escória;
- Analisar propriedades referentes à durabilidade de concretos produzidos com escória de alto-forno como agregado graúdo, enfatizando em aspectos como: permeabilidade à água e aos gases, ataque por sulfatos, carbonatação, resistência à penetração de cloretos e reação álcali-agregado;
- Determinar a relação custo x benefício para utilização da EAF como substituição ao AGN no concreto.

6. Referências Bibliográficas

Adegoloye, G., Beaucour, A., Ortola, S., and Noumowé, A. (2015). **“Concretes made of EAF slag and AOD slag aggregates from stainless steel process: Mechanical properties and durability.”** Construction and Building Materials, 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.007, 313-321. Online publication date: 1-Fev-2015.

AGUIAR, M. R. M. P.; NOAVES, A. C.; GUARINO, A. W. S. **Remoção de metais pesados de fluentes industriais por aluminossilicatos.** Química Nova, São Paulo, v. 25, n. 6B, p. 1145-1154, 2002.

ALIZADEH R, CHINI M, GHODS P, HOSEINI M, MONTAZER SH, SHEKARCHI M. **Utilization of electric arc furnace slag as aggregates in concrete – environmental issue.** Tehran: CMI Report, 1996.

ALMEIDA, G. M. Utilização de escória de alto-forno a carvão vegetal como agregado graúdo e miúdo para concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Pará (2014).

ALMEIDA, J. A. **Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto.** Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte – MG 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM C 618.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates. ASTM C 1260.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete: ASTM C 876, 6p. In: Annual book of ASTM standards. Philadelphia, 2005c.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. EN Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregate. ASTM C125. 1995.

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 férrico, 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 – Ensaio 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.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO 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. 2011.

ASSOCIAÇÃO 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.

BARBIRATO, J. C. C. Método dos elementos finitos de contorno com a reciprocidade dual para análise transiente tridimensional da mecânica do faturamento. São Carlos, 1999. 270 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

BATAGIN, A. F.; ESPER. M.W. Contribuição ao conhecimento das propriedades do cimento Portland de alto-forno. São Paulo: ABCP, 1988.

BATTAGIN, I.L.S; SBRIGHI, C. Precauções e limitações do uso de escórias como agregado na construção civil. [S.I.: s.n.], 2002.

CALLISTER, W. D., Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada. John Wiley & Sons, Inc., 2005.

CAMPOS, H. K. T. Curso: Modelo de gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos. A geração de resíduos no Brasil e os problemas associados. Brasília: DF, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.

CAMPOS, J. O. **Reflexões sobre a gestão de resíduos industriais.** 2000. Disponível em: <http://www.ablp.org.br/residuos.html> Acesso em: 14 jan. 2014.

CIB (International Council for Research and Innovation in Building and Construction) Agenda 21 para a Construção Sustentável / trad. De I. Gonçalves, T. Whitaker. Ed. De G. Weinstock, D. M. Weinstock. São Paulo. 2000.

CORDEIRO, L. de N.P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto.** Porto Alegre, 2013. 114p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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.

H. Beshr, A. A. Almusallam, M. Maslehuddin. **Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete.** Construction and Building Materials, 17 (2003), p. 97-103..

IIBS (Instituto Brasileiro de Siderurgia), SIDERURGIA BRASILEIRA – Relatório de Sustentabilidade 2014, Concepção AMCE Negócios Sustentáveis.

JACOMINO, V. M. F. et al.. **Controle ambiental das indústrias de produção de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. 302 p. ISBN: 85-88669-0566.

JOHN, V. M. **A construção, o meio ambiente e a reciclagem**. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a_construção_e.htm> Acesso em: 3 jan. 2015.

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

JOHN; V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de escória de alto-forno no Brasil**. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2000, São Paulo. Anais... São Paulo, 2000.

Kamal M, Gailan AH, Haatan A, Hameed H. **Aggregate made from industrial unprocessed slag**. In: Proceeding of the 6th international conference on concrete technology for developing countries, Amman, Jordan, 2002.

M. Maslehuddin, A.M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim, M.S. Barry, **Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes**. Constructio. Building. Materials. 17 (2003) 105-112.

MACAMBIRA, P. M. F. **O concreto em Belém do Pará: uma visão analítica de seus componentes, mão-de-obra e patologias**. 2001. Centro de ciências exatas e tecnologia. Universidade da Amazônia, Belém, 2001.

MARQUES, J. C. **Escória de alto-forno: estudo visando seu emprego no preparo de argamassa e concreto**. São Paulo: Dissertação (Mestrado) Poli – USP, 1994.

MARQUES, João Carlos. **Adição de escória ao concreto para economizar cimento**. In: Seminário IPT/UFES. Resíduos Industriais para Redução de Custos na Construção Civil. Anais. Vitória.

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.

METHA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: PINI, 1994.

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.

MONTEIRO, P. J. M. **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties.** Berkeley, California, 1985. 153 p. Tese (Doutorado) – University of California, Berkeley.

NASCIMENTO, K. A. L. **Utilização de escória proveniente da reciclagem do aço em concreto de cimento Portland.** 2007. 07 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

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

NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto** / A. M. Neville, J. J. Brooks: tradução: Ruy Alberto Cremonini. – 2. Ed. – Porto Alegre: Bookman, 2013.

PONTÍFICA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalúrgica. Fonte: FGV, 2007.

QUEIROZ, M.T.A.; SANTOS, G.P.P.; CALDEIRA, B.R.; OLIVEIRA, C.L. **Resultados preliminares: utilização da escória de alto-forno a carvão vegetal em estruturas de concreto.** In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA – SEGET, 2007.

R. Khan and S. B. Shinde, “**Effect of unprocessed steel slag on the strength of concrete when used as fine aggregate.**” International Journal of Civil Engineering & Technology, vol. 4, no. 2, pp. 231–239, 2013.

ROSÁRIO, K.A.; FERREIRA, T.N.S.; SOUZA, R.S.; SOUZA, P.S.L. **Utilização de escória de alto-forno na produção de concreto: Análise da influência da substituição do agregado graúdo.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2010, Fortaleza. **Anais...**Fortaleza, 2010.

Sekaran, A., Palaniswamy, M., and Balaraju, S. (2015). “ A Study on Suitability of EAF Oxidizing Slag in Concrete: An Eco-Friendly and Sustainable Replacement for Natural Coarse Aggregate. “The Scientific World Journal, 10. 1155/2015/972567, 1-8. Online publication date: 1-Jan-2015.

SILVA, Alessandro Leonardo – **Reciclagem de Escória Cristalizada para a produção de Argamassas.** Dissertação de Mestrado, Itajubá – Dezembro/2006.

SILVA, J. G. **Análise do ciclo de vida de tijolos prensados de escória de alto-forno.** 2005. 33 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2005.

SOARES, A. K. (coordenador do projeto). **Caracterização de escória siderúrgicas com propriedades aglomerantes.** São Paulo: ABCP, 1982. 211p. (Relatório final do projeto – Contrato de compromisso de cooperação técnica financeira 24/81).

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.

SOUZA, J. L. F.; MACÊDO, J.A.G.; SOARES, J.B.; MOTTA, L.M.G.; ARAÚJO, J.L.; RODRIGUES, R.L. **Comportamento de agregados graúdos em misturas betuminosas a quente no Estado da Paraíba.** In: 37º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO/ 11º ENACOR – Nº. 052: Os caminhos da integração. Goiânia/GO **Anais...**Goiânia, 2006.

VENUAT, M. **Fabricação e aplicação de cimentos de escória.** In: Colóquio sobre Cimento Portland de Alto-Forno. Anais São Paulo: IBRACON, 1976. 35p.

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.

WEINSTOCK, G.; WEINSTOCK, D. M. (Ed.). **CIB: Agenda 21 para
construção sustentável.** Trad. De I. Gonçalves, T. Whitaker. São Paulo: [s. n.], 2000. 131
p.

7. Apêndices

7.1. Apêndice A – Resultados dos Ensaio Mecânicos Realizados

Tabela 7.1 - 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
Referência (0%)	20,43	20,63	0,40
	20,09		
	21,12		
	20,86		
EAF (20%)	19,64	21,51	1,26
	23,15		
	21,34		
	21,91		
EAF (30%)	24,32	24,57	0,36
	24,64		
	25,12		
	24,19		
EAF (40%)	26,14	26,51	0,50
	25,89		
	26,92		
	27,08		

Tabela 7.2 - 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
Referência (0%)	25,90	25,33	0,61
	24,42		
	25,12		
	25,88		
EAF (20%)	27,23	25,97	1,16
	26,64		
	25,87		
	24,15		
EAF (30%)	26,88	27,87	0,73
	28,50		
	27,46		
	28,63		
EAF (40%)	30,15	29,68	0,97
	29,20		
	28,40		
	30,98		

Tabela 7.3 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno.

Concreto	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Média	Desvio Padrão
Referência (0%)	1,89	1,86	0,22
	1,49		
	2,02		
	2,05		
EAF (20%)	1,79	2,05	0,16
	2,22		
	2,07		
	2,10		
EAF (30%)	2,39	2,43	0,08
	2,43		
	2,56		
	2,33		
EAF (40%)	2,57	2,61	0,12
	2,45		
	2,64		
	2,77		

Tabela 7.4 - Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral, aos 63 dias, dos concretos produzidos com e sem escória de alto-forno.

Concreto	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Média	Desvio Padrão
Referência (0%)	2,59	2,57	0,08
	2,43		
	2,61		
	2,64		
EAF (20%)	2,79	2,60	0,11
	2,57		
	2,51		
	2,54		
EAF (30%)	2,71	2,77	0,07
	2,85		
	2,69		
	2,82		
EAF (40%)	3,14	3,09	0,11
	3,09		
	2,91		
	3,22		

Tabela 7.5 - 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
Referência (0%)	20,15	19,28	1,00
	19,45		
	17,60		
	19,90		
EAF (20%)	19,79	20,60	0,72
	21,34		
	21,30		
	19,98		
EAF (30%)	23,77	24,06	0,71
	23,08		
	24,40		
	24,99		
EAF (40%)	25,09	25,20	0,43
	24,55		
	25,67		
	25,49		

Tabela 7.6 - 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
Referência (0%)	25,39	24,32	0,78
	23,24		
	24,10		
	24,56		
EAF (20%)	26,95	25,72	0,88
	24,79		
	26,14		
	25,00		
EAF (30%)	25,08	27,18	1,47
	28,14		
	26,59		
	28,92		
EAF (40%)	29,42	28,57	1,07
	27,76		
	27,28		
	29,80		

7.2. Apêndice B – Figuras do Módulo de Deformação Secante

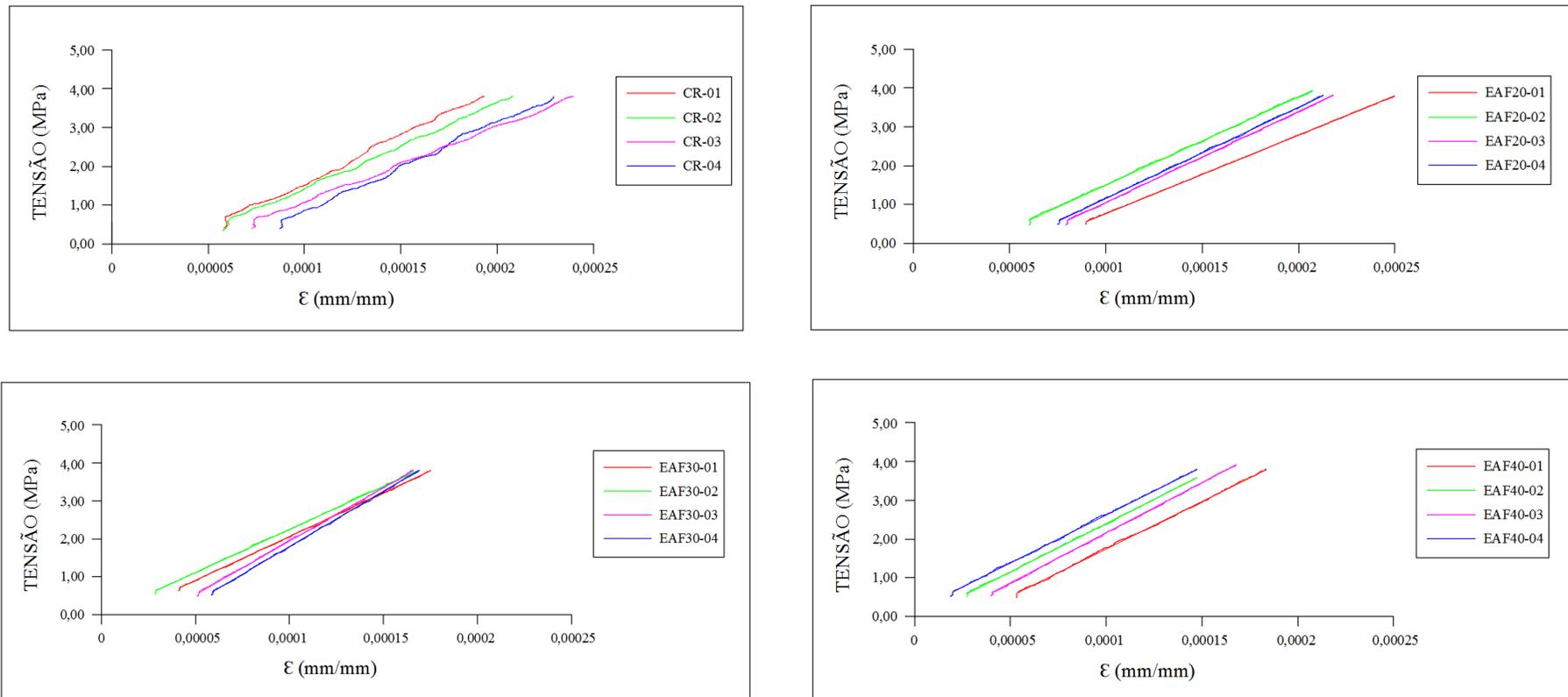


Figura 7.1 - Módulo de elasticidade dos concretos de referência (CR), concretos com 20% (EAF20), 30% (EAF30) e 40% (EAF40) de escória de alto-forno, aos 28 dias

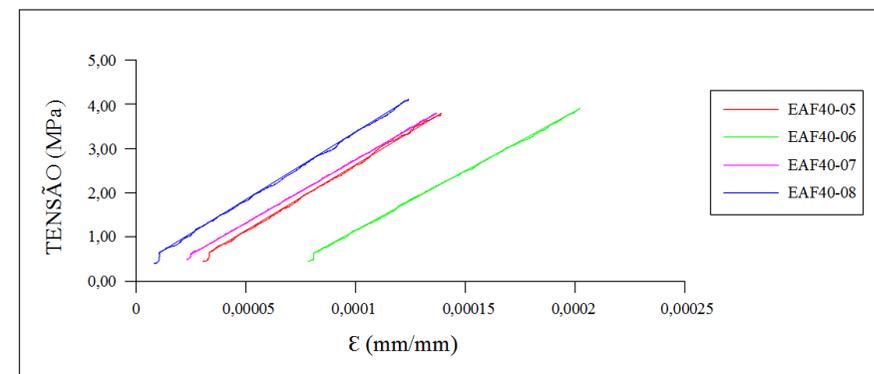
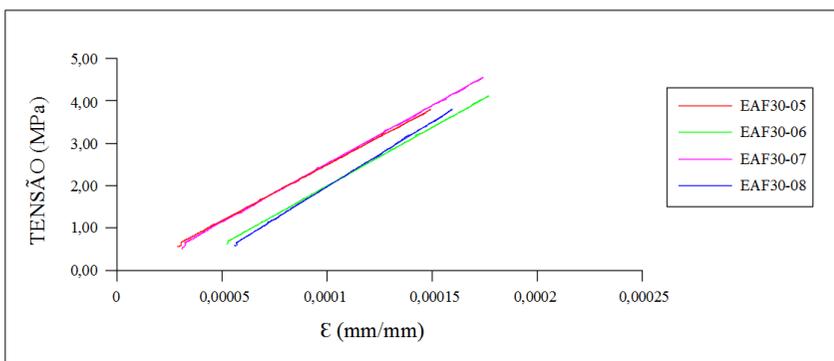
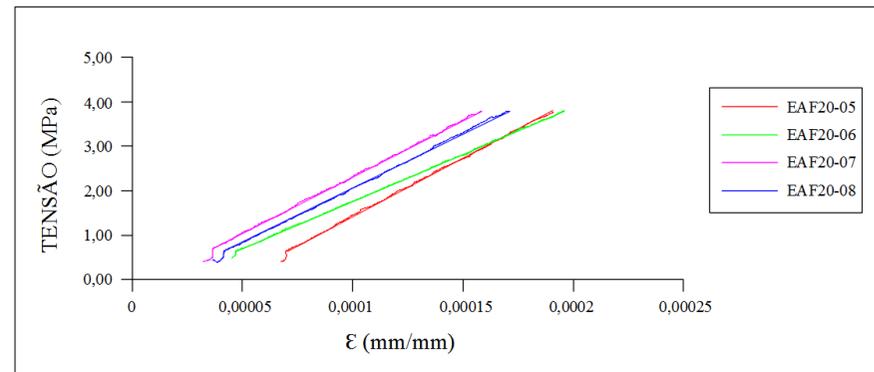
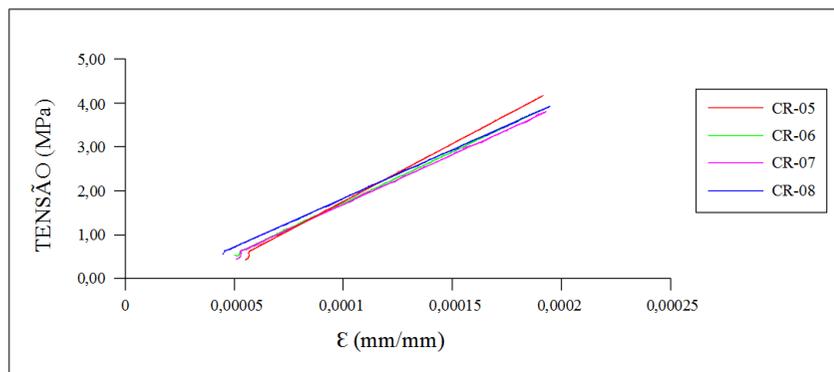


Figura 7.2 - Módulo de elasticidade dos concretos de referência (CR), concretos com 20% (EAF20), 30% (EAF30) e 40% (EAF40) de escória de alto-forno, aos 63 dias

7.3. Apêndice C – Resultados das Análises Estatísticas Realizadas nos Ensaios Mecânicos.

Neste apêndice são apresentadas as análises dos dados referentes aos concretos produzidos com substituição parcial (20%, 30% e 40%, em massa) do agregado graúdo natural (AGN) pela escória de alto-forno (EAF), variando as idades das amostras e como variáveis têm-se a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade (variável em análise).

- Teste de normalidade

Para evitar alteração no nível de significância os dados foram analisados para avaliar se os mesmos eram provenientes de uma população normal. A análise dos p-valores (Tabela 7.7, 7.8 e 7.9), permite aceitar as hipóteses correspondentes ao nível de significância de 0,05. Todos os resultados permitem a conclusão que todos os dados são provenientes de uma população normal.

Tabela 7.7 - Teste de normalidade para todos os grupos de dados para análise de comparação no ensaio de resistência à compressão.

28 dias			
	Shapiro-Wilk		
EAF (%)	Estatística	df	P-valor
0	0,9727	4	0,8584
20	0,9859	4	0,9357
30	0,9322	4	0,6072
40	0,8853	4	0,3617
63 dias			
	Shapiro-Wilk		
EAF (%)	Estatística	df	P-valor
0	0,8721	4	0,3058
20	0,9404	4	0,6566
30	0,8916	4	0,3905
40	0,9867	4	0,9400

Tabela 7.8 - Teste de normalidade para todos os grupos de dados para análise de comparação no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

28 dias			
	Shapiro-Wilk		
EAF (%)	Estatística	df	P-valor
0	0,8228	4	0,1635
20	0,9094	4	0,4794
30	0,9529	4	0,7343
40	0,9990	4	0,9972
63 dias			
	Shapiro-Wilk		
EAF (%)	Estatística	df	P-valor
0	0,8234	4	0,1513
20	0,8007	4	0,1035
30	0,8715	4	0,3037
40	0,9460	4	0,6913

Tabela 7.9 - Teste de normalidade para todos os grupos de dados para análise de comparação no ensaio de módulo de elasticidade.

28 dias			
	Shapiro-Wilk		
EAF (%)	Estatística	df	P-valor
0	0,8363	4	0,185
20	0,7721	4	0,0609
30	0,9922	4	0,9684
40	0,9455	4	0,6886
63 dias			
	Shapiro-Wilk		
EAF (%)	Estatística	df	P-valor
0	0,9991	4	0,9977
20	0,9121	4	0,4938
30	0,8620	4	0,2677
40	0,8930	4	0,3971

- Teste de homogeneidade

Os dados foram testados quanto à sua homocedasticidade. Os valores estão apresentados nas Tabelas (7.10, 7.11, e 7.12), e permitem a validação da homogeneidade das variâncias.

Tabela 7.10 - Teste de Levene para homogeneidade dos dados no ensaio de resistência à compressão.

Teste de Homocedasticidade 28			
Levene Estatística	df1	df2	Sig.
1,9674	3	12	0,173
Teste de Homocedasticidade 63			
Levene Estatística	df1	df2	Sig.
0,4908	3	12	0,695

Tabela 7.11 - Teste de Levene para homogeneidade dos dados no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Teste de Homocedasticidade 28			
Levene Estatística	df1	df2	Sig.
0,4813	3	12	0,701
Teste de Homocedasticidade 63			
Levene Estatística	df1	df2	Sig.
0,1258	3	12	0,943

Tabela 7.12 - Teste de Levene para homogeneidade dos dados no ensaio de módulo de elasticidade.

Teste de Homocedasticidade 28			
Levene Estatística	df1	df2	Sig.
0,4716	3	12	0,708
Teste de Homocedasticidade 63			
Levene Estatística	df1	df2	Sig.
0,6564	3	12	0,594

- Análise entre idades (teste t não pareado)

Os dados foram comparados entre os dois grupos de idades utilizando-se o teste T de Student de dois grupos independentes, em função do mesmo ser indicado para

comparação de duas médias quando os grupos são independentes (Tabelas 7.13, 7.14, e 7.15).

Tabela 7.13 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (Resultados do ensaio de resistência à compressão).

Teste t não pareado	T-valor	Graus de liberdade	Média 28	Média 63	P-valor
0	11,18	6	20,63	25,33	0,000031
20	4,51	6	21,51	25,97	0,004049
30	7,04	6	24,57	27,87	0,000411
40	5,02	6	26,51	29,68	0,002396

Tabela 7.14 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral).

Teste t não pareado	T-valor	Graus de liberdade	Média 28	Média 63	P-valor
0	-5,14	6	1,86	2,57	0,00214
20	-5,02	6	2,05	2,60	0,0024
30	-5,41	6	2,43	2,77	0,00164
40	-5,15	6	2,61	3,09	0,00212

Tabela 7.15 - Teste T não pareado para dois grupos independentes (Resultados do ensaio de módulo de elasticidade).

Teste t não pareado	T-valor	Graus de liberdade	Média 28	Média 63	P-valor
0	-6,91	6	19,28	24,32	0,00046
20	-7,76	6	20,58	25,72	0,00024
30	-3,53	6	24,06	26,92	0,01233
40	-4,94	6	25,20	28,55	0,00261

- Análise entre grupos (anova de uma via)

Quando os dados dos ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, foram comparados entre grupos para a mesma condição de idades não houve diferença entre os grupos, de acordo com as Tabelas 7.16, 7.17 e 7.18.

Tabela 7.16 - Anova de uma via para comparação entre grupos maiores que dois e independentes (Resultados do ensaio de resistência à compressão).

Tabela da Anova 28 dias					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Teor de adição	3	89,02	29,67	41,75	0
Resíduos	12	8,53	0,71		
Tabela da Anova 63 dias					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Teor de adição	3	46,45	15,48	14,56	0,0003
Resíduos	12	12,76	1,06		

Tabela 7.17 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral).

Tabela da Anova 28 dias					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Teor de adição	3	1,40	0,47	14,73	0,0003
Resíduos	12	0,38	0,03		
Tabela da Anova 63 dias					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Teor de adição	3	0,68	0,23	18,74	0,0001
Resíduos	12	0,15	0,01		

Tabela 7.18 - Anova de uma via para comparação entre os grupos maiores que dois e independentes (Resultados do ensaio de módulo de elasticidade).

Tabela da Anova 28 dias					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Teor de adição	3	94,43	31,48	42,25	0
Resíduos	12	8,94	0,74		
Tabela da Anova 63 dias					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Teor de adição	3	38,58	12,86	9,60	0,0016
Resíduos	12	16,08	1,34		

- Comparações múltiplas

Resistência à compressão axial

Para idade de 28 dias, não houve incremento de resistência à compressão nos concretos com substituição de 20% de EAF em comparação aos de referência. Ao passe que nos teores de 30 e 40% obteve-se um aumento significativo de resistência (Tabela 7.19).

Tabela 7.19 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 dias (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P < 0,05$).

28 dias				
EAF (%)	EAF (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	20	-0,885	2,655	0,476
	30	2,173	5,712	0,000*
	40	4,113	7,652	0,000*
20	0	-0,885	2,655	0,476
	30	1,288	4,827	0,001*
	40	3,228	6,767	0,000*
30	0	2,173	5,712	0,000*
	20	1,288	4,827	0,001*
	40	0,170	3,710	0,030*
40	0	4,113	7,652	0,000*
	20	3,228	6,767	0,000*
	30	0,170	3,710	0,030*

Para idade de 63 dias, os concretos de referência, 20 e 30% de EAF não apresentaram aumento significativo de resistência, enquanto que os concretos com 40% obtiveram um aumento de desempenho mecânico em relação aos outros (Tabela 7.20).

Tabela 7.20 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 63 dias (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P < 0,05$).

63 dias				
EAF (%)	EAF (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0	20	-1,522	2,807	0,815
	30	0,373	4,702	0,021*
	40	2,188	6,517	0,000*
20	0	-1,522	2,807	0,815
	30	-0,270	4,060	0,094
	40	1,545	5,875	0,001*
30	0	0,373	4,702	0,021*
	20	-0,270	4,060	0,094
	40	-0,350	3,980	0,112
40	0	2,188	6,517	0,000*
	20	1,545	5,875	0,001*
	30	-0,350	3,980	0,112

Resistência à tração por compressão diametral

Na idade de 28 dias, não se obteve incremento de resistência à tração nos concretos com 20% de EAF em relação aos concretos convencionais. Sendo que nas substituições de 30 e 40% alcançou-se um aumento significativo de resistência, em comparação aos concretos de referência e 20%. Entretanto, ao relacionar as resistências nas adições de 30 e 40%, identifica-se que ambas não apresentaram diferença significativa entre as mesmas (Tabelas 7.21).

Tabela 7.21 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 dias (Os números que estão na cor vermelha indicam que há diferença significativa; $P < 0,05$).

28 dias				
EAF(%)	EAF (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0,00	20,00	-0,192	0,557	0,495
	30,00	0,191	0,939	0,004*
	40,00	0,371	1,119	0,000*
20,00	0,00	-0,192	0,557	0,495
	30,00	0,008	0,757	0,045*
	40,00	0,188	0,937	0,004*
30,00	0,00	0,191	0,939	0,004*
	20,00	0,008	0,757	0,045*
	40,00	-0,194	0,554	0,506
40,00	0,00	0,371	1,119	0,000*
	20,00	0,188	0,937	0,004*
	30,00	-0,194	0,554	0,506

Para idade de 63 dias, todos os concretos com adição de resíduo industrial apresentaram diferença significativa de resistência à tração em relação ao concreto sem escória. Apesar disso, ao correlacionar o desempenho mecânico de todos os concretos com adição de EAF, observa-se que nenhuns dos teores de substituição diferiram significativamente entre eles. (Tabelas 7.22).

Tabela 7.22 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 63 dias (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P < 0,05$).

63 dias				
EAF (%)	EAF (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0,00	20,00	-0,196	0,266	0,969
	30,00	-0,031	0,431	0,099
	40,00	0,291	0,754	0,000*
20,00	0,00	-0,196	0,266	0,969
	30,00	-0,066	0,396	0,203
	40,00	0,256	0,719	0,000*
30,00	0,00	-0,031	0,431	0,099
	20,00	-0,066	0,396	0,203
	40,00	0,091	0,554	0,007*
40,00	0,00	0,291	0,754	0,000*
	20,00	0,256	0,719	0,000*
	30,00	0,091	0,554	0,007*

Módulo de elasticidade

Para idade de 28 dias, a substituição de 20% do agregado graúdo natural por escória não apresentou diferença significativa no módulo de elasticidade em relação ao concreto sem escória. No entanto nas substituições de 30 e 40% conseguiu-se um ganho considerável de módulo de deformação (Tabelas 7.23).

Tabela 7.23 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 28 dias (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P < 0,05$).

28 dias				
EAF (%)	EAF (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0,00	20,00	-0,504	3,119	0,195
	30,00	2,973	6,597	0,000*
	40,00	4,113	7,737	0,000*
20,00	0,00	-0,504	3,119	0,195
	30,00	1,666	5,289	0,000*
	40,00	2,806	6,429	0,000*
30,00	0,00	2,973	6,597	0,000*
	20,00	1,666	5,289	0,000*
	40,00	-0,672	2,952	0,291
40,00	0,00	4,113	7,737	0,000*
	20,00	2,806	6,429	0,000*
	30,00	-0,672	2,952	0,291

Para idade de 63 dias, todas as amostras analisadas apresentaram o mesmo comportamento dos concretos analisados aos 28 dias (Tabelas 7.24).

Tabela 7.24 - Teste de Tukey para comparação dos dados na condição de 63 dias (Os números que estão com asterisco indicam que há diferença significativa; $P < 0,05$).

63 dias				
EAFCV (%)	EAFCV (%)	Limite Inferior	Limite Superior	P - valor
0,00	20,00	-1,033	3,828	0,362
	30,00	0,165	5,025	0,035*
	40,00	1,792	6,653	0,001*
20,00	0,00	-1,033	3,828	0,362
	30,00	-1,233	3,628	0,487
	40,00	0,395	5,255	0,022*
30,00	0,00	0,165	5,025	0,035*
	20,00	-1,233	3,628	0,487
	40,00	-0,803	4,058	0,245
40,00	0,00	1,792	6,653	0,001*
	20,00	0,395	5,255	0,022*
	30,00	-0,803	4,058	0,245