



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**GYSELLE MACIEL DE ALMEIDA**

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA PRODUZIDA EM ALTO-FORNO  
A CARVÃO VEGETAL COMO AGREGADO GRAÚDO E  
MIÚDO PARA CONCRETO**

Belém  
2014

**GYSELLE MACIEL DE ALMEIDA**

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA PRODUZIDA EM ALTO-FORNO  
A CARVÃO VEGETAL COMO AGREGADO GRAÚDO E  
MIÚDO PARA CONCRETO**

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

**Orientador: Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo**

Belém  
2014

**GYSELLE MACIEL DE ALMEIDA**

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA PRODUZIDA EM ALTO-FORNO  
A CARVÃO VEGETAL COMO AGREGADO GRAÚDO E  
MIÚDO PARA CONCRETO**

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

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo  
Orientador – UFPA

---

Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza  
Co-orientador – UFPA

---

Prof. Dr. Alexandre Silva de Vargas  
Examinador Externo – Universidade FEEVALE

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro  
Examinador Interno

Belém  
2014

**À Deus.**

**À minha mãe e a minha tia.**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pelos dons e oportunidades recebidos, e que através de seu espírito, permitiu que eu levantasse a cada dia acreditando ser capaz, sempre me dando força e perseverança para a realização deste trabalho.

A minha família, em especial minha mãe Maria das Graças e minha tia Maria de Lourdes, que por meio de suas preces fervorosas e apoio incondicional, souberam multiplicar minha coragem para suportar as dificuldades e seguir em frente.

Ao professor Alcebíades Negrão Macêdo, pela orientação, paciência e confiança em mim depositada.

Ao professor e amigo Paulo Sérgio Lima Souza pela dedicada orientação, apoio inestimável, compreensão e, sobretudo paciência nesta fase de minha formação. Muito obrigada por tudo professor!

Aos técnicos Seu Maneca, Arnaldo, Marli e Dona Cleide pela amizade e apoio técnico.

Aos meus amigos da pós-graduação Kátia Alrelhia, Taiza Ferreira, Alex Garcia, Josiel Nascimento, Rosielle Pegado, Nilton Cesar Queiroz, Agleílson Borges, Danielle Ramos, Carlos Fonseca, Felipe Reis e Mikhail Luczynski, pela amizade, força, companheirismo e apoio demonstrados.

Ao meu noivo Carlos Júnior pelo incentivo, compreensão e companheirismo nos maus e bons momentos.

A minha amiga Laida Krinny pelo incentivo, apoio e orações, que mesmo longe sempre esteve presente.

Ao meu grande e fiel amigo Luziel Santos, com quem pude dividir vários momentos difíceis dessa jornada e sempre soube ser um companheiro incansável de todas as horas.

Ao amigo Fábio Araújo pelo estímulo nos momentos precisos.

Ao amigo Marcus Vinícius Menezes pela sugestão do tema e amizade.

Ao meu coordenador e amigo Sávio Oliveira, cuja ajuda na reta final foi imprescindível para a realização deste sonho.

Ao amigo Isaías Nazareth, cujo auxílio foi imprescindível durante a fase experimental.

Ao Laboratório de Engenharia Civil da UFPA e da Faculdade Ideal pelos equipamentos, instalações cedidas e contribuição de seus funcionários, em especial o amigo Liomar.

Às empresas CVRD e SINOBRAS por abrirem suas portas e me possibilitarem um melhor entendimento a respeito do objeto deste estudo.

À COSIPAR, em especial ao Engenheiro Jadson Sousa, pelo apoio recebido desde o início desta pesquisa, inclusive pelo fornecimento dos materiais que viabilizaram a mesma.

Ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro para desenvolvimento deste trabalho.

A Universidade Federal do Pará e ao Instituto de Tecnologia que tão bem me acolheram, permitiram minha formação como engenheira civil e agora propiciam mais este passo.

Deixo aqui meus agradecimentos a todas as pessoas e entidades que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. Seja pelo apoio moral, intelectual e até mesmo financeiro. A todos, muito obrigada!

***Mas aqueles que esperam no Senhor renovam as suas forças. Voam alto como águias; correm e não ficam exaustos, andam e não se cansam.  
(Isaías 40:31).***

## RESUMO

A produção de aço exige diversas etapas e gera grandes quantidades de escórias, cujos estoques crescentes vêm preocupando metalurgistas e ambientalistas, com vistas à utilização racional desse subproduto industrial, de maneira a minimizar possíveis problemas ambientais. Nesse sentido, a construção civil apresenta-se como um setor bastante apto à utilização de técnicas de reaproveitamento, de resíduos e subprodutos, proveniente das mais diversas indústrias. Além dos benefícios ambientais, como a redução do consumo de recursos naturais não-renováveis, o surgimento de materiais de construção alternativos possibilita a diminuição no custo da construção, fator importante quando avalia-se o déficit habitacional existente no Brasil. Nesta pesquisa, é estudada a possibilidade da reciclagem da escória de alto-forno, partindo-se da hipótese que é viável sua utilização como agregados graúdos e miúdos para concretos. Sua influência é estudada sobre a característica do concreto no estado fresco (trabalhabilidade) e no estado endurecido (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade). Na realização deste trabalho variou-se os teores de substituição da escória de alto-forno, as relações água/cimento e as idades de rompimento dos corpos-de-prova. A metodologia baseou-se em ensaios laboratoriais e no uso de ferramentas estatísticas para a validação dos resultados. Com os resultados obtidos neste estudo, verificou-se que a utilização de elevados teores de escória de alto-forno como agregado graúdo e miúdo para concretos, de uma maneira geral, ou não teve nenhuma influência ou não exerceram uma influência positiva sobre as propriedades estudadas. Conclui-se que os resultados encontrados apontaram para a não viabilidade técnica da utilização deste resíduo como agregados para concretos.

Palavras-chave: Escória. Alto-forno. Agregado. Concreto.

## **ABSTRACT**

The steel production requires many stages and generates large quantities of slag, these rising stocks are worrying metallurgists and environmentalists aiming the rational use of this industrial byproduct, in order to minimize possible environmental problems. In this sense, the civil construction presents a quite fit sector to the use of reuse techniques, of wastes and byproducts, from different industries. Besides the environmental benefits, like the reduction of non-renewable natural resources, the emergence alternative construction materials enables the reduction in the cost of construction, important factor when is evaluated the deficiency existing housing in Brazil. In this research is studied a possible recycling of blast furnace slag, from of hypothesis that is viable its utilization as coarse aggregate and fine aggregate for concretes. Its influence is studied on the characteristic of concrete in fresh state (workability) and in hardened state (axial compressive strength, tensile strength by diametral compression and elastic modulus). In this work the content of substitutions of blast furnace slag was diversified, the water-to-cement ratio and the ages of breaking of the specimens. The used methodology was based on lab rehearsals and in the use of statistical tools to validate the results. With the results obtained in this study, it was found that the use of large amounts of blast furnace slag as coarse and kid aggregate for concrete, in general, had no influence or not exerted a positive influence in the studied properties. We conclude that the findings pointed to the non-technical viability of using this waste as aggregates for concrete.

Keywords: Slag. Blast furnace. Aggregate. Concrete.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-	PIB DO 4º Trimestre de 2010 em relação ao ano anterior.....	18
Figura 2.1-	Evolução da Produção de Ferro Gusa.....	30
Figura 2.2 -	Seção transversal de um alto-forno.....	32
Figura 2.3-	Sistema de limpeza de um alto-forno.....	34
Figura 2.4-	Cabine de comando um alto-forno.....	36
Figura 2.5-	Vista de baterias de fornos para carvoejamento do tipo “rabo quente”.....	37
Figura 2.6-	Fluxograma do carvão vegetal.....	38
Figura 2.7-	Fluxograma do minério de ferro.....	41
Figura 2.8-	Sinter com diâmetro entre 5mm e 50mm.....	42
Figura 2.9-	Pelotas com diâmetro entre 5mm e 18mm .....	42
Figura 2.10-	Minério granulado com diâmetro entre 6mm e 40 mm.....	43
Figura 2.11-	Arranjo interno do alto-forno.....	45
Figura 2.12 (a) e (b)-	Obtenção do ferro-gusa e escória.....	48
Figura 2.13-	Visão parcial da corrida de ferro gusa.....	49
Figura 2.14-	Roda de lingotamento na siderúrgica SINOBRAS.....	49
Figura 2.15 (a) e (b)-	Ferro-gusa.....	50
Figuras 3.1(a) e (b)-	Ferro-gusa e escória líquidos.....	53
Figura 3.2-	Resfriamento brusco da escória de alto-forno, por jatos d' água, na Companhia Siderúrgica de Tubarão.....	55
Figura 3.3-	Resfriamento da escória de alto-forno ao ar livre- Siderúrgica SINOBRAS.....	56
Figura 3.4-	Esquema de resfriamento da escória de alto-forno pelo processo GALEX .....	57
Figura 3.5-	Possíveis ligações moleculares nas escórias.....	60
Figura 3.6-	Construção e obra finalizada com escória de alto-forno em substituição ao cimento.....	63

Figura 3.7(a) e (b)-	Imagem ampliada em microscópio eletrônico da estrutura interna depois de 1ano (A) 10°C (B) 60°C.....	66
Figura 4.1(a) e (b)-	Amostras de escória de alto-forno.....	77
Figura 4.2(a) e (b)-	Difratograma de raios-x das escórias.....	79
Figura 4.3-	Planta de beneficiamento de escória- COSIPAR.....	80
Figura 4.4-	Escória sendo britada no pátio da usina-COSIPAR.....	80
Figura 4.5-	Coleta do material .....	81
Figura 4.6-	Etapas de beneficiamento. (a) Escória antes do processo. (b) Escória graúda. (c) Escória miúda.....	82
Figura 4.7-	Diagrama de dosagem.....	86
Figura 4.8-	Medida do abatimento em concretos com agregados naturais e com escória. (a) concreto com agregados naturais. (b) concreto com escória.....	88
Figura 4.9 -	Corpos-de-prova após desmoldagem.....	88
Figura 4.10 (a) e (b) -	Corpos-de-prova cilíndricos 10cmx20cm. (a) Após desmoldagem. (b) Armazenados.....	89
Figura 5.1 (a) e (b) -	Resistência à compressão em função do efeito isolado da relação a/c: (a) em concretos com escória graúda. (b) em concretos com escória miúda.....	95
Figura 5.2 (a) e (b) -	Resistência à compressão em função do efeito isolado do teor de substituição de: (a) escória graúda. (b) escória miúda.....	96
Figura 5.3 (a) e (b) -	Resistência à compressão em função do efeito isolado da idade em concretos com: (a) escória graúda. (b) escória miúda.....	98
Figura 5.4 (a) e (b) -	Resistência à compressão em função da interação teor de substituição: (a) - (escória graúda) x relação a/c. (b) - (escória miúda) x relação a/c.....	99

Figura 5.5 (a) e (b) -	Resistência à compressão em função da interação teor de substituição: (a) – escória graúda x idade. (b) – escória miúda x idade.....	101
Figura 5.6 (a) e (b) -	Resistência à tração por compressão diametral em função do efeito isolado da relação a/c: (a) em concretos com escória graúda. (b) em concretos com escória miúda.....	105
Figura 5.7(a) e (b) -	Resistência à tração por compressão diametral em função do efeito isolado do teor de substituição de: (a) escória graúda. (b) escória miúda.....	106
Figura 5.8(a) e (b)-	Resistência à tração por compressão diametral em função do efeito isolado da idade em concretos com: (a) escória graúda. (b) escória miúda.....	108
Figura 5.9 (a) e (b) -	Resistência à tração por compressão diametral por em função da interação teor de substituição: (a) - (escória graúda) x relação a/c. (b) – (escória miúda) x relação a/c.....	109
Figura 5.10 (a) e (b) -	Módulo de elasticidade em função do efeito isolado da relação a/c: (a) em concretos com escória graúda. (b) em concretos com escória miúda.....	113
Figura 5.11 (a) e (b) -	Módulo de elasticidade em função do efeito isolado do teor de substituição de: (a) escória graúda. (b) escória miúda.....	114
Figura 5.12 (a) e (b) -	Módulo de elasticidade em função do efeito isolado da idade em concretos com: (a) escória graúda. (b) escória miúda.....	116
Figura 5.13 (a) e (b) -	Módulo de elasticidade em função da interação teor de substituição: (a) - (escória graúda) x relação a/c. (b) – (escória miúda) x relação a/c.....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1-	Produção Siderúrgica Brasileira.....	30
Tabela 2.2-	Teores químicos médios do ferro gusa.....	50
Tabela 2.3-	Teor dos elementos constituintes do pó e da lama do AF...	51
Tabela 2.4 -	Composição do gás de AF .....	51
Tabela 3.1-	Composição química típica das escórias de alto-forno.....	59
Tabela 3.2-	Componentes mineralógicos das escórias.....	61
Tabela 4.1-	Resumo do Programa Experimental.....	72
Tabela 4.2-	Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP II F 32.....	74
Tabela 4.3-	Características do agregado miúdo (areia).....	75
Tabela 4.4-	Características do agregado graúdo (seixo).....	76
Tabela 4.5-	Análise química das amostras de escória de alto-forno.....	78
Tabela 4.6-	Características da escória miúda (agregado miúdo).....	83
Tabela 4.7-	Características da escória graúda (agregado graúdo).....	83
Tabela 4.8-	Traços unitários em massa e o consumo de cimento por metro cúbico de concreto para o concreto de referência.....	86
Tabela 5.1-	Abatimentos obtidos nos traços de concretos.....	91
Tabela 5.2-	Resistência à compressão axial dos concretos.....	93
Tabela 5.3-	Resultados da ANOVA em relação à resistência à compressão axial dos concretos.....	94
Tabela 5.4-	Resistência à tração por compressão diametral dos concretos.....	103

Tabela 5.5-	Resultados da ANOVA em relação à resistência à tração por compressão diametral dos concretos.....	104
Tabela 5.6-	Módulo de elasticidade dos concretos.....	111
Tabela 5.7-	Resultados da ANOVA em relação ao módulo de elasticidade dos concretos.....	112

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIN	Agência Investimentos e Notícias
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil
ANOVA	Análise de Variância
ASCE	Entidade ligada ao American Society of Civil Engineers
CERF	Civil Engineering Research Foundation
CIB	Conselho Internacional para a Investigação e Inovação em Construção
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COSIPA	Companhia Siderúrgica Paulista
COSIPAR	Companhia Siderúrgica do Pará
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
CST	Companhia Siderúrgica de Tubarão
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EAFBB	Escória de Alto-Forno Bruta Brita
EAFG	Escória de Alto-Forno Granulada
EAFGM	Escória de Alto-Forno Granulada Moída
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FGV	Fundação Getúlio Vargas
FIEPA	Federação das Indústrias do Pará
GAF	Gases de Alto-Forno
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBS	Instituto Brasileiro de Siderurgia
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
MME	Ministério de Minas e Energia
NEXES	Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas
ONU	Organização das Nações Unidas

PET CIVIL	Programa de Educação Tutorial em Engenharia Civil
PAC.	Programa de Aceleração do Crescimento
PIB	Produto Interno Bruto
PUC-RIO	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
SCA	Slag Cement Association
SIDEPAR	Siderúrgica do Pará S.A
SINDFER	Sindicato das Indústrias do Ferro
SINDIFERPA	Sindicato das Indústrias de Ferro Gusa do Estado do Pará
SINDUSCON-	Sindicato da Indústria da Construção do Estado de São Paulo
SPSS	Statistical Package for the Sciences
SINOBRAS	Siderúrgica Norte Brasil S/A
UFPA	Universidade Federal do Pará

## SUMÁRIO

1	<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	18
1.2	JUSTIFICATIVA.....	22
1.3	OBJETIVOS.....	26
1.3.1	Objetivo Geral.....	26
1.3.2	Objetivos Específicos.....	26
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	27
2	<b>A INDÚSTRIA SIDERÚRGICA</b> .....	28
2.1	HISTÓRICO DA PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA NO BRASIL.....	28
2.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DO FERRO-GUSA.....	31
2.3	MATÉRIAS-PRIMAS EMPREGADAS NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO FERRO-GUSA .....	35
2.3.1	<b>Carvão vegetal</b> .....	36
2.3.2	<b>Minério de ferro</b> .....	40
2.3.3	<b>Fundentes</b> .....	43
2.4	OPERAÇÃO DOS ALTOS-FORNOS A CARVÃO VEGETAL.....	44
2.5	OS CO-PRODUTOS GERADOS NAS INDÚSTRIAS DE FERRO-GUSA A CARVÃO VEGETAL.....	51
3	<b>AS ESCÓRIAS SIDERÚRGICAS</b> .....	52
3.1	ESCÓRIA DE ALTO-FORNO.....	52
3.1.1	<b>A formação da escória de alto-forno a carvão vegetal</b> .....	52
3.1.2	<b>Técnicas de resfriamento das escórias</b> .....	54

3.1.2.1	Resfriamento brusco com água.....	54
3.1.2.2	Resfriamento ao ar.....	55
3.1.2.3	Resfriamento pelo processo GALEX.....	57
3.1.3	<b>Características químicas da escória de alto-forno.....</b>	<b>58</b>
3.1.4	<b>Organização atômica da escória de alto-forno.....</b>	<b>59</b>
3.1.5	<b>Componentes mineralógicos da escória de alto-forno.....</b>	<b>60</b>
3.1.6	<b>Utilização de escória de alto-forno na produção de cimento Portland.....</b>	<b>61</b>
3.1.7	<b>Utilização de escória de alto-forno na produção de cimentos de escória.....</b>	<b>62</b>
3.1.8	<b>Utilização de escória de alto-forno na produção de concretos como adição mineral.....</b>	<b>63</b>
3.1.9	<b>Utilização de escória de alto-forno como agregados para concretos.....</b>	<b>67</b>
4	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>71</b>
4.1	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS.....	71
4.1.1	Variáveis de respostas.....	71
4.2	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	73
4.2.1	<b>Cimento.....</b>	<b>73</b>
4.2.2	<b>Agregado miúdo.....</b>	<b>74</b>
4.2.3	<b>Agregado graúdo.....</b>	<b>75</b>
4.2.4	<b>Escória de alto-forno.....</b>	<b>76</b>
4.2.5	<b>Água.....</b>	<b>84</b>
4.2.6	<b>Aditivo.....</b>	<b>84</b>

4.3	ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO USO DA ESCÓRIA COMO AGREGADOS EM CONCRETOS.....	85
4.4	DOSAGEM DOS CONCRETOS.....	85
4.4.1	<b>Definição dos traços</b> .....	86
4.5.	PRODUÇÃO, MOLDAGEM E ARMAZENAMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA.....	87
5	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	90
5.1	CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	90
5.2	CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	92
5.2.1	<b>Resistência à compressão axial</b> .....	92
5.2.2	<b>Resistência à tração por compressão diametral</b> .....	102
5.2.3	<b>Módulo de elasticidade</b> .....	111
6	<b>CONCLUSÕES</b> .....	120
6.1	<b>Considerações finais</b> .....	120
6.1.1	<b>Em relação à resistência à compressão</b> .....	120
6.1.2	<b>Em relação à resistência à tração</b> .....	121
6.1.3	<b>Em relação ao módulo de elasticidade</b> .....	122
6.2	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	123
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	124

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

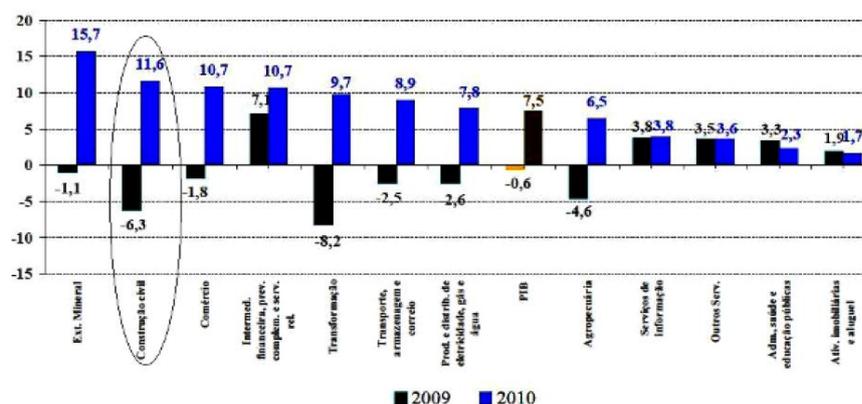
O atual contexto do mercado nacional tem sido marcado pelo aprimoramento em buscar estratégias de desenvolvimento, através do estímulo em atividades de setores que deem respostas rápidas, consistentes e de grande impacto na reativação da economia. Fato este percebido na indústria de construção civil, que vem confirmando o potencial do setor no atual cenário competitivo e globalizado. De acordo com Pastore (1998) a indústria da construção civil é responsável pelos ganhos de produtividade dos diferentes setores, o que justifica a sua denominação de poderosa alavanca para o desenvolvimento sustentado do país.

A importância econômica do setor da construção civil é representada pela sua participação no Produto Interno Bruto (PIB). Segundo (CONSTRUBUSINES, 2010) o setor da construção civil que esteve estagnado por quase 20 anos, mostra que o crescimento foi de 2,5% entre 2007 e 2008, representando 8,3% do total de ocupados no setor. Até setembro de 2009, o número de ocupados na cadeia atingiu 7,6 mil postos.

Segundo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), na comparação com igual período de 2009, houve expansão do PIB que cresceu 5,0% no último trimestre do ano.

Ainda segundo o IBGE, a indústria da construção civil cresceu 11,6%, beneficiada pelo aumento das operações de crédito para a habitação e pelo aumento de ocupações no setor, como observa-se a Figura 1.1

**Figura 1.1-** PIB DO 4º Trimestre de 2010 em relação ao ano anterior.



Fonte: IBGE (2010).

O desempenho favorável da construção civil nos últimos anos, disseminado por todas as regiões do país, refletiu, em especial, o ambiente de crescimento dos fluxos de investimento e da massa salarial, sustentado pela ampliação da disponibilidade das operações de crédito imobiliário. Adicionalmente, a evolução recente do setor esteve condicionada pela elevação dos gastos em infraestrutura no âmbito do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC).

O Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo (SINDUSCON-SP) fez previsão que o crescimento da construção em 2010 seria puxado pela ampliação dos investimentos públicos e privados. A expectativa seria que os investimentos do setor imobiliário somem R\$ 202 bilhões em 2010, ante R\$ 170 bilhões em 2009. O sindicato ainda previu o total de R\$ 625 bilhões em investimentos no Brasil previstos para 2010, assim como 2,4 milhões de empregos formais na construção civil em 2010, um crescimento de 8% em relação ao número de vagas na Indústria da construção civil (SINDUSCON-SP, 2009).

De fato, esta expectativa de aquecimento na construção civil se deve aos eventos que vão precisar incorporar grandes investimentos como o resultado das eleições governamentais em 2010, as obras do programa Minha Casa, Minha Vida e os investimentos em infraestrutura necessários para a realização da Copa do Mundo de Futebol de 2014 e os Jogos Olímpicos de 2016 no Brasil.

Com esses investimentos, a despesa em produtos da construção por habitante atingiu R\$ 1.276,0 (CONSTRUBUSINES, 2010). Gerando impactos sociais, econômicos e, sobretudo ambientais, dado ao grande volume de matéria-prima consumida como também pela quantidade de resíduos gerados. “A indústria da construção e seus produtos consomem aproximadamente 40% da energia e dos recursos naturais e gera 40% dos resíduos produzidos por todo o conjunto de atividades humanas, mas podem atingir até 75%, como no caso dos EUA”. (SJOSTROM apud. JOHN et al., 2001).

Segundo a definição constante no Art. 1º da Resolução 001/86 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), impacto ambiental é uma alteração ambiental julgada significativa, ou seja, é qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem estar da população, as atividades sociais e econômicas, a biota, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais. Este conceito tem sido geralmente associado

aos efeitos ambientais considerados negativos ou adversos e que decorrem principalmente de atividades ou intervenções humanas.

Na história da humanidade por muito tempo a visão de progresso vinha se confundindo com um crescente domínio e transformação da natureza. Nesse paradigma, os recursos naturais eram vistos como ilimitados. Resíduos gerados durante a produção e ao final da vida útil dos produtos eram depositados em aterros, caracterizando um modelo linear de produção. A preservação da natureza era vista de forma geral como antagônica ao desenvolvimento, e preservá-la significava apenas a criação de parques e áreas especiais destinadas ao cultivo de espécies, evitando assim a extinção para as gerações futuras.

Contudo, a partir da metade do século passado começou-se a questionar tal modelo, em decorrência da percepção sobre a sua incapacidade de desenvolvimento, de preservação ambiental e até mesmo de garantir a sobrevivência da espécie humana, surge então à visão de desenvolvimento sustentável.

O conceito de sustentabilidade como sendo o melhor aproveitamento das matérias-primas, o reaproveitamento de resíduos e a disposição adequada dos resíduos impróprios para o uso, passou a ser entendido como uma alternativa plausível à degradação ambiental. A proteção do solo e da água, a limitação da geração de resíduos e sua reutilização são itens chaves no chamado “Desenvolvimento Sustentável”, podendo ser definido como o desenvolvimento que atende as necessidades de hoje sem comprometer a capacidade de possíveis gerações futuras de atender suas próprias necessidades (BOUDERAU, 2000).

A preocupação ambiental se generalizou no mundo todo. Cada vez mais, consumidores, investidores e a sociedade em geral, tornam-se mais exigentes, não apenas no que se refere à qualidade dos produtos, mas em termos de responsabilidade socioambiental. Em especial, as empresas usuárias dos recursos naturais, como é o caso da construção civil, uma pesquisa internacional realizada pela Civil Engineering Research Foundation (CERF), entidade ligada ao American Society of Civil Engineers (ASCE) dos Estados Unidos, que revela que a questão ambiental é uma das maiores preocupações dos líderes do setor de construção civil, logo atrás de informática (MEYER, 2006).

Todavia, a preocupação do setor com desenvolvimento sustentável só se consolidou em 1999 com a publicação do relatório do Conselho Internacional para a

Investigação e Inovação em Construção (CIB) “Agenda 21 sobre Construção Sustentável” (PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL DA AGENDA 21, 2000).

Segundo a Agenda 21 *on Sustainable Construction for Developing Countries* (2000), “construção sustentável significa que os princípios do desenvolvimento sustentável são aplicados a todo o ciclo de construção, da extração e beneficiamento dos materiais, passando pelo planejamento, projeto e construção de edifícios e obras de infraestrutura, até a sua demolição e gestão dos resíduos dela resultantes.

Neste contexto, a cadeia produtiva da construção civil- assim como as outras cadeias industriais- deve promover o desenvolvimento sustentável, indo ao encontro de novas posturas ambientais, pesquisa de materiais e tecnologias mais adequadas, sob o ponto de vista ambiental. Essas pesquisas visam normalmente a busca de materiais alternativos em substituição aos materiais convencionais, marcados pelo elevado consumo de matérias-primas e energia não-renováveis. Exemplo disto é o que acontece com as escórias, subproduto da siderurgia, tem-se apresentando como uma opção viável em substituição aos materiais comumente empregados na construção civil, uma vez que estabelecer formas para o aproveitamento destes resíduos sempre foi um dos grandes desafios da sociedade moderna.

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS), o Brasil é hoje o décimo maior produtor mundial de aço e, em 2007, foi registrado como sendo o sexto ano consecutivo de forte crescimento da produção e demanda no mercado mundial. A demanda de aço bruto superou a marca de 34 milhões de toneladas, com uma expansão de 6,8%. Existe uma previsão de investimentos no setor de US\$ 58,7 bilhões até o ano de 2015, com projeção de alcançar a capacidade instalada de 66,7 milhões de toneladas ao final desse período.

Com o aumento da produção de aço aumentam, também, a produção de resíduos, entre eles as escórias. Em 2006, de acordo com o IBS, a indústria do aço produziu, aproximadamente, 13,5 milhões de toneladas de resíduos. As escórias de alto forno e de aciaria representaram 80% desse total, com 10,8 milhões de toneladas (ROSA, 2009).

Para o aproveitamento destes “resíduos”, a construção civil apresenta-se como uma das melhores alternativas, pois pode utilizar estes milhões de toneladas de subprodutos siderúrgicos em diversas aplicações: fabricação de cimento Portland

modificado, agregados de concreto, subleito rodoviário ou lastro de ferrovias, entre outras (ALBUQUERQUE apud. NASCIMENTO, 2007).

O uso da escória de alto forno na indústria cimenteira como substituição ao *clínquer* do cimento Portland já é consagrado e, a cada dia, novos estudos vêm ratificar suas propriedades e consagrar novas aplicações. Por outro lado, a quase totalidade das escórias ácidas (não aplicáveis na fabricação do cimento), produzidas por altos-fornos a carvão vegetal, ainda se constituem “resíduos” que se acumulam nos pátios das usinas. Deste modo, esta pesquisa direcionou seu foco ao estudo a escória de alto-forno a carvão vegetal, visando a adequação do seu uso no concreto, transformando-as em sub-produto de interesse comercial.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

No Brasil a produção de aço vem aumentando consideravelmente nos últimos anos, de acordo com dados do IBS a capacidade de produção que em 2006 era de 37 milhões de toneladas/ano chegou em 2012 a 52 milhões de toneladas/ano.

O estado do Pará possui uma economia essencialmente mineradora conforme classificação do Banco Mundial (SILVA apud. BARATA et.al, 2002). Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME) o estado atingiu em 2007 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 seguinte o Sindicato das Indústrias de Ferro Gusa do Estado do Pará (SINDIFERPA) anunciou que o sistema produtivo de ferro gusa no Pará apresentou uma capacidade instalada de produção do minério de ferro de 2,9 milhões de ton/ano, tendo como principais mercados consumidores a Ásia, América Latina e América do Norte. Seu pólo guseiro fica localizado no distrito industrial da cidade de Marabá, distante 485 km da capital Belém, sendo formado por nove siderúrgicas, das quais apenas quatro estão em funcionamento: Companhia Siderúrgica do Pará (COSIPAR), Ferro Gusa Carajás, Siderúrgica Norte Brasil S/A (SINOBRAS) e Siderúrgica do Pará S.A (SIDEPAR).

Não há dúvidas que o setor siderúrgico é um dos principais geradores de divisas para o estado. Entretanto, a produção de ferro-gusa utilizando nos altos-fornos o carvão vegetal, trata-se de uma atividade geradora de resíduos

sólidos, os quais se não dispostos adequadamente podem se constituir em fontes poluidoras do solo, do ar e da água. Dentre estes resíduos encontra-se em larga escala, a escória de alto-forno, que segundo dados internos da siderúrgica COSIPAR, no ano de 2010 foram geradas 96.000 mil toneladas de escórias da produção do gusa.

A tentativa de dar viabilidade às escórias ácidas produzidas por altos-fornos a carvão vegetal tem motivado cada vez mais a investigação científica, visando minimizar o impacto ambiental provocado pelo acúmulo destes resíduos, através do desenvolvimento de aplicações apropriadas a estas.

De acordo com Jonh (2000) a construção civil, dentre os setores industriais, é um dos que mais tem possibilidades de aproveitamento de grandes quantidades de subprodutos, devido ao número de insumos e volume de matéria-prima que consome.

O volume de recursos naturais utilizados pela construção civil corresponde a, pelo menos, um terço do total consumido anualmente, por todos os segmentos da sociedade (SJÖSTRÖM, 1992; JOHN, 2000). De acordo com o Worldwatch Institute, em nível mundial, a construção de edifícios consome, anualmente, 40% de matéria-prima, 66% de madeira, 40% de energia e cerca de 16% do volume de água (DIMSON, 1996; LIPPIATT, 1998; IWATA; HISAMATSU; DOHNOMAE, 2000; LIPPIATT; NORRIS, 1995).

Nos últimos anos, houve uma tendência a um desequilíbrio entre a demanda na indústria da construção civil e o abastecimento de insumos, em decorrência do esgotamento da capacidade produtiva. Prova disso, é o que acontece na exploração dos agregados: a areia e o seixo, onde o aquecimento da construção civil tem gerado uma maior procura destes materiais, cuja a extração em sua grande maioria, feita de maneira desordenada e sem nenhuma fiscalização vem conduzindo a uma diminuição crescente de jazidas disponíveis para o atendimento dos mercados consumidores nas principais regiões metropolitanas.

Segundo a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil (ANEPAC) a demanda de agregados no país teve um crescimento de 2% no ano de 2009, e fez projeções de 4% em 2010, ano eleitoral com obras de infraestrutura e habitação. Em seguida no ano de 2011, novo governo, será de 3%. O intervalo de 2012 a 2014 será um ano de grandes eventos, como a Copa do Mundo de Futebol e os Jogos Olímpicos, equivalendo um crescimento

entre 4% a 4,5%. Restando para 2015 apenas 3%, acumulando de 2009 a 2015 27% de crescimento.

A situação atual do mercado de agregados é preocupante, em face de sua utilização em investimentos de grandes impactos como PAC, Minha Casa Minha Vida, Pré-Sal, Copa do Mundo de Futebol de 2014, Jogos Olímpicos de 2016 e outros do setor privado implicarão em grande aumento da demanda por agregados (ANEPAC, 2009).

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

Os principais locais de produção de areia são várzeas e leitos de rios, depósitos lacustres, mantos de decomposição de rochas, arenitos e pegmatitos decompostos. Na construção civil, a areia é empregada como agregado para concretos, argamassas, blocos e pavimentação. Sua granulação e forma têm importante papel na economia do consumo de cimento na preparação de argamassas ou de concreto (SANTOS, 2008). Segundo pesquisas dos especialistas em recursos minerais do Departamento Nacional de produção Mineral (DNPM), em 2007 o consumo de areia no Estado do Pará foi de 420.988 milhões de toneladas.

O cascalho ou seixo rolado é encontrado em um número considerável nas regiões circunvizinhas a cidade de Belém. Souza et al.,(2006) o conceitua como um agregado natural, proveniente da erosão, transporte e decomposição de detritos de desagregação das rochas pelos agentes de intemperismo. São agregados mais econômicos porque não necessitam de processos de britagem e existem em grandes quantidades na natureza, sendo fácil sua extração. Apresenta-se normalmente em leitos de espessura variável, geralmente em torno de 0,50 a 2,00 metros, constituídos por seixos de quartzo de diversos tamanhos, arredondados a sub arredondados. Os referidos depósitos estão associados a sedimentos areno-argilosos e argilo-arenosos predominantemente de cores amareladas e avermelhadas. Os depósitos considerados encontram-se em uma faixa de direção aproximada a nordeste e sudoeste, nos municípios de Bragança e Ourém, aflorando

ao longo das principais rodovias e nas margens de rios e igarapé (MACAMBIRA, 2001).

Na porção Sudeste do Estado do Pará foi realizado estudos que confirmam a presença de áreas com potencial para a extração e seixo e areia, exploradas desorganizadamente e sem fiscalização. Segundo o estudo Perspectiva para o meio ambiente urbano-GeoMarabá realizado pela ONU Habitat et al. (2010) “A degradação dos leitos dos rios Tocantins e Itacaiúnas, provocada pela extração descontrolada de areia e seixos, vem alterando significativamente o ecossistema fluvial e deterioração dos patrimônios público e privada”.

A retirada da natureza dos agregados naturais se dá através de jazidas, para o agregado natural seco, e de fundos de rios, para o agregado natural lavado. A depredação do meio ambiente pela retirada deste material trás problemas como assoreamento de rios e morte da biodiversidade. Deixando grandes “desertos” após a retirada do agregado, afinal a jazida não é eterna, e indo em direção ao próximo solo inexplorado.

Uma outra forma de extração e mais usual de areia e seixo é a lavra-a céu-aberto, onde as técnicas de desmonte do solo deixam como resultado grandes crateras ou contribuem para a queda das margens dos rios. Além do comprometimento dos recursos naturais, havendo ainda o comprometimento da vida humana - os “mergulhadores” das dragas trabalham em condições inadequadas, e anualmente a saúde de dezenas de homens é sacrificada, impossibilitando-os de realizar outras atividades funcionais.

Este cenário tem contribuído diretamente para o encarecimento do preço final, uma vez, que a perda ou esterilização de importantes reservas minerais, tem levado a buscar novas áreas de mineração cada vez mais distantes dos pontos de consumo.

Diante deste breve levantamento, fica evidente que o excessivo consumo de agregados demandado pela cadeia produtiva da construção civil, tem sido uma preocupação constante, dadas as perspectivas de garantia de suprimento futuro. Isto tem feito com que centros de pesquisa e universidades partam em busca de materiais alternativos, que apresentem características construtivas compatíveis ou similares aos convencionalmente empregados, atendendo as 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 deste estudo, o resíduo proveniente da indústria produtora de ferro gusa, a escória de alto-forno. Acredita-se que os resultados obtidos neste possam fornecer informações para a viabilização do seu uso no concreto, tornando, deste modo, este trabalho importante sob vários aspectos. Em primeiro lugar, por proporcionar ao meio técnico outra opção de agregados que possibilite a produção de concretos com características compatíveis aos convencionais, sem a necessidade de altos consumos dos agregados naturais. Em segundo, por proporcionar informações que possam viabilizar o uso de um resíduo industrial, cujo acúmulo tem se revelado um problema as siderúrgicas. E por fim um caráter social, uma vez que, os menores custos tornariam o produto acessível a todas as classes. Desta maneira, esta pesquisa torna-se relevante, tanto no sentido de apresentar os benefícios técnicos da incorporação da escória de alto-forno, quanto no sentido de ser uma estratégia de sustentabilidade socioambiental para a cadeia produtiva do aço e do concreto.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

O objetivo principal dessa pesquisa é avaliar sob o ponto de vista do desempenho mecânico: resistência à compressão uniaxial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, os concretos produzidos utilizando escória de alto-forno a carvão vegetal, como substituição parcial e total aos agregados naturais usualmente empregados (seixo e areia).

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

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

- a) Verificar as diferenças nas propriedades dos concretos com diferentes teores de escórias de alto-forno graúda e miúda (0%, 50% e 100%);
- b) Avaliar a influência que estes teores exercem sobre a trabalhabilidade dos concretos;

- c) Analisar o a influência da relação água/(cimento+adição), da idade e do teor de adição sobre as propriedades analisadas;
- d) Contribuir para a minimização dos impactos ao meio ambiente, pela produção de concretos de maneira mais sustentável, através do aproveitamento da escória de alto-forno.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em seis seções, conforme descrito a seguir:

Na seção 1, apresentam-se a introdução, a justificativa, os objetivos e a organização do trabalho.

Na seção 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o processo siderúrgico, contemplando seu aspecto histórico, equipamentos utilizados, matérias-primas empregadas, sistema de operação dos altos-fornos e os principais co-produtos gerados.

A seção 3 traz uma revisão bibliográfica das escórias siderúrgicas, focando, principalmente, as escórias de alto-forno, abordando seu processo de formação, técnicas de resfriamento, características químicas, organização atômica, composição mineralógica e as suas potenciais aplicações correntes na indústria da construção civil.

Na seção 4 é descrita toda a parte experimental desenvolvida neste trabalho, mostrando a forma com que foram feitos o planejamento e a execução dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados e os ensaios mecânicos empregados na avaliação das propriedades dos concretos. Neste capítulo também, são definidas todas as variáveis do estudo.

A seção 5 apresenta os resultados e análises obtidos no programa experimental, bem como a correlação entre as variáveis e as propriedades avaliadas.

Na seção 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho, bem como sugestões para futuras pesquisas nesta área.

## 2 A INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

### 2.1 HISTÓRICO DA PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA NO BRASIL

Após o descobrimento do Brasil, em 1554 o Padre Anchieta já relatava à Corte Portuguesa as ocorrências de ferro e prata. Em 1587, foi iniciada a primeira industrialização do metal, por Afonso Sardinha, na Serra de Cubatão, no Rio Jeribatuba, afluente do Rio Pinheiros, na antiga freguesia de Santo Amaro, perto de São Paulo. Em Biraçoiaba ou Araçoiaba (interior de São Paulo), lá pelos longínquos anos de 1589, foram construídos dois pequenos fornos para a produção de ferro com nosso minério. Durante o fim do século XVI e todo o século XVII a exploração continuou em pequena escala no Estado de São Paulo e Minas Gerais. Em janeiro de 1785, com a febre do ouro que tudo absorvia e exigia a dedicação de todos os recursos ao enriquecimento da Metrópole, Dona Maria I (a Louca) assinou um alvará proibindo de modo terminante a existência de fábricas na Colônia. Foi somente após a ascensão de D. João VI ao trono que foi permitida a instalação de fábricas de ferro no Brasil. Datam de 1799 os trabalhos do erudito Sr. José Vieira Couto, antigo professor de Ciências Naturais em Coimbra, que propunha a criação de grandes usinas e pregava a utilização dos minérios do Vale do Rio Doce. Suas idéias foram defendidas pelo intendente Manoel Ferreira da Câmara Bethencourt e Sá, o mesmo que foi o realizador da fábrica instalada no Morro do Pilar (Minas Gerais), em 1809, onde construiu o primeiro forno realmente "alto" no país e que fundiu gusa líquido em dezembro de 1813 (SOUZA, 2007).

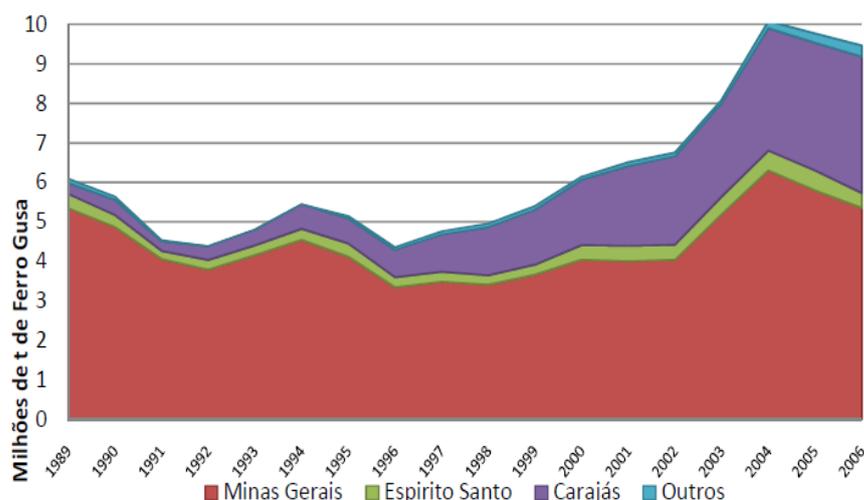
Em São Paulo, a atividade siderúrgica reanimou-se com a iniciativa da fundação de uma fábrica de ferro em 1810. Nesta época surgiram dois nomes que estão ligados a siderurgia brasileira, trata-se de Esehwege e a Varnhagen, metalurgistas e geólogos, respectivamente que vieram para o Brasil a serviço da Corte Real. Wilhelm von Esehwege montou perto de Congonhas do Campo, na "Fábrica de Ferro", um baixo forno tipo Sueco e obteve em dezembro de 1812, a primeira corrida de gusa no Brasil. Esta fábrica chegou a contar com 8 fornos com 1,5m de altura cada, produzindo "ferro coado" (hoje denominado ferro-gusa). Frederico Luiz Guilherme de Varnhagen veio prestar sua colaboração na então denominada "Real Fábrica de Ferro de São João de Ipanema", em São Paulo, assumindo a direção da fábrica em 1815 e obtendo a primeira corrida de gusa em

1818. Com a volta de Varnhagen e Esehwege para a Europa, após a declaração da Independência, em 1822, os fornos da Fazenda da Fábrica, do Morro do Pilar e de Ipanema, paulatinamente, foram se extinguindo, deixando de funcionar definitivamente em 1860 (SOUZA, 2007).

Durante a guerra do Paraguai, os fornos de Ipanema foram reacesos e deram sua contribuição às armas do Império, sendo fechado novamente em 1895. As indústrias metalúrgicas e mecânicas regrediam, os pequenos fornos se apagavam; seus produtos não podiam competir em qualidade e em preço com os estrangeiros (SOUZA, 2007).

Foi somente no período entre 1917 e 1930 que a industrialização tornou-se mais efetiva, sendo criada em Sabará (Minas Gerais) a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), que mais tarde, com a cooperação da ARBED, transformou-se na Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira (SOUZA, 2007).

Detentor de uma das maiores reservas de ferro de alta qualidade do planeta, estimada em 20 bilhões de toneladas, o paque siderúrgico brasileiro é composto por 28 usinas, controladas por nove grupos empresariais. As principais regiões produtoras são o Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, onde há vários produtores integrados, e a Serra dos Carajás no estado do Pará, onde estão localizadas algumas das maiores minas de minério de ferro do mundo (INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA, 2010). Isto explica a grande participação que o setor siderúrgico tem na economia nacional, o gráfico mostrado na Figura 2.1 apresenta a evolução da produção brasileira de ferro-gusa entre os anos de 1989 a 2006.

**Figura 2.1-** Evolução da Produção de Ferro Gusa.

Fonte: Sindfer (2009).

Com o processo de privatização, o setor ganhou um novo dinamismo. Entre 1994 e 2007, as siderúrgicas investiram mais de US\$ 15 bilhões, dando prioridade para a modernização e atualização tecnológica de suas usinas. Em 2007, a produção de ferro-gusa atingiu 35,5 milhões de toneladas, sendo o ano de maior produção da série (Tabela 2.1).

**Tabela 2.1-** Produção Siderúrgica Brasileira.

Produtos	2006	2007	var. (%)
Aço bruto	30.900,9	33.784,3	9,3
Laminados	23.453,3	25.578,2	9,1
Planos	14.403,2	15.727,6	9,2
Longos	9.050,1	9.850,6	8,8
Semi-acabados para venda	6.076,6	6.004,8	-1,2
Placas	3.838,6	3.935,9	2,5
Lingotes, blocos e tarugos	2.238,0	2.068,9	-7,6
Ferro-gusa	32.451,6	35.539,7	9,5
Usinas integradas	22.985,0	25.844,1	12,4
Produtores independentes	9.466,6	9.695,6	2,4
Ferro-esponja	375,9	362,0	-3,7

Fonte: IBS (2010).

O estado de Minas Gerais, é o maior produtor de ferro-gusa do país, de acordo com dados do SINDIFERPA, possui 108 alto-fornos e cerca de 60% de sua

produção é direcionada ao mercado internacional, principalmente Estados Unidos, Europa e Ásia.

No estado do Pará (segundo maior produtor nacional de ferro-gusa), o pólo siderúrgico de Marabá conta com nove siderúrgicas, sendo responsável por 25% da produção nacional, de acordo com a Federação das Indústrias do Pará (FIEPA) ocupa a sétima posição na balança comercial paraense e quase a totalidade da produção é destinada a exportação.

O cenário estabelecido pela crise que assolou as economias mundiais no ano de 2008 e 2009, trouxe consequências danosas para o setor siderúrgico, que teve um agravamento ainda maior por conta do preço do minério de ferro, matéria-prima para a produção do gusa. Se por um lado o preço do ferro-gusa passava por uma trajetória decrescente, saltando de cerca de US\$ 600 a tonelada no segundo semestre de 2008 para um patamar de US\$ 280 em janeiro de 2009, o minério de ferro mantinha-se em uma escala crescente, custando anualmente em torno de US\$ 108 (SINDIFERPA, 2010).

Como resultado desse momento econômico houve indústrias sendo obrigadas a dar férias coletivas a seus empregados, perdas de postos de trabalho, falta de mercado comprador, sobretudo externo, diminuição da capacidade produtiva, toneladas de material em estoque armazenadas nos pátios das usinas, e até mesmo em uma considerável quantidade de casos usinas paralizarem suas atividades, como ocorreu com cinco das nove siderúrgicas paraenses.

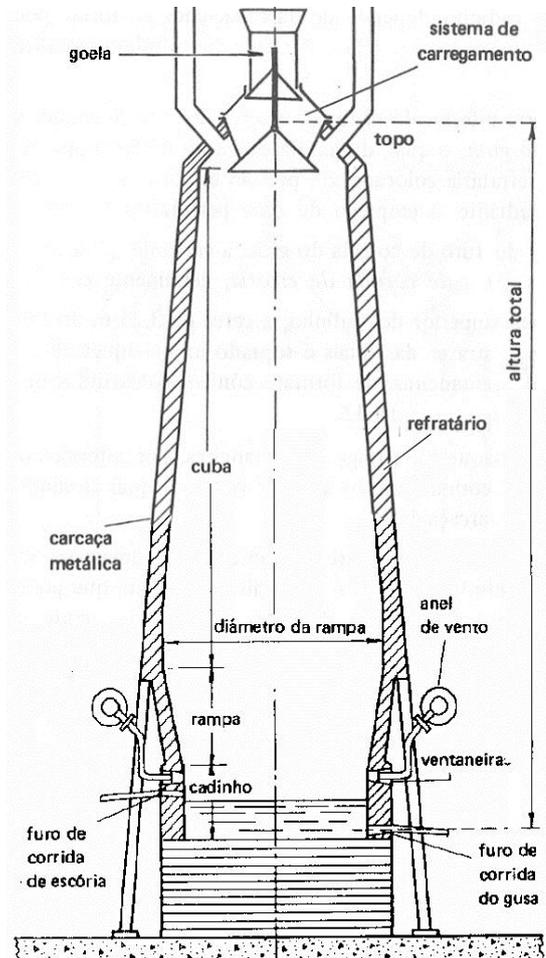
Diante disso, o governo tem implementado pacotes de medidas econômicas como forma do setor guseiro reagir à crise e retomar o desempenho, o qual tem se mostrado confiante, através das melhoras econômicas apresentadas. Segundo a Agência Investimentos e Notícias (AIN), em 2012 a projeção é de alta de 2,1%, totalizando 30,5 milhões de toneladas de ferro-gusa em média.

## 2.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DO FERRO-GUSA

A obtenção do ferro a partir de seus óxidos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) é um processo antigo, que consiste essencialmente na redução dos óxidos do minério, mediante o emprego do carbono e um sopro de ar. Na realização deste, o alto-forno instalado na usina siderúrgica constitui-se do principal equipamento utilizado para a metalurgia do

ferro. Trata-se de uma estrutura cilíndrica, de grande altura, sendo constituído pelas seguintes partes (Figura 2.2):

**Figura 2.2-** Seção transversal de um alto-forno.



Fonte: Chiaverini (1986).

**a) Cadinho:** região do forno desde a sola até o eixo das ventaneiras, em formato cilíndrico corresponde à parte do alto-forno onde se acumulam o metal fundido e a escória, resultantes das reações que ocorrem em seu interior.

**b) Rampa:** parte cônica alargando-se para cima, desde o eixo das ventaneiras até o começo do ventre; corresponde à zona, de certo modo, mais quente: aí a espessura do refratário é menor que a do cadinho, exigindo, em consequência, um resfriamento externo mediante o emprego de placas metálicas por onde circula a água.

**c) Cuba:** possui forma tronco-cônica, tem a seção menor voltada para cima, até a parte superior cilíndrica. Sua altura, a partir da rampa, pode superar 25m. É

constituída de revestimento de tijolos refratários de grande espessura, devido ao desgaste, sendo esta maior no inferior e vai diminuindo até chegar ao topo. Os tamanhos das partes e os ângulos de inclinação da rampa e da cuba têm uma variação muito grande em função de diversos projetos, puramente empíricos.

**d) Goela:** parte superior cilíndrica.

**e) Topo:** parte superior do forno onde se localizam os dispositivos de carregamento e de saída de gases.

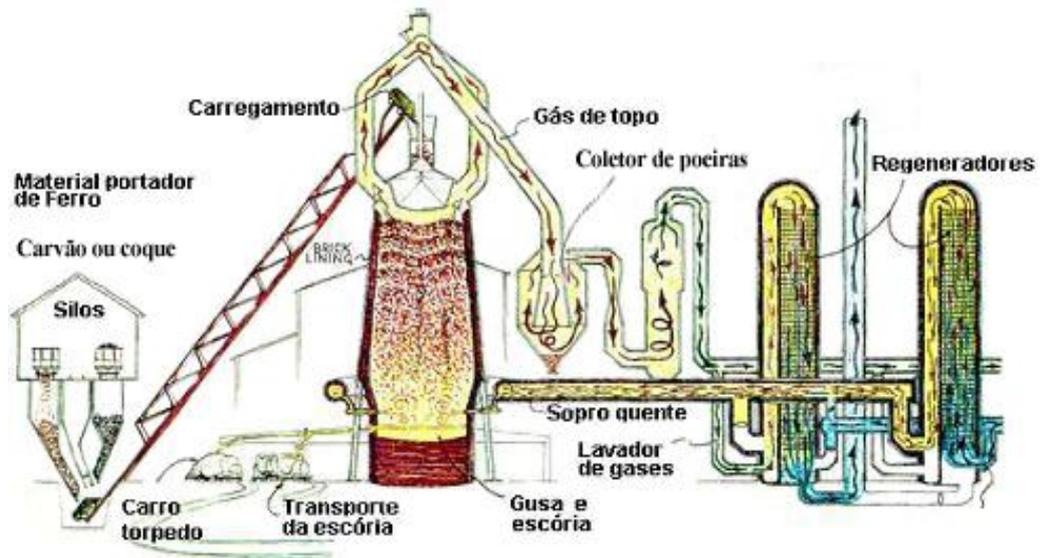
**f) Sistema de carregamento:** é constituído de uma tremonha (todo e qualquer reservatório com capacidade de dispensar o seu conteúdo de forma regulada) de recebimento de carga, ligada ao silo ou tremonha superior rotativa.

**g) Ventaneiras:** possui formato cônico, feita de cobre eletrolítico e é refrigerada a água recirculada, ajustando-se firmemente no bocal do anel suporte avançando alguns centímetros no interior do forno. Sua quantidade depende do tamanho do forno, através das ventaneiras, o ar pré-aquecido é soprado no interior do forno.

O volume total dos altos-fornos a carvão vegetal pode variar entre 33 m<sup>3</sup> até 250 m<sup>3</sup>. Possuem uma chaparia de aço externa e, internamente, um revestimento. Para a maior durabilidade desse revestimento é usado um sistema de refrigeração que consiste em chuveiros externos, no qual um filme contínuo de água é gerado por chuveiros dispostos na parte superior das chapas do cadinho e da rampa.

O gases de alto-forno resultantes dos processos de redução, apresentam entre 5 e 40 g/m<sup>3</sup> de material pulverelento (finos de minério, carvão e fundentes), devendo após a limpeza apresentar, no máximo, 10 mg/m<sup>3</sup>, sendo aproveitados depois de limpos (eliminação dos finos) em processos de aquecimento de regeneradores, fornos, produção de energia elétrica, etc. Para isto os altos-fornos contam com um sistema de limpeza de gases, cujos componentes encontram-se representados na Figura 2.3:

Figura 2.3- Sistema de limpeza de um alto-forno.



Fonte: Chiaverini (1986).

**a) Coletor de poeiras:** tem como função recolher a grande quantidade de poeiras carregadas nos gases. Num alto-forno que produz 1.600 t/dia de ferro gusa, a quantidade de poeiras arrastada pelos gases situa-se em torno de 100 t/dia. O gás penetra no coletor pela sua parte superior, cuja forma é tronco-cônica. A parte central do coletor é cilíndrica e a poeira é retirada por meio de carrinhos. O gás é em seguida, dirigido para os lavadores.

**b) Lavadores de gases:** os modelos utilizados atualmente dispõem de um precipitador eletrostático, que permite a geração de um campo elétrico que ioniza as partículas de pó, atraindo-os para as paredes do aparelho, sendo em seguida levadas ao fundo, por intermédio de uma camada de água que escorre pelas paredes.

**c) Regenerador de calor:** é o acessório mais importante. É constituído de uma câmara de combustão em que o gás do alto-forno é queimado juntamente com ar. Ao atingir a cúpula do regenerador, o gás muda de direção e atravessa, no sentido descendente, a outra seca do regenerador, ou seja, uma câmara de empilhamento de tijolos refratários, cedendo calor aos tijolos que atingem temperaturas da ordem de 1.400°C, após cerca de 1h 30min. Uma vez atingida essa temperatura, interrompe-se, por intermédio de válvulas, a entrada de ar e gás na câmara de combustão e promove-se a entrada de ar sob pressão, pela parte inferior da câmara

de empilhamento. O ar, ao atravessar os tijolos aquecidos, vai-se aquecendo, muda de direção ao chegar à cúpula do regenerador e desce pela câmara de combustão até atingir o terço inferior desta, de onde sai para o alto-forno, através da válvula de ar quente.

Se o ar necessário à combustão fosse introduzido pelas ventaneiras do alto-forno à temperatura ambiente, uma maior quantidade de combustível, neste caso, a carvão vegetal, seria gasta para gerar o calor necessário para que estes gases atingissem a temperatura da região de queima. Este sistema permite que se utilizando uma parte dos gases de topo do alto-forno para aquecer o ar, antes de soprá-lo pelas ventaneiras, se obtenha uma considerável economia de combustível sólido, que neste caso o carvão vegetal. Em um alto-forno, uma vez iniciada sua campanha, ele será operado continuamente de 4 a 10 anos com paradas curtas para manutenções planejadas.

### 2.3 MATÉRIAS-PRIMAS EMPREGADAS NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO FERRO-GUSA

O processo de produção do ferro-gusa é caracterizado por um conjunto de etapas que envolvem a recepção, manuseio, estocagem, acondicionamento físico, dosagem e misturas de matérias-primas como: minério de ferro, carvão ou coque, calcário, silicatos etc.

Todo o processo de pesagem e carregamento das matérias-primas no topo do alto-forno é realizado automaticamente, via o sistema supervisor, a partir da cabine de comando do forno (Figura 2.4).

**Figura 2.4-** Cabine de comando um alto-forno.



Os materiais são levados ao topo do alto-forno por meio de skips ou de correia transportadora, estes dois sistemas são utilizados de maneira indistinta para altos-fornos a carvão vegetal. Os skips são constituídos de caçambas (que podem ter fundo móvel ou basculante) puxadas por cabos de aço e que se movem sobre linhas paralelas e inclinadas em relação à horizontal. Os projetos atuais tem preferido o uso do sistema de correia transportadora.

### 2.3.1 Carvão vegetal

O carvão vegetal e o mineral (coque) têm a mesma função no processo siderúrgico, sendo utilizados como termorreductores do ferro presente no minério para gerar o gusa. Além disso, é a fonte energética principal do processo e responsável por estruturar a carga do alto forno. O carvão é, portanto, o principal insumo utilizado pelo setor de produção do ferro-gusa e corresponde ao maior custo da produção de gusa, segundo o Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE, 2006).

A madeira utilizada para a produção de carvão pode apresentar duas origens: florestas nativas, nas quais todas as espécies florestais são abatidas, ou florestas plantadas de espécies ou híbridos do gênero *Eucalyptus*. Atualmente, as espécies de *Eucalyptus* são as mais utilizadas para a produção de carvão, suas características de rápido crescimento e densidade considerável garantem um carvão

facilmente renovável e de boa qualidade. As principais espécies de *Eucalyptus* utilizadas no Brasil para plantação de florestas energéticas são: *E. saligna*, *E. citriodora*, *E. Camaldulensis* e *E. Urophylla*, assim como seus híbridos (CAMPOS, 2008).

A transformação da madeira em carvão é feita em fornos de tipos variados. Algumas fornalhas empregadas pelas grandes empresas são mecanizadas, mas o modelo mais frequente e simples é a construção com tijolos de barro, na forma de iglu. Representando pelo menos 95% dos fornos em atividades (BRITO et al., 2006), os fornos do tipo “rabo quente” apresentam baixo custo de instalação. Podem ser construídos com barro (em poucas horas), enterrados em encostas ou feitos de alvenaria (tijolos maciços), conforme ilustrado na Figura 2.5.

**Figura 2.5-** Vista de baterias de fornos para carvoejamento do tipo “rabo quente”.



Fonte: Souza (2007).

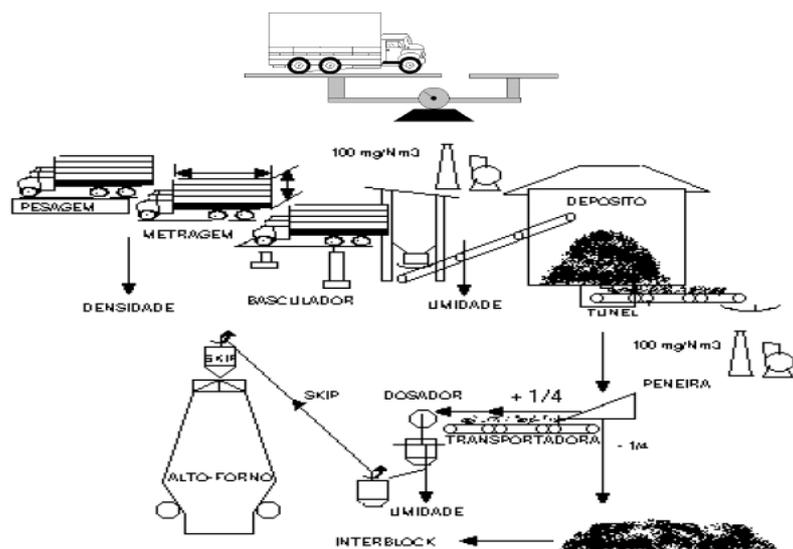
Os fornos deste tipo são semiesféricos com diâmetro médio de 3,0 x 2,30 m de altura. O ar penetra o forno por oito janelas de ventilação na base, os gases saem por orifícios distribuídos em toda parte do forno, os quais são fechados progressivamente pelo carvoeiro, que controla o processo de acordo com a cor da fumaça (PELÁEZ-SAMANIEGO et al., 2008).

O transporte de carvões para suprir a demanda das usinas siderúrgicas é em função da quantidade, peso e valor do referido carvão. Como a demanda por carvão se dá em grande volume, o seu transporte deve ser feito por meios que possibilitem uma maior capacidade de carga.

Antes de ser medido em volume, visando o acerto da quantidade comprada, o carvão vegetal passa por uma peneira fixa de 3/8". O carvão vegetal granulado é estocado em silos fechados ou vai direto para o sistema de carregamento do alto-forno. Essa última prática, chamada de descarga direta de carvão, depende muito da estratégia da empresa com relação ao estoque do material nos silos e, tecnicamente, diminui a geração de finos de carvão vegetal em função de um menor manuseio.

A Figura 2.6 apresenta o fluxograma esquemático de suprimento de uma empresa siderúrgica que utiliza o carvão vegetal como agente redutor de minério de ferro.

**Figura 2.6-** Fluxograma do carvão vegetal.



Fonte: Sousa (2010).

Conforme já mencionado anteriormente, para a operação do alto-forno, precisa-se de combustível sólido que seja rico em carbono, e que, por meio de sua queima, forneça a energia térmica necessária às reações químicas de redução do minério de ferro. Além disso, tal combustível deve ter resistência mecânica e granulometria adequadas a fim de suportar a carga e permitir a ascensão dos gases gerados no processo (PUC-RIO-CERTIFICAÇÃO DIGITAL). Assim, é de suma importância que o carvão produzido atenda aos requisitos de qualidade, dentre os quais destacam-se os sugeridos por CAMPOS (2008):

- a) Ser inodoro;
- b) Ser duro;
- c) Apresentar ruído metálico ao ser quebrado;
- d) Ser resistente à abrasão, não se transformando em finos de carvão vegetal;
- e) Apresentar resistência à compressão da ordem de 30kg/cm<sup>2</sup>;
- f) Não apresentar umidade superior a 12% para não comprometer a produção;
- g) A superfície de quebra deve ser curva, lisa, mostrar a estrutura da madeira e não deixar aderências;
- h) Queimar sem desprendimento de fumaça, cheiro ou fagulhas;
- i) Estar isento de tiços, pedras, terra, cinzas e outras impurezas.

O consumo de carvão vegetal está intimamente ligado com a produção industrial de ferro-gusa. Em 2005, o setor consumiu 8,7 milhões de toneladas de carvão vegetal o que equivaleu a 90,5% do seu consumo total. O consumo varia entre 3,0 e 4,2 m<sup>3</sup>/t de gusa, dependendo do forno, do carbono fixo, do carvão e da qualidade do gusa produzido (UHLIG; GOLDEMBERG; COELHO, 2008).

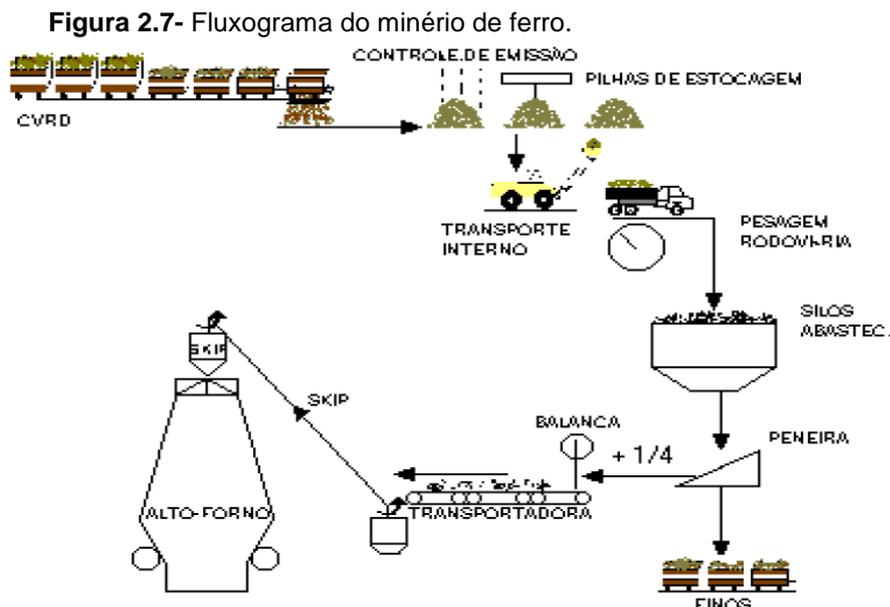
Diante dos dados estatísticos que demonstram a expressiva interligação do processo siderúrgico com o carvão vegetal, a siderurgia fazendo uso da evolução tecnológica tem incentivado e apostado na homogeneização das propriedades da madeira pelo plantio de espécies selecionadas. Essa evolução objetiva melhorar os rendimentos do carvão, o teor de carbono, a densidade do carvão e outras propriedades mecânicas almejadas na sua utilização dentro dos altos-fornos. A adoção de uma matéria-prima padronizada permite um comportamento mais regular dos altos-fornos. Além disso, a preocupação atual em conservar as florestas nativas e desenvolver fontes de energias renováveis acentua mais essa tendência (CAMPOS, 2008).

### 2.3.2 Minério de ferro

É a principal matéria-prima do alto-forno, pois é dele que se extrai o ferro. Os minerais que contêm ferro em quantidade apreciável são os óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos. Os mais importantes para a indústria siderúrgica são os óxidos:

- a) Magnetita (óxido ferroso-férrico)  $\rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$  (Contém 72,4% de Fe).
- b) Hematita (óxido férrico)  $\rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$  (Contém 69,9% de Fe).
- c) Limonita (óxido hidratado de ferro)  $\rightarrow 2\text{FeO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (Contém 48,3% Fe).

Antes de ser enfiado o minério de ferro passa pelo processo do beneficiamento, que compreende uma série de operações cujo objetivo é tornar o minério mais adequado para a utilização nos altos-fornos. Estas operações são britamento, peneiramento, mistura, moagem, concentração, classificação e aglomeração (principal). Os principais parâmetros de controle são: granulometria, composição química, redutibilidade, índice de degradação sobre redução, morfologia e índice de crepitação. Em algumas usinas este minério utiliza os “fumos” do glendons (tipo de regenerador de calor), que restos da queima dos Gases de Alto-Forno (GAF) para a secagem do minério, diminuindo assim consideravelmente a umidade do mesmo. Assim como o carvão vegetal, o tamanho dos silos de abastecimento do minério varia muito de acordo com a produção do alto-forno e com a estratégia de estocagem da empresa (OLIVEIRA, 2010). A Figura 2.7 apresenta o fluxograma esquemático do suprimento de minério de ferro em uma indústria siderúrgica.



Fonte: Sousa (2010).

Dentre os processos de beneficiamento citados, cabe uma ênfase no de aglomeração, dada a sua importância no sentido de melhorar a permeabilidade da carga do alto-forno, esta melhoria proporciona a redução do consumo de carvão e aceleração do processo de redução. Os processos mais importantes de aglomeração são a sinterização e a pelotização.

O processo de sinterização consiste em aglomerar finos de minério de ferro numa mistura com aproximadamente 5% de um carvão finamente dividido ou coque. A carga é aquecida por intermédio de queimadores e com o auxílio de fluxo de ar. A temperatura que se desenvolve durante o processo atinge 1.300 a 1.500°C, suficiente para promover a ligação das partículas finas do minério, resultando num produto uniforme e poroso chamado sínter (Figura 2.8).

**Figura 2.8-** Sinter com diâmetro entre 5mm e 50mm.



Fonte: Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia-PUC (2011).

A pelletização é o mais novo processo de aglomeração e talvez o de maior êxito. Neste processo, produzem-se inicialmente “bolas” ou “pelotas” cruas de finos de minério de alto teor ou de minério concentrado. Adiciona-se cerca de 10% de água e, geralmente, um aglomerante de natureza inorgânica. Uma vez obtidas às pelotas cruas, são secas, pré-aquecidas e então queimadas (Figura 2.9).

**Figura 2.9-** Pelotas com diâmetro entre 5mm e 18mm.



Fonte: Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia-PUC (2011).

O minério pode ainda ser levado ao forno na forma de minério granulado (Figura 2.10). No Brasil, a siderurgia a carvão vegetal utiliza nesta forma, já os fornos a coque utilizam um mix formado pelo granulado, pelotas e sinter.

**Figura 2.10**– Minério granulado com diâmetro entre 6mm e 40mm.



Fonte: Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia- PUC (2011).

### 2.3.3 Fundentes

Segundo Souza (2007), são materiais cuja composição química seja tal que, quando adicionados à carga de um aparelho metalúrgico possam reagir com seus constituintes indesejáveis, formando compostos estáveis que, no próprio aparelho (alto-forno) ou em processo subsequente, se separam do banho metálico (gusa líquido).

No caso da redução de minérios de ferro as partes indesejáveis estão contidas na própria carga metálica ou nas cinzas dos combustíveis, e são fundamentalmente sílica, alumina, fósforo e enxofre.

De acordo com (BATISTA, apud. SOUZA, 2007) a adição de materiais à base de óxidos básicos (CaO, MgO) no processo, facilitará a separação do banho metálico dos compostos indesejáveis, tal como a remoção dos mesmos do reator. O autor classifica ainda os fundentes como:

- a) Ácidos: São à base de sílica ( $\text{SiO}_2$ );
- b) Básicos: São à base de CaO e/ou de MgO;
- c) Neutro: São à base  $\text{CaF}_2$  (fluorita).

Dentre os mais importantes fundentes destacam-se:

**a) Calcário Dolomítico:** mineral basicamente composto por alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), comumente encontrado próximo à região onde o forno encontra-se instalado e é comumente bitolado entre 20 – 30mm e 30 – 45mm. A granulométrica ideal é de 15 – 25mm e 15 - 40 mm. O consumo médio registrado é de 105 kg/t de gusa produzido.

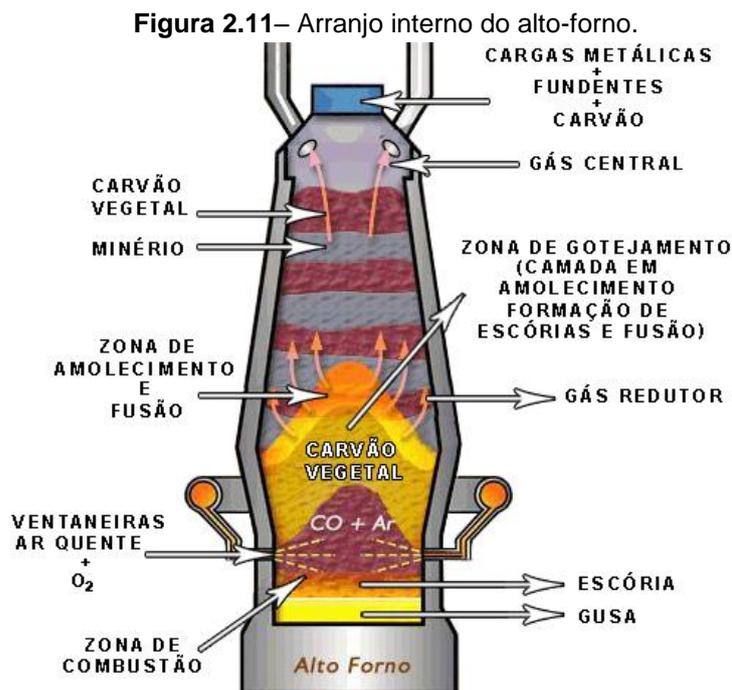
**b) Minério de manganês:** o teor de manganês varia entre 30 e 40 %, o tamanho ideal é entre 19 e 38 mm. Sendo o consumo da ordem de 13 kg/t de gusa produzido.

**c) Quartzito:** nas mesmas dimensões do manganês, isto é, de 19 a 38 mm. A análise química deve indicar teor de  $\text{SiO}_2$  superior a 94% e de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inferior a 24%. O consumo médio é de 67 kg/t de gusa produzido.

## 2.4 OPERAÇÃO DOS ALTOS-FORNOS A CARVÃO VEGETAL

A operação dos altos-fornos a carvão vegetal se inicia com carregamento do carvão, minérios e fundentes pelo topo do alto-forno. As matérias-primas armazenadas em silos são pesadas e transportadas por correias transportadoras ou skips até o topo do mesmo. No topo os materiais são introduzidos no interior do equipamento por sistemas de distribuição.

A Figura 2.11- é uma representação esquemática da estrutura interna do alto-forno, indicando a distribuição de cargas e suas principais zonas.



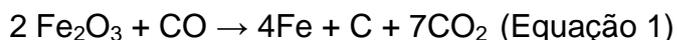
Fonte: PET CIVIL- (UFJF) (2011).

É importante que a carga esteja bem distribuída como forma de garantir uma decida regular da mesma e um leito permeável até as regiões de completa redução do minério de ferro em gusa. O processo de redução do minério de ferro se inicia quando o ar quente originado da captação e passagem deste pelos regeneradores de calor dotados de serpentinas é injetado pelas ventaneiras do reator. Nesta região o oxigênio contido no ar encontra o carbono dando origem as reações de combustão e a reação de bourboard (formação do CO como resultado da reação entre o CO<sub>2</sub> liberado e o carbono contido no carvão) que liberam os gases redutores.

A redução dos óxidos de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se processa à medida que a carga desce no interior do forno e os gases redutores, gases resultantes da queima do carvão vegetal, sobem em contra corrente pela coluna de carga, nesse processo origina-se também a emissão de gás CO<sub>2</sub> no interior do reator.

O oxigênio que estava combinado com o ferro do minério é retirado deste no processo de redução e combinado ao carbono formando os óxidos de carbono, que por sua vez constituem parte dos GAF. Outras reações químicas e a fusão da ganga (impureza contida no minério) e dos fundentes acompanham o processo, cada reação ocorre em determinada região interna do alto-forno e principalmente sobre específicas condições de temperatura.

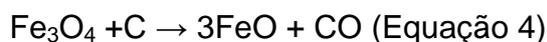
A aproximadamente 470°C uma parte da hematita é reduzida, e ocorre a formação de carbono:



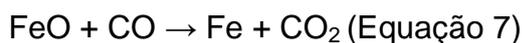
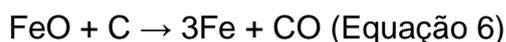
Por volta dos 550° C uma parte da hematita é reduzida a Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Magnetita):



A cerca de 620° C, uma fração de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> será reduzida a óxido ferroso:



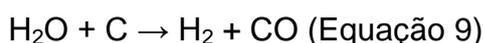
Entre 620° e 800°C ocorrem as seguintes reações:



A mais ou menos 870°C uma considerável parte do CO<sub>2</sub> é reduzida pelo carbono:



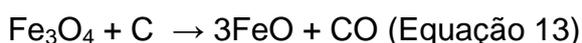
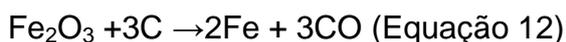
A 900°C ocorre à decomposição da água combinada:



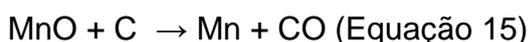
A partir de 970°C ocorre à decomposição de carbonatos:

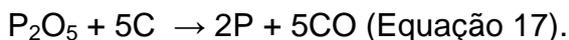


A partir de 1070°C a redução dos óxidos e ferro é concluída pelo carbono:



A partir de 1200°C os óxidos de manganês, de silício e de fósforo, reagem com o carbono iniciando a redução dos mesmos:





Acima de 1260°C os óxidos de cálcio (CaO), de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), de silício (SiO<sub>2</sub>) e de magnésio (MgO) unem-se com a ganga (impurezas) do minério e as cinzas do carvão para formar a escória. A partir de 1350°C inicia-se o processo de fusão dos componentes da carga, com exceção do carvão vegetal. A 1550° C estabelece-se a zona de combustão com a formação do hidrogênio e do óxido de carbono, como resultado da combinação entre o oxigênio, o vapor de água do ar e o carbono do carvão vegetal.



A 2000° C praticamente todo o sulfeto de ferro é transformado em sulfeto de cálcio.



Para que se processem todas essas reações é necessário um tempo que dura em média de 6 a 8 horas, que é o tempo requerido para a matéria-prima alcançar o fundo do forno (cadinho) na forma do produto final de metal fundido (gusa) e escória líquida (mistura de óxidos não reduzidos). Estes produtos líquidos são vazados em intervalos regulares de tempo. Assim, no cadinho (reservatório), a escória e o gusa líquido separam-se por gravidade, formando duas camadas, isto é, a inferior (metálica) e a superior (escória), facilitando o vazamento de ambos os produtos. Essa separação deve-se a diferença de densidade existente entre esses dois líquidos - gusa com cerca de 7 kg/m<sup>3</sup> e escória com aproximadamente 3 kg/m<sup>3</sup> (CHIAVERINI, 1986).

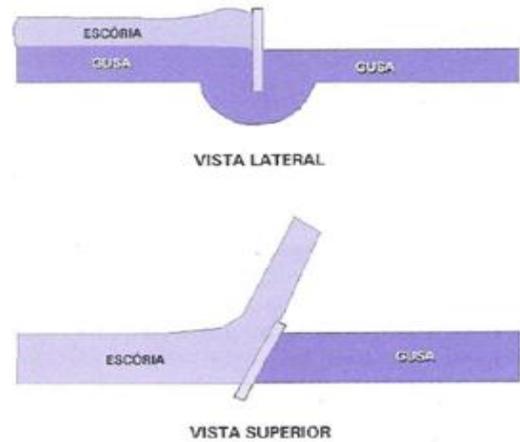
A retirada do ferro-gusa e da escória do alto-forno é uma etapa de extrema importância dentro do processo siderúrgico, existe o cuidado de não reter muito líquido no cadinho para não prejudicar a permeabilidade do forno, para isso o vazamento do gusa pode ser feito de modo intermitente ou contínuo. O vazamento de modo intermitente consiste em abrir o alto-forno através do furo de corrida situado no cadinho (Figura 2.12-a), o qual é feito em intervalos de tempo que varia

de acordo com a prática operacional de cada empresa. Por meio desse, ferro gusa e escória escoam formando um jato direcionado a um canal revestido, sendo separados por gravidade durante o tempo de permanência no canal, a (Figura 2.12-b) mostra esquematicamente como é feita essa separação.

**Figura 2.12 (a) e (b)** – Obtenção do ferro-gusa e escória.



**(a)** Realização do furo de corrida.



**(b)** Esquema de separação gusa/escória.

Fonte: Souza (2007).

O vazamento de modo contínuo utiliza o princípio de vasos comunicantes, no qual o cadinho é ligado por um canal a um poço retangular de acúmulo de gusa e o nível de gusa neste acompanha o nível dentro do alto-forno. Neste caso, o gusa sai continuamente e a escória é retirada de maneira intermitente por meio do furo de escória.

O ferro-gusa sai na forma líquida a uma temperatura em torno de 1380°C, estado no qual é encaminhado se seu destino for às aciarias, aonde irá se transformar em aço, no caso de utilização como matéria-prima principal das fundições de ferro fundido é empregado no estado sólido, sendo vazado em lingoteiras (Figura 2.13).

**Figura 2.13-** Visão parcial da corrida de ferro gusa.



A roda de lingotamento consiste em lingoteiras colocadas lado a lado formando um círculo (Figura 2.14). À medida em que são preenchidas pelo gusa líquido, a roda gira e, no lado oposto do preenchimento o lingote de gusa é retirado manualmente pelo basculamento da lingoteira.

**Figura 2.14 -** Roda de lingotamento na siderúrgica SINOBRAS.



Ao final do processo são formados os lingotes que serão beneficiados e estocados nos pátios das usinas, conforme demonstrado nas Figuras 2.15a e 2.15b, respectivamente. O lingote não possui dimensões e pesos padronizados,

variando de acordo com a empresa. As dimensões e pesos mais encontrados são: comprimento: 12 cm, largura: 12 cm, altura: 6 cm e peso: 4 kg.

**Figura 2.15 (a) e (b)- Ferro-gusa.**



(a) Lingote.

(b) Pilha de estocagem.

Mello et al., (2010), definiu o ferro-gusa como uma liga de ferro-carbono com alto teor de carbono e teores variáveis de silício, manganês, fósforo e enxofre, cuja a variação desses elementos está ligada as matérias-primas utilizadas e ao processo de produção empregado, caracterizando assim vários tipos de ferro-gusa. No entanto, o autor demonstra que a maioria dos ferros-gusas encontram-se na faixa de composições apresentada na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2-** Teores químicos médios do ferro gusa.

Carbono	3 a 4,5%
Silício	0,5 a 4,0%
Manganês	0,5 a 2,5%
Fósforo	0,05 a 2,0%
Enxofre	0,20% max

Fonte: Mello et.al. (2010).

## 2.5 OS CO-PRODUTOS GERADOS NAS INDÚSTRIAS DE FERRO-GUSA A CARVÃO VEGETAL

Durante o processo de produção de ferro-gusa são geradas grandes quantidades de resíduos. Dentre eles: a escória de alto-forno, pó de balão, gás e lama de alto-forno.

A geração de pó de alto-forno (pó de balão) ocorre pelo arraste de material particulado que sai do interior do reator juntamente com o gás do alto-forno, para tubulações que os levam para o sistema de limpeza de gás. Este sistema recolhe a maior fração de particulados a seco e a úmido gerando estes dois resíduos siderúrgicos (pó e lama de alto-forno), as frações químicas de cada um são apresentadas na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3-** Teor dos elementos constituintes do pó e da lama do AF.

Mn	P	C	Fe	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO
0,45	0,05	27,5	59,84	2,15	8,01	2,00

Fonte: Sousa (2010).

O gás de alto-forno tem em sua composição química características importantes na avaliação de aspectos operacionais no interior de aproveitamento dos gases redutores durante o processo de produção do ferro-gusa. Seus componentes e quantidades são descritos na Tabela 2.4.

**Tabela 2.4-** Composição do gás de AF.

CO	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
22,15	5,46	9,88	1,02	46,73	14,76

Fonte: Sousa (2010).

Dentre os co-produtos apresentados serão abordadas no capítulo a seguir as escórias, tendo em vista o foco deste trabalho, será dada ênfase nas de alto-forno, destacando aspectos como: tipos, características, geração, vantagens e aplicações na construção civil.

### **3 AS ESCÓRIAS SIDERÚRGICAS**

#### **3.1 ESCÓRIA DE ALTO-FORNO**

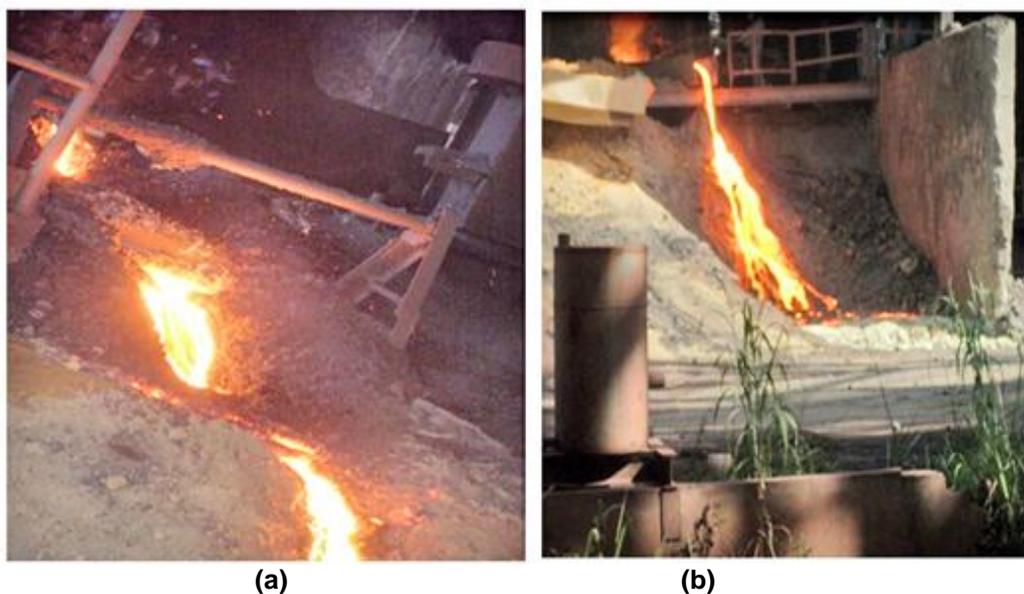
A escória é um subproduto da indústria siderúrgica e é obtida em estado líquido nos altos-fornos durante a fabricação de ferro-gusa. A denominação de “Resíduo” que se dá à escória e a outras adições deve ser considerada circunstancial, pois este termo refere-se a um material sem destino, sendo que a partir do momento em que esse apresente uma aplicação deve ser qualificado como um “subproduto”. (BARBOSA, 2004).

##### **3.1.1 A formação da escória de alto-forno a carvão vegetal**

É gerada quando da eliminação de impurezas, ou “gangas”, inerentes aos metais em seu estado natural, provenientes da adição de coque ou carvão vegetal, como combustível, e um fundente que, em geral, é o calcário, originando um material constituído fundamentalmente por sílico-aluminatos de cálcio e, secundariamente, por sulfetos de cálcio e manganês, além de óxidos de ferro e manganês (BATTAGIN et.al, 2002).

Com o uso de fundentes ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaF}_2$  e em alguns casos, um fundente ácido  $\text{SiO}_2$ ) é possível reduzir o ponto de fusão da ganga e, assim, obter, por meio de reações químicas, a uma temperatura entre  $1350^\circ\text{C}$  e  $1500^\circ\text{C}$ , a escória líquida, facilmente separada do metal em função da sua fusibilidade, atividade química, poder de dissolução e baixa densidade (DAL MOLIN et.al.,apud. SILVA, 2005). Assim, em cada corrida, a escória e gusa líquidos são vazados, conforme as imagens a seguir.

**Figuras 3.1 (a) e (b) - Ferro-gusa e escória líquidos.**



**(a)** Saída dos materiais após vazamento do alto-forno. **(b)** Escória sendo armazenada no fosso após dissociação (2010).

Os principais constituintes da escória provenientes do minério de ferro são: Sílica ( $\text{SiO}_2$ ), Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Titânio ( $\text{TiO}_2$ ), Óxido de Manganês ( $\text{MnO}_2$ ), Dissulfeto de Cálcio ( $\text{CaS}$ ), Óxido de ferro ( $\text{FeO}$ ), Óxido de zinco ( $\text{ZnO}$ ), Óxido de Chumbo ( $\text{PbO}_2$ ). Os provenientes do carvão: Sílica ( $\text{SiO}_2$ ), Cal ( $\text{CaO}$ ), Magnésia ou óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), Pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), Óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), Óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) e os provenientes dos fundentes: Cal ( $\text{CaO}$ ), Magnésia ( $\text{MgO}$ ), Sulfeto de Cálcio ( $\text{CaS}$ ).

A escória de alto-forno a carvão vegetal é resultado da fusão do material inerte do minério de ferro conhecido como ganga, dos fundentes e das cinzas presentes no carvão vegetal que, chegando às zonas mais quentes do alto-forno, região das ventaneiras, sem serem reduzidas, reagem entre si e formam a escória. A faixa de temperatura dependerá da composição da escória usada. Assim uma mistura com 60% de sílica, 15% de Alumina e 23% de Cal começa a fundir a  $1160^\circ\text{C}$ , porém, mesmo com um super aquecimento de  $400^\circ\text{C}$  ou  $500^\circ\text{C}$ , ainda permanece viscosa. Por outro lado, uma mistura com 47% de Sílica, 18% de Alumina e 35% de Cal inicia a sua fusão a  $1295^\circ\text{C}$  e está inteiramente líquida a  $1400^\circ\text{C}$  (SOUZA, 2007).

No processo de formação da escória uma das propriedades mais importantes é a fluidez (para que seja retirada facilmente do forno), e está diretamente

relacionada à sua composição química e temperatura. Com o desenvolvimento de muitos anos de operação, conseguiu-se verificar que esta propriedade depende da seguinte relação:

$$(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3) \quad (\text{Equação 22}).$$

SOUZA (2007) explica que está relação ao aproxima-se da unidade indica uma escória fluida no estado de fusão, e que ao se solidificar transforma-se rapidamente numa massa petrificada com fratura opaca. No entanto, se aumentado o teor de cal, a escória perde a sua fluidez, torna-se espessa, não forma mais fios e ao se resfriar se desfaz em pó. Este aumento da basicidade a torna mais dessulfurante (deter o máximo de enxofre), porém mais viscosa. Uma escória espessa, muito viscosa, dificulta a operação do alto-forno, agarra-se ao revestimento, escorre lentamente e pode, eventualmente, colar-se ao carvão vegetal na rampa, dificultando a normal distribuição da corrente gasosa. Nos altos fornos a carvão de madeira, a maior viscosidade permissível é de 25. Pois, é a 1500°C e, com escórias ácidas contendo 60 a 70% de  $SiO_2 + Al_2O_3$ .

### **3.1.2 Técnicas de resfriamento das escórias**

Mediante o processo de resfriamento utilizado, tem-se a geração de escórias com características diferentes: densidades, granulometrias e propriedades distintas, com implicações sob as possibilidades de aplicação.

#### **3.1.2.1 Resfriamento brusco com água**

A escória líquida é resfriada bruscamente por meio de jatos de água com potencial elevado (Figura 3.2). Nesse processo a escória se solidifica tão rapidamente que o tempo de solidificação é insuficiente para permitir a formação de núcleos cristalinos, mantendo, deste modo, sua característica de hidraulicidade.

**Figura 3.2-** Resfriamento brusco da escória de alto-forno, por jatos d'água, na Companhia Siderúrgica de Tubarão.



Fonte: Coelho (2002).

Como resultado, tem-se uma escória como material granular, apresentando formato anguloso, textura superficial áspera e coloração esbranquiçada, amarelada, acinzentada ou acastanhada. A distribuição granulométrica desse material é similar à da areia natural, aproximadamente 0,2 mm de diâmetro, e densidade aparente próxima a  $1,0 \text{ g/cm}^3$ . Quanto maior a rapidez que se processa o resfriamento, maior será o grau de vitrificação e maiores as potencialidades hidráulicas das escórias, inviabilizando a formação de núcleos cristalinos, mantendo, deste modo, 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 ampla 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). No Brasil quase a totalidade das usinas com altos-fornos tem sua produção de escória obtida por esse processo.

### 3.1.2.2 Resfriamento ao ar

A escória resfriada ao ar é formada através da perda lenta de calor em um poço ao ar livre (Figura 3.3), originando um produto maciço e cristalizado, que, depois de devidamente britado, possui composição granulométrica variando de 12,5 mm a 150 mm, massa específica entre 2,0 e  $2,8 \text{ kg/dm}^3$  e massa unitária entre

1,12 e 1,36 kg/dm<sup>3</sup>, situando-se, portanto, na faixa entre o agregado normal e o leve estrutural (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

**Figura 3.3-** Resfriamento da escória de alto-forno ao ar livre-Siderúrgica SINOBRAS.



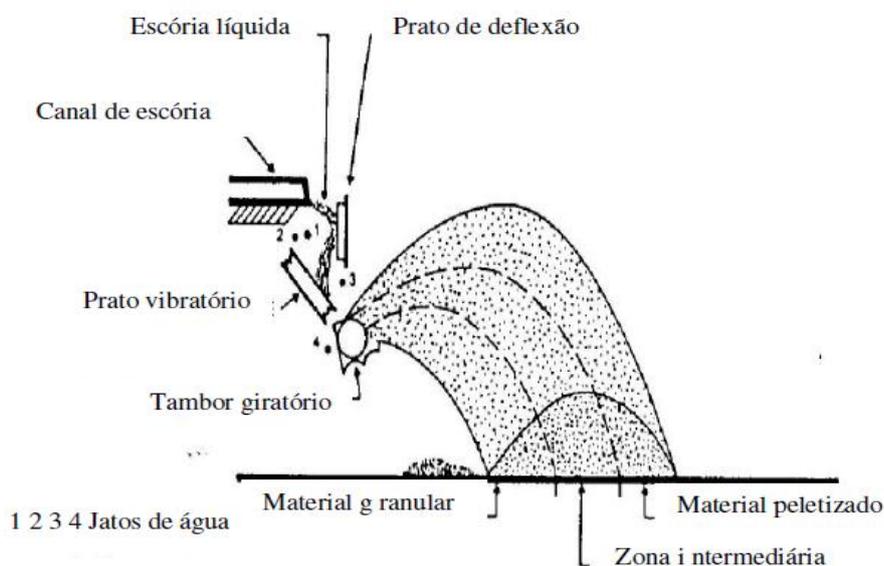
Com relação a suas características físicas, a escória graúda comercial resfriada ao ar é reconhecida, especialmente, pela presença de cavidades internas em sua superfície. Apresenta formato anguloso, com um mínimo de partículas lamelares ou alongadas, possui natureza vesicular e áspera, o que lhe dá uma maior superfície específica em relação aos outros agregados mais lisos. Outras propriedades de interesse da escória graúda são: sua boa resistência à desintegração frente às condições climáticas, a líquidos corrosivos e a mudanças bruscas de temperatura.

Este tipo de escória é considerada como material inerte, pois ao produzir a sua própria cristalização os óxidos perdem energia interna ou calor latente, comprometendo as propriedades aglomerantes. Sua dureza e resistência à abrasão lhe permite competir, com outros agregados, em múltiplos usos; como agregado graúdo para o concreto, pavimentações asfálticas, composição de lastros de vias férreas e bases de estradas.

### 3.1.2.3 Resfriamento pelo processo GALEX

Este método foi desenvolvido no Canadá, e permite obter a escória de alto-forno peletizada, com propriedades físico-químicas particulares. Caracteriza-se por um processo extremamente físico e combina expansão e formação de poros na escória de alto-forno, quando a escória, ainda líquida, cai sobre um cilindro dentado giratório (300 rpm), refrigerado por jatos de água fria (1 ton. água/1 ton. Escória) (JOHN; AGOPYAN, 2000). Este processo é mostrado esquematicamente na Figura 3.4.

**Figura 3.4-** Esquema de resfriamento da escória de alto-forno pelo processo GALEX.



Fonte: Hooton, apud.Coelho (2002).

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

Como conseqüência, 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 sua granulometria é de agregado graúdo, com dimensão máxima característica entre 9,5 e 32,0 mm e massa específica variando de 0,6 g/cm<sup>3</sup> a 0,9 g/cm<sup>3</sup>, particularidades que justificam

a sua aplicabilidade em concretos leves, concretos estruturais, enchimento de pavimentação e blocos de concreto para fins estruturais ou não, enquanto que os grãos menores, similares às areias, são predominantemente vítreos, com possibilidade de aplicação na produção de aglomerantes (MAYFIELD; LOUATI, 1990; GEYER; DAL MOLIN; VILELA, 1995; LITTLE; SETEPLA, 1999; SBRIGHI; BATTAGIN, 2002).

### 3.1.3 Características químicas da escória de alto-forno

A composição química das escórias está relacionada à homogeneidade da escória líquida, a sua elevada capacidade de dessulfuração (retirada do enxofre) 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 fabricado, eficiência de operação do forno, métodos de resfriamento e das diferenças nos processos de fabricação. Desta forma, do ponto de vista químico, a escória tem uma composição que deve ser observada pelos metalurgistas, pois desvios no processo causam demandas significativas de energia e custos adicionais.

Do ponto de vista químico as normas brasileiras definem as escórias de alto-forno como básicas ou ácidas. De acordo com a NBR 5735 (1991) – se a relação  $(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2 > 1$  é atendida, a escória é classificada como básica, caso contrário é classificada como ácida. Para utilização como adição mineral só podem ser utilizadas escórias básicas. As escórias que não atendem os requisitos normativos são classificadas como escórias ácidas e são tratadas como pozolanas, devendo atender a outras especificações.

Soares apud. Massucato (2005) apresentou ainda uma interpretação para esta análise pelo índice de basicidade, no qual uma escória é considerada básica quando a relação  $\text{CaO} / \text{SiO}_2 > 1$ , e ácida quando a relação  $\text{CaO} / \text{SiO}_2 < 1$ . Considera-se que um teor elevado de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) pode neutralizar a acidez, deixando a escória com características básicas. A relação  $\text{CaO} / \text{SiO}_2$  é denominada índice de basicidade. A relação  $(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2 > 1$  representa o índice de

hidraulicidade. Se este índice for igual ou maior que um ( $\geq 1$ ), a escória possui atividade hidráulica suficiente para ser usada na produção de cimento Portland de alto-forno e como adição no concreto. E se for menor que um ( $< 1$ ), pode-se verificar se a escória apresenta características de pozolanicidade que permitam a sua utilização na fabricação de cimento Portland pozolânico.

A Tabela 3.1 apresenta a composição química média das escórias de alto-forno básicas e ácidas produzidas no Brasil.

**Tabela 3.1-** Composição química típica das escórias de alto-forno.

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

Fonte: Jonh, apud.Coelho (2002).

Os óxidos mais importantes presentes na composição química da escória de alto-forno são CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub>, os quais representam 95% a 96% do total de óxidos.

### 3.1.4 Organização atômica da escória de alto-forno

A organização atômica é determinante nas propriedades aglomerantes da escória, porque se cristalizada ela não dispõe da mesma, enquanto que no estado vítreo (não cristalino) possui capacidade aglomerante.

Se ao sair do alto-forno a escória for resfriada lentamente até atingir temperaturas inferiores a 800°C ou 900°C ela começa a cristaliza-se, formando uma solução sólida de wollastonita, anortita entre outros (SMOLCZIK, 1980; REGOURD, 1986) apud. SOUZA (2007).

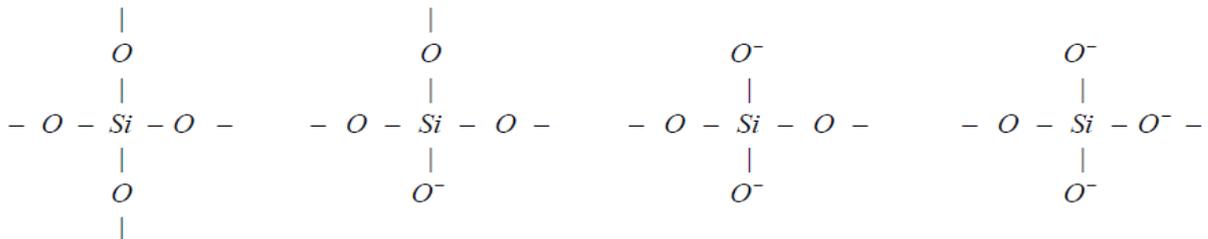
Na forma cristalina a escória não possui capacidade aglomerante. Porém, se a temperatura da escória for diminuída em velocidade suficientemente elevada, não

havendo tempo hábil para que os íons se organizem em forma cristalina, é formada uma estrutura vítrea, sem a periodicidade e a simetria que caracterizam os sólidos cristalinos. Este fato ocorre porque a redução da temperatura de um líquido provoca uma diminuição da mobilidade dos seus íons, impedindo desta forma que eles atinjam uma organização cristalina.

No caso do arranjo atômico nos vidros, a teoria mais aceita estabelece que estes são constituídos por uma rede tridimensional randômica de óxidos, caracterizados por baixo raio iônico e por valências normalmente superiores a quatro. A estrutura fundamental é alterada pela presença de cátions, sendo por isso denominados modificadores de cadeia.

No caso das escórias, a cadeia é formada por átomos de silício conectados através de ligações covalentes a quatro átomos de oxigênio ( $\text{SiO}_4$ ), formando um tetraedro. Nesta estrutura, cada oxigênio está ligado a no máximo dois átomos de silício. Assim, as possíveis configurações são apresentadas na Figura 3.5.

**Figura 3.5-** Possíveis ligações moleculares nas escórias.



Fonte: Souza (2007).

### 3.1.5 Componentes mineralógicos da escória de alto-forno

Os componentes mineralógicos das escórias denominados melilitas (akermanita e gehlenita) e a merwinita são características de escórias básicas assim como a wollastonita e a anortita são características das escórias ácidas (BATAGIN; ESPER, apud. MASSUCATO, 2005). A Tabela 3.2 apresenta uma série de minerais possíveis de serem encontrados nas escórias resfriadas ao ar, as quais são objeto deste estudo.

**Tabela 3.2-** Componentes mineralógicos das escórias.

Denominação	Fórmula química simplificada	Atividade hidráulica	Observações
Akermanita	$C_2MS_2$	ausente	Componente principal de escórias básicas
Gehlenita	$C_2AS$	ausente	Componente principal de escórias básicas
Merwinita	$C_3MS_2$	ausente	Componente secundário ou principal de escórias básicas
Monticelita	CMS	ausente	Componente secundário de escórias básicas
Wollastonita	CS	ausente	Componente principal de escórias ácidas
Forsterita	$M_2S$	ausente	Componente secundário de escórias básicas
Enstatita	MS	ausente	Componente secundário de escórias ácidas
Espinélio	MA	ausente	Componente secundário de escórias ácidas
Anortita	$CAS_2$	ausente	Componente principal de escórias ácidas
Rankinita	$C_3S_2$	ausente	Componente secundário de escórias básicas
Alita	$C_3S$	presente	Ausente nas escórias granuladas de AF, presentes nas escórias de aciaria e clínquer
Belita	$C_2S$	presente	Ausente nas escórias granuladas de AF, presentes nas escórias de aciaria e clínquer

Fonte: Batagin; Esper, apud. Massucato (2005).

### 3.1.6 Utilização de escória de alto-forno na produção de cimento portland

A principal forma de reciclagem da escória de alto-forno ainda é a sua adição ao cimento Portland. As primeiras referências que se encontram na literatura sobre o emprego datam de 1774, quando Lorient comenta o descobrimento das propriedades cimentícias das escórias em mistura de escória e cal. No Brasil a fabricação do cimento com escória foi iniciada em 1952, com 72 mil toneladas pela Cimento Tupi S.A, no Rio de Janeiro e sua normalização data de 1964.

O cimento Portland de alto-forno consiste em uma mistura íntima de clínquer Portland com escória de alto-forno. Este cimento pode ser produzido moendo conjuntamente o clínquer Portland com a escória granulada de alto-forno seca (juntamente com gipsita) ou misturando-se a seco o clínquer Portland já moído com a escória granulada, também moída. A quantidade de escória adicionada na moagem do clínquer é muito variável e depende do tipo de cimento a ser produzido. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece dois tipos de cimentos que utilizam a escória como adição mineral:

a) Cimento Portland Composto (CP II E) – a quantidade de escória varia de 6% a 34% - NBR 11578 (1997).

b) Cimento Portland de Alto-Forno (CP III) – a quantidade de escória varia de 35% a 70% - NBR 5735 (1991).

A produção de cimentos Portland com adição de escória de alto-forno apresenta vantagens em relação ao cimento Portland comum, como diferenças quanto aos aspectos da durabilidade, minimização da reação expansiva álcali-agregado, diminuição da permeabilidade, diminuição do calor de hidratação, diminuição da retração, aumento da resistência ao ataque por sulfatos e aumento da resistência mecânica à compressão em idades mais avançadas. Por outro lado, a reação de hidratação dos cimentos com escória é inicialmente mais lenta do que a do cimento Portland comum. Devido a esse fato, o cimento Portland contendo escória granulada de alto-forno apresenta resultados mais baixos de resistências nas idades iniciais (MENÉNDEZ; BONAVETTI; IRASSAR, 2003).

Sob o aspecto ecológico a substituição parcial do calcário pela escória apresenta como vantagem uma economia de energia devido à redução do calor de formação do clínquer e a diminuição da formação de gases, especialmente o CO<sub>2</sub>, nocivos à atmosfera.

### **3.1.7 Utilização de escória de alto-forno na produção de cimentos de escória**

A produção desse tipo de cimento, sem clínquer, apresenta-se como uma alternativa para o mercado da construção civil. Nesse processo, a escória granulada é moída e misturada a produtos químicos, conhecidos como ativadores. Inúmeros produtos podem ser utilizados para ativar a escória, gerando cimentos com distintas características e aplicações (JOHN, 1995).

A ativação das escórias de alto-forno está relacionada ao fato das reações de hidratação serem muito lentas, levando até 57 horas para iniciar a pega, com isso, torna-se necessária a ativação, que pode se dar por processos físicos ou mecânicos, químicos e térmicos (JOHN, 1995; SILVA 1998).

Na prática, a ativação química é a que apresenta melhores resultados. Entre os principais ativadores químicos estão o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>); os hidróxidos de metais alcalinos, como o de sódio (NaOH) e o de potássio (KOH); os silicatos alcalinos de sódio ou potássio (R<sub>2</sub>OnSiO<sub>2</sub>); o cimento Portland ou uma mistura destes compostos. Os sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) não são considerados ativadores propriamente ditos (JOHN, 1995).

Em países como Alemanha, França, Reino Unido, Japão, Rússia, Ucrânia, Polônia, Canadá e Argentina, a fabricação e utilização de cimentos de escória de

alto-forno já vêm sendo incentivadas para um número cada vez maior de aplicações, tais como: pavimentação, cimentação de poços de petróleo, encapsulamento de resíduos radioativos, obras de portos e aeroportos, etc.

No Brasil, apesar deste cimento não ser produzido em escala comercial, várias pesquisas foram desenvolvidas com escórias ativadas com diferentes compostos químicos, cabendo destacar as pesquisas conduzidas por Cincotto; John (1990), Cincotto; Agopyan (1991) e Cincotto; Battagin; Agopyan (1992); Jonh (1995).

### **3.1.8 Utilização de escória de alto-forno na produção de concretos como adição mineral**

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

A Figura 3.6 mostra o projeto *Air Train JFK* em Nova York, que é um exemplo da utilização das escórias de alto-forno como adição no concreto, com substituições de 25% a 40% foram aplicados 182 mil metros cúbicos de concreto com adição de escória de alto-forno moída.

**Figura 3.6-** Construção e obra finalizada com escória de alto-forno em substituição ao cimento.



Fonte: SCA (2005).

De acordo com (NEVILLE, apud. MOURA, 2000) a adição de escória de alto-forno pode provocar muitas melhorias nas características do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A mistura é mais coesiva e a fluidez é aumentada, devido a melhor distribuição das partículas de escória e à superfície lisa dessas partículas, que absorvem pouca água; proporciona um desprendimento de calor mais lento, devido à velocidade das reações de hidratação; a microestrutura da pasta de cimento hidratada é mais densa, devido a maior formação de C-S-H, melhorando a resistência mecânica e a durabilidade a longo prazo. No entanto, (CANESSO et al., 2005) diz que para usufruir das vantagens proporcionadas pela adição de escória de alto-forno é necessário um controle de sua dosagem para fabricação do concreto, bem como do concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), no estado fresco do concreto, a adição de escória de alto-forno melhora a coesão e a trabalhabilidade, podendo também melhorar a resistência do concreto à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado, e ao ataque por sulfatos. Já no estado endurecido, reduz o calor de hidratação, provocando uma fissuração térmica menor, isto é, uma menor permeabilidade, ocasionando uma maior resistência química (CALIXTO, 2005). Esse aumento da resistência à penetração de cloretos e ao ataque por sulfatos é explicado por (NEVILLE, apud. BARIN, 2008) no processo de hidratação da escória, neste ela reage primeiramente com os hidróxidos alcalinos e posteriormente com o hidróxido de cálcio liberado pelo cimento Portland, formando o C-S-H. A formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) contribui para o refinamento dos poros, transformando vazios capilares grandes em muitos vazios de tamanho pequeno. A reação pozolânica também é responsável pelo refinamento do tamanho dos grãos, transformando os maiores em menores e aumentando a resistência da pasta de cimento. Devido a este efeito, ocorre um aumento da resistência, na zona de transição, principal fonte de microfissuras no concreto e, conseqüentemente, uma sensível diminuição na permeabilidade do sistema, impedindo a penetração de agentes agressivos e aumentando a durabilidade do concreto.

O tempo de pega é uma característica do concreto com escória a ser considerada. Nas misturas com escória granulada, em temperaturas normais, o tempo de pega é maior do que nas misturas sem escória. E quanto maior o teor de escória na mistura, maior é o seu tempo de pega. Entretanto, a maior finura da

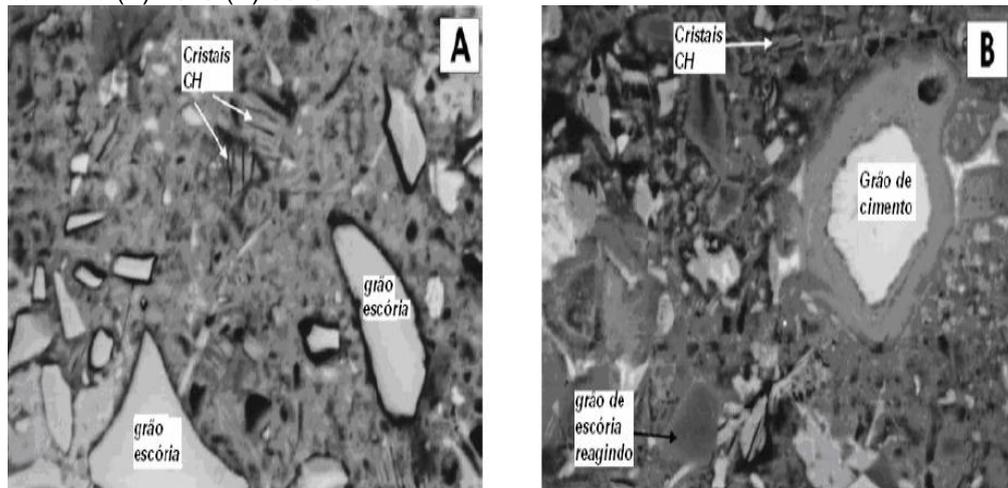
escória de alto-forno não conduz a diferenças significativas (BOURGUIGNON et al., 2005).

Com relação ao calor de hidratação, Schindler (2005) analisou misturas contendo diferentes teores de escória e constatou que todas as misturas apresentaram menor calor de hidratação do que a mistura de referência. O autor verificou que quanto maior o teor adicionado à mistura melhor foi o seu comportamento visando a diminuição do calor de hidratação.

Outra característica relevante é a resistência mecânica, (DAL MOLIN et al., apud. VOGT, 2006), relata que em concretos feitos com a adição de escória seu desenvolvimento é mais lento, quando comparado com concreto de cimento Portland convencional, seu endurecimento se prolonga até idades mais avançadas e por vários anos. Diversas técnicas vêm sendo utilizadas para acelerar as reações iniciais lentas da escória. Entre elas, está o uso de ativador químico que não necessita nem de técnicas e nem de equipamentos especiais.

(GARCIA, apud. ROSA, 2005) observou que a mudança na estrutura interna (poros) de misturas que contém escória depende da temperatura de cura. Ao utilizar escória de alto-forno em teor de 60% em concreto submetendo-o à cura em temperaturas de 10 e 60°C, verificou que a taxa de consumo da escória depende da temperatura de cura. O autor constatou que na cura a uma temperatura de 10°C, a maior parte dos grãos de escória sofreu pouca hidratação; ao passo que em 60°C, alguns grãos de escória foram totalmente hidratados, e mesmo depois de um ano ainda existiam grãos reagindo. A Figura 3.7 ilustra a constatação verificada pelo autor.

**Figura 3.7 (a) e (b)** - Imagem ampliada em microscópio eletrônico da estrutura interna depois de 1 ano (A) 10°C (B) 60°C.



Fonte: Garcia, apud. Rosa (2005).

Canesso et al., (2005), constatou em sua pesquisa que a adição de mais de 50% de escória afetou significativamente a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias. O aumento do teor de escória no concreto, em substituição ao cimento, fez com que houvesse uma redução na resistência à compressão. Aos 90 dias de cura esse valor se manteve constante. A quantidade de escória influencia diretamente na velocidade de crescimento da resistência à compressão.

A resistência à flexão de concretos com escória moída é comparável ou maior do que a do concreto de referência. Segundo (MALHOTRA, apud. COELHO, 2002) este incremento se deve à maior aderência entre a pasta de cimento, a escória de alto-forno e os agregados, por causa da forma e da textura da superfície das partículas de escória. Este fato também pode ser atribuído à melhora da microestrutura na interface pasta-agregado (BIJEN, apud COELHO, 2002).

Características dos concretos produzidos com escória de alto-forno como: durabilidade, melhor desempenho frente à difusão de cloretos, menor expansão devido o ataque de sulfatos, maior resistividade elétrica e menor suscetibilidade a reação álcali-agregado, vêm incentivando pesquisas de novas aplicações para este material.

### 3.1.9 Utilização de escória de alto-forno como agregados para concretos

As escórias de alto-forno podem ser moídas e graduadas para uso como agregado miúdo ou britadas para serem utilizadas como agregado graúdo, uma vez que, dependendo da composição química e da velocidade de resfriamento da escória a ser beneficiada, produz-se um tipo de agregado com característica e aplicabilidade específica.

Mehta e Monteiro (2008), chamam atenção para o fato da escória poder apresentar um teor excessivo de sulfeto de ferro, que poderá ocasionar problemas de manchamento, afetar a durabilidade do concreto, assim como um possível aumento da massa específica do concreto, em função da porcentagem de ferro presente.

A aplicabilidade da escória de alto-forno cristalizada, como agregado graúdo e miúdo para concreto de cimento Portland, está bem estabelecida em muitos países como o Japão, os Estados Unidos (que comercializa como agregado 85% dos 11,8 Mton de escória de alto-forno resfriada lentamente) e países da Europa em geral, obedecendo às mesmas normas dos agregados naturais. Países como a Bélgica, Reino Unido e França estabeleceram limites claros e rigorosos preconizados por Normas Técnicas específicas (BATTAGIN; SBRIGHI, 2002).

Na Inglaterra, esse co-produto apresenta larga aceitação como agregado, com desempenho satisfatório quando utilizado como componente de misturas para revestimentos asfálticos. Na Alemanha, é aplicada, como agregado, na construção de estradas de rodagem, juntamente com escórias brutas, assim como na produção de concretos e blocos para vedação vertical (BLUNK, apud. SILVA, 2005).

Na França são encontradas não só um volume maior de obras, como também vasta uma bibliografia acerca do comportamento dos pavimentos com base, sub-base ou revestimento com agregado de escória de alto-forno. Dessa forma, este material é usualmente empregado, desde 1960, no enrijecimento das camadas de base de pavimentos de estradas de rodagem e auto-estradas; moídas e graduadas para uso como agregado miúdo, ou britadas para serem utilizadas como agregado graúdo (SENÇO, [19--]; DUSSART; apud. SILVA, 2005).

No Brasil, estudos realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) sobre caracterização e emprego de escórias de alto-forno, como aglomerante e agregado, em estado bruto,

para concreto, vêm contribuindo expressivamente para a consagração do aproveitamento deste “resíduo”.

Pesquisas direcionadas à aplicação de escória bruta de alto-forno foram desenvolvidas pela L. A. Falcão Bauer, tendo por resultado, a comprovação de uma maior resistência e durabilidade, melhor resistência ao fogo e menor peso unitário, tornando as estruturas mais leves e seguras (SILVA et al., apud. SILVA, 2005).

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, os resultados mostram uma melhora média de 6,9% na resistência dos concretos produzidos com escória.

Rosário et al. (2010), avaliou as propriedades de concretos produzidos com diversos percentuais de substituição do seixo pelo agregado de escória bruta. Neste trabalho os autores constaram um teor ideal de substituição em torno de 25% com aumento da resistência mecânica, ressaltando a aplicabilidade deste co-produto na produção de concretos.

No Brasil, a utilização de escória de alto-forno como agregado miúdo ainda é pontual, tendo em vista que, a maior parcela das escórias geradas são destinadas prioritariamente à indústria cimenteira, para serem usadas como adição ao cimento. Segundo Scandiuzzi; Battagin (1990) existe um consenso de que os principais fatores que colocam em desvantagem o uso da escória como agregado em relação a areia natural são: o teor insuficiente de finos, as formas angulosas dos grãos, a friabilidade e as densidades variáveis. Tais fatores se constituem em parâmetros desfavoráveis à trabalhabilidade e homogeneidade do concreto.

Sabe-se de experiências da utilização na execução de muros e pavimentos em algumas fábricas de cimento e em siderúrgicas nacionais. O exemplo mais expressivo vem da Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA), com aplicações direcionadas para a confecção de concretos magros, pisos e passeios, incluindo as obras civis de ampliação da Siderúrgica, entre elas o cais do porto e a torre de resfriamento da aciaria LD. Progressivamente, o uso foi estendido a obras de concreto estrutural, com resultados satisfatórios (BATTAGIN; SBRIGHI, 2002).

Outro exemplo foi a Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), em 1999, com a construção de 4 km de muro, em sua divisa norte, em concreto armado confeccionado com escória granulada de alto-forno como agregado miúdo e escória britada como agregado graúdo. Outros 4 km de muro foram construídos, em sua

divisa sul, com blocos de concreto utilizando escória granulada de alto-forno como agregado miúdo e escória britada bem fina, como pedrisco (COELHO, 2002).

Objetivando ampliar o leque de aplicabilidade deste material, foi realizado um estudo técnico pela ABCP, no qual se avaliou o comportamento mecânico, reológico e a durabilidade de argamassas preparadas com escória granulada como agregado miúdo, de acordo com parâmetros estabelecidos pela Normalização Brasileira. Os resultados comprovaram a viabilidade técnica do emprego do material, competindo, em termos gerais, em igualdade de condições com as areias naturais ou provenientes de rochas britadas.

Estudos conduzidos por (SCANDIUZZI; BATTAGIN, 1990) comparou argamassas com areia natural e argamassas com escória de alto-forno como agregado miúdo, os resultados mostraram que as produzidas com escória apresentaram resistência à compressão menor nas primeiras idades, porém ao longo do tempo, esta diferença vai diminuindo. Para resistência à tração, os resultados não apresentaram diferenças para a idade de 28 dias, e para 90 dias foram 15% superiores para argamassas com escória, os autores explicam que o aumento da resistência nas idades mais avançadas estaria ligado à formação de uma película superficial de hidratação, não expansiva, na interface dos grãos de escória, que contribui para uma maior aderência pasta-agregado e, por conseqüência, um aumento da resistência à tração das argamassas e concretos, em relação às argamassas com areia natural, onde tal película não ocorre. Os mesmos relatam ainda que, o consumo de água de concretos produzidos com escória é um pouco superior ao concreto com areia natural, mas que este fato não afeta, consideravelmente, a qualidade do mesmo.

Segundo (NUMATA et al., apud. COELHO, 2002) observaram que misturas contendo escória de alto-forno como agregado apresentaram melhores resultados a ataques de ácidos, em comparação a misturas com areia de rio como agregado miúdo, devido, provavelmente, à melhoria na interface.

Estudos experimentais foram desenvolvidos pelo Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas (NEXES), contemplando o desenvolvimento de bloco de estrutura hidráulica de proteção contra a ação de ondas marinhas, utilizando escória de alto-forno como aglomerante, em substituição ao cimento Portland, escória granulada de alto-forno como agregado miúdo e escória bruta de alto-forno, devidamente britada, como agregado graúdo. Foi constatado que, os blocos

apresentaram significativa resistência à compressão e à tração por compressão diametral; baixa absorção de água devido, provavelmente, às propriedades na interface desta mistura que são excelentes, com baixos níveis de porosidade e muito baixa difusão de íons cloreto, em função da melhoria na estrutura do poro da pasta de cimento com a utilização de escória de alto-forno, diminuindo, assim, a capacidade de penetração desses agentes agressivos Coelho et al. (2004).

Arribavene (2000) utilizou escória nas seguintes formas: Escória de alto-forno bruta britada (EAFBB), Escória de alto-forno granulada (EAFG) e Escória de alto-forno granulada moída (EAFGM), como agregado graúdo, miúdo e como substituto parcial do cimento, respectivamente. A pesquisa constatou o potencial de utilização da escória de alto-forno como agregado para concreto, apesar da heterogeneidade do material.

Vale ressaltar que com relação a trabalhos utilizando a escória britada como agregado graúdo são escassas as referências no Brasil, valendo citar a de Volois & Cassa (1995) e aquela citada por Cincotto; Battagin; Agopyan, (1992) quando relata sobre um estudo com escória resfriada ao ar ou britada. Segundo os autores, o agregado não se mostrou reativo segundo as normas utilizadas, chegando-se a emprega-lo como agregado graúdo em um edifício de estrutura de concreto armado. Segundo os autores “[...] os estudos não avançaram, não se tendo notícias de outros empregados deste tipo [...]”. Cincotto et al. apud. Arribavene (2000).

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi desenvolvido de forma a avaliar a viabilidade técnica do uso da escória de alto-forno em substituição aos agregados naturais (seixo rolado e areia quartzosa), em concretos convencionais, nas proporções de 0%, 50% e 100%.

A viabilidade de utilização da escória de alto-forno nos concretos foi verificada através de ensaios mecânicos (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade). O trabalho experimental foi desenvolvido nas instalações do Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA), na cidade de Belém-Pa.

Todas as características dos materiais utilizados neste trabalho, os traços de concretos, método de dosagem, confecção dos corpos-de-prova, além dos ensaios de laboratório serão abordados no decorrer desta seção.

### 4.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

No estudo do comportamento dos concretos com agregados de escória de alto-forno, foi imprescindível para se alcançar os objetivos, a definição e a quantificação das variáveis que serviram de parâmetro para a obtenção das respostas dos experimentos.

#### 4.1.1 Variáveis de resposta

- a) Resistência à compressão axial simples;
- b) Resistência à tração por compressão diametral;
- c) Módulo de elasticidade.

Definidas as variáveis de respostas, fez-se necessário a definição das variáveis independentes ou de controle, as quais foram fixadas e mantidas durante todo o experimento. Foram adotadas como variáveis de controle:

**a) Teores de substituição:** Os teores variaram de 0%, 50% e 100% de substituição dos agregados graúdos e miúdos naturais pela escória de alto-forno.

**b) Idade do concreto:** Foram adotados 7, 28 e 63 dias, para acompanhamento da evolução no tempo das propriedades mecânicas do concreto.

**c) Relação a/c:** 0,35, 0,50 e 0,65. São valores não-fixos, utilizados inicialmente como referência para a execução dos traços, podendo eventualmente sofrerem alterações em função da obtenção do abatimento fixado.

A avaliação do comportamento dos concretos foi realizada de acordo com um programa experimental exposto na Tabela 4.1, onde adotou-se 2 corpos-de-prova por idade.

**Tabela 4.1-** Resumo do Programa Experimental.

CONCRETOS	A/C	Resistência à Compressão Axial Simples			Resistência à Tração por Compressão Diametral			Módulo de Elasticidade		
		Idade(dias)			Idade(dias)			Idade(dias)		
		7	28	63	7	28	63	7	28	63
REFERÊNCIA	0,35	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	0,50	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	0,65	2	2	2	2	2	2	2	2	2
50% GRAÚDA	0,40	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	0,49	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	0,65	2	2	2	2	2	2	2	2	2
100% GRAÚDA	0,44	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	0,53	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	0,69	2	2	2	2	2	2	2	2	2
50% MIÚDA	0,46	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	0,54	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	0,73	2	2	2	2	2	2	2	2	2
100% MIÚDA	0,61	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	0,70	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	0,90	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Número de corpos-de-prova		90			90			90		
TOTAL: 270										

Para cada betonada foram produzidos 18 corpos-de-prova 10cm x 20cm distribuídos da seguinte forma: seis para o ensaio de resistência a

compressão simples, seis para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral e seis para o ensaio de módulo de elasticidade. Desta forma, para cada propriedade analisada foram confeccionadas 90 amostras, perfazendo um total de 270 para este projeto experimental.

## 4.2 SELEÇÃO E 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 foram determinadas em laboratório e outras fornecidas por fabricantes e fornecedores.

### 4.2.1 Cimento

O cimento utilizado foi o cimento Portland composto CP II F 32 (NBR 11578, 1997) disponível comercialmente em Belém. A opção por este tipo de cimento é justificada pelo mesmo não apresentar propriedades pozolânicas, possibilitando avaliar todas as consequências do emprego do agregado nas propriedades do concreto. As características químicas, físicas e mecânicas desse cimento foram fornecidas pelo fabricante e estão apresentadas na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2-** Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP II F 32.

<b>Características</b>	<b>Determinações</b>	<b>Valores obtidos</b>	<b>Método de ensaio</b>
<b>Químicas</b>	Perda ao fogo	4,52%	NBR NM 18
	Resíduo insolúvel	1,38%	NBR NM 15
	Óxido de Silício (SiO <sub>2</sub> )	19,82%	NBR NM 14
	Óxido de Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,54%	NBR NM 14
	Óxido de Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,64%	NBR NM 14
	Óxido de Cálcio total (CaO)	59,80%	NBR NM 14
	Óxido de Magnésio (MgO)	3,28%	NBR NM 14
	Óxido de Enxofre (SO <sub>3</sub> )	2,42%	NBR NM 16
	Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,33%	NBR NM 17
	Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,66%	NBR NM 17
	Óxido de cálcio livre (CaO)	1,19%	NBR NM 12
	Composição Potencial		ASTM C150
	C <sub>3</sub> S	57,30%	-
	C <sub>2</sub> S	9,64%	-
	C <sub>3</sub> A	7,56%	-
C <sub>4</sub> AF	8,03%	-	
<b>Físicas</b>	Massa específica	3,16 kg/dm <sup>3</sup>	NBR NM 23
	Finura- peneira de nº 200	4,50%	NBR 11579
	Área específica	316 m <sup>2</sup> /kg	NBR NM 76
	Tempo de pega inicial	2h 15min	NBR NM 65
	Tempo de pega final	3h 40min	NBR NM 65
<b>Mecânicas</b>	Resistência à compressão		
	1 dia	9,6 Mpa	NBR 7215
	3 dias	19,9 Mpa	-
	7 dias	25,5 Mpa	-
	28 dias	32,6 Mpa	-

#### 4.2.2 Agregado miúdo

Foi empregada areia fina lavada e de origem quartzosa, proveniente de depósitos naturais do município de Ourém-Pa. Antes de sua utilização foi secada e depositada em ambiente de laboratório. Suas características estão dispostas na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 - Características do agregado miúdo (areia).**

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Abertura da peneira	Porcentagem retida (em massa)	
Composição granulométrica	NBR NM 248 (2003)	ABNT (MM)	Individual	Acumulada
		4,8	0	0
		2,4	0,90	1
		1,2	1,90	3
		0,6	6,80	10
		0,3	57,40	67
		0,15	30,0	97
		< 0,15	3,00	100
DMC (mm)	NBR NM 248 (2003)	1,2		
Módulo de finura	NBR NM 248 (2003)	1,78		
Massa unitária(kg/dm <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (2006)	1,50		
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR NM 52 (2009)	2,63		

#### 4.2.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo empregado foi o seixo rolado, também oriundo do município de Ourém-Pa, com dimensão máxima de 19 mm. O material foi seco e armazenado em ambiente de laboratório. Na Tabela 4.4 são apresentadas a distribuição granulométrica e as características físicas do agregado graúdo empregado.

**Tabela 4.4** - Características do agregado graúdo (seixo).

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Abertura da peneira	Porcentagem retida (em massa)	
Composição granulométrica	NBR NM 248 (2003)	ABNT (MM)	Individual	Acumulada
		25	0	0
		19	1,10	1
		12,5	25,00	26
		9,5	22,40	48
		4,8	29,80	78
		2,4	15,70	94
		1,2	6,00	100
		0,6	-	100
		0,3	-	100
		0,15	-	100
		< 0,15	-	100
DMC (mm)	NBR NM 248 (2003)	19		
Módulo de finura	NBR NM 248 (2003)	6,21		
Massa unitária(kg/dm <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (2006)	1,66		
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR NM 53 (2009)	2,62		

#### 4.2.4 Escória de alto-forno

Para a utilização da escória de alto-forno como agregados para a produção de concretos, foram necessárias várias etapas, as quais serão descritas a seguir:

##### Etapa 1: Obtenção do material para análise

No primeiro momento com o objetivo de ser ter um melhor entendimento a cerca do assunto, foram realizadas visitas nas siderúrgicas produtoras de aço e ferro-gusa, que se encontram em operação, no pólo siderúrgico do Município de Marabá-Pa.

Em três das quatro siderúrgicas visitadas foi possível conhecer o processo produtivo, onde as escórias após retiradas do alto-forno são depositadas em poços ao ar livre permanecendo ali até seu completo resfriamento. Destes foram coletadas amostras de escórias para estudos preliminares, conforme as imagens abaixo.

**Figura 4.1 (a) e (b)** - Amostras de escória de alto-forno.



(a)

Amotras "in natura".

(b)

Amostras pulverizadas para ensaios

## **Etapa 2: Análise das amostras**

Para análise do grau de cristalinidade e composição química das mesmas, utilizou-se das técnicas de difração de raios-x e fluorescência de raios-x, respectivamente. Realizadas no Laboratório de Análises Químicas do Instituto de Geociências da UFPA.

Os resultados da composição química das amostras obtido por fluorescência de raios-x via espectrômetro encontram-se na Tabela 4.5

**Tabela 4.5** - Análise química das amostras de escória de alto-forno.

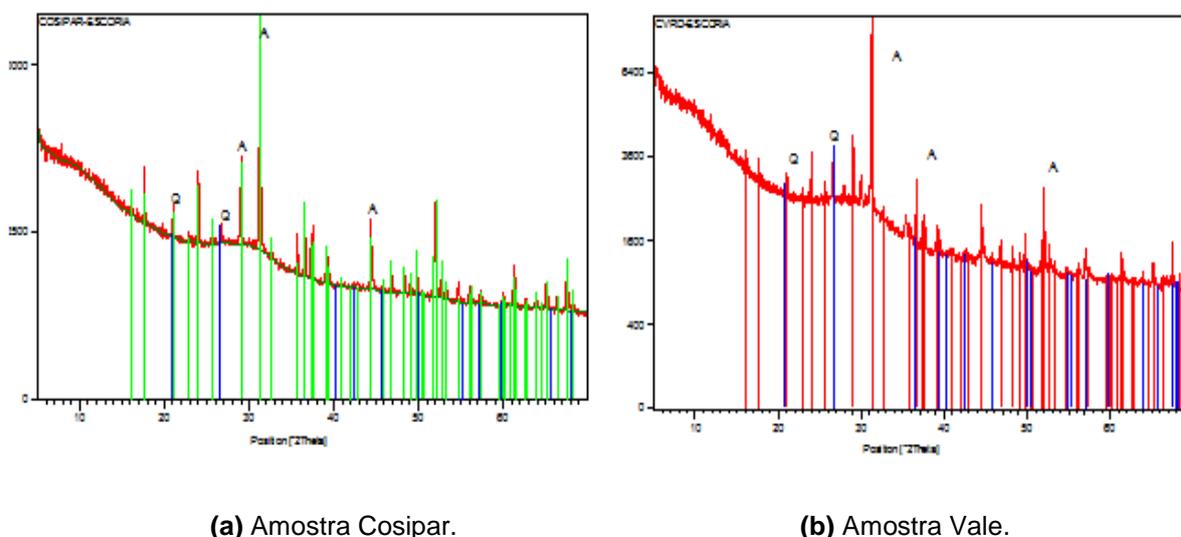
Composto	SINOBRAS	COSIPAR	VALE
Nome	Conc.(%)	Conc.(%)	Conc.(%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,59	14,11	15,79
CaO	33,69	37,15	34,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,89	0,95	1,03
K <sub>2</sub> O	1,09	0,92	1,34
MgO	2,44	2,52	2,07
MnO	5,09	4,48	5,13
Na <sub>2</sub> O	0,33	0,29	0,30
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	0,02	0,04
SO <sub>3</sub>	0,38	0,42	0,34
SiO <sub>2</sub>	39,65	39,45	40,02
TiO <sub>2</sub>	0,81	0,88	0,89

Os teores dos compostos químicos das escórias estão dentro da faixa de variação dos teores indicados na literatura por (JONH apud. COELHO (2002).

Com base nestes resultados, teve-se que em todas as amostras a relação CaO/SiO<sub>2</sub> inferior a 1, sendo classificadas como ácidas, fator que segundo as referências consultadas SOARES apud. MASSUCATO (2005) inviabiliza sua utilização como adição ao concreto, ratificando assim a empregabilidade das amostras estudadas como agregados para concretos.

Os resultados da identificação da estrutura do material por meio da técnica de difratometria de raios-x (DRX) são mostrados nas Figuras 4.2a e 4.2b. Vale ressaltar, que não foi possível identificar a amostra da siderúrgica Sinobras em virtude de problemas técnicos ocorrido no equipamento.

**Figura 4.2 - (a) e (b) - Difratoograma de raios-x das escórias.**



É possível perceber em ambas as imagens a presença de vários picos, indicando que as escórias apresentam um alto grau de cristalinidade, dado ao tipo de resfriamento que é destinado as mesmas (ao ar livre), que possibilita as associações dos átomos segundo as próprias afinidades, em cristais, fato conhecido como cristalização. Tal situação anula a atividade hidráulica da escória, uma vez que o estado não cristalino (amorfo) da escória representa uma condição necessária à atividade hidráulica (produção de cimento Portland de alto-forno e como adição no concreto), devendo para isso ser submetida ao processo de resfriamento brusco. Este tipo de escória foge ao interesse do estudo, uma vez que sua aplicação será como substituição aos agregados convencionais, não devendo para isso apresentar hidráulicidade.

### **Etapa 3: Britagem**

Com base nos dados da etapa anterior é possível observar que os resultados das amostras analisadas não apresentaram diferenças significativas entre si, o que tornou livre a opção de escolha do material empregado. Com isso, optou-se pelo procedente da siderúrgica Cosipar, em virtude desta apresentar uma planta de beneficiamento de escória (Figura 4.3), facilitando assim o processo de britagem para aplicação, além disso, a empresa teve participação significativa no processo de logística para a entrega em Belém.

**Figura 4.3-** Planta de beneficiamento de escória-COSIPAR.



A Figura 4.4 mostra a escória bruta passando pelo processo de beneficiamento para deixá-la com a granulometria próxima a dos agregados naturais (seixo e areia).

**Figura 4.4-** Escória sendo britada no pátio da usina-COSIPAR.



#### **Etapa 4: Coleta**

O material foi coletado no pátio da usina e acondicionado em recipientes metálicos para o transporte até LEC na UFPA, conforme a Figura 4.5.

**Figura 4.5** - Coleta do material.



### **Etapa 5:** Peneiramento

A operação de peneiramento foi realizada no LEC da UFPA, para a obtenção da faixa granulométrica desejada, ou seja, com parâmetros similares aos dos agregados convencionais. Para o agregado graúdo foi separado todo material passante na peneira de 19 mm e retido na malha de 4,8 mm, e para o agregado miúdo foi separado todo material passante na peneira de 4,8 mm.

**Figura 4.6** - Etapas de beneficiamento. **(a)** Escória antes do processo. **(b)** Escória graúda. **(c)** Escória miúda.



### **Etapa 6:** Caracterização da escória

Foi adotada a mesma metodologia empregada para os agregados convencionais. Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados da escória miúda e na Tabela 4.7 os da escória graúda.

**Tabela 4.6 - Características da escória miúda (agregado miúdo).**

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Abertura da peneira	Porcentagem retida (em massa)	
Composição granulométrica	NBR NM 248 (2003)	ABNT (MM)	Individual	Acumulada
		4,8	6,37	6
		2,4	23,25	29
		1,2	19,21	48
		0,6	18,2	66
		0,3	12,13	78
		0,15	12,13	90
		< 0,15	8,7	100
DMC (mm)	NBR NM 248 (2003)	4,8		
Módulo de finura	NBR NM 248 (2003)	3,17		
Massa unitária(kg/dm <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (2006)	1,3		
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR NM 52 (2009)	2,63		

**Tabela 4.7- Características da escória graúda (agregado graúdo).**

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Abertura da peneira	Porcentagem retida (em massa)	
Composição granulométrica	NBR NM 248 (2003)	ABNT (MM)	Individual	Acumulada
		25	0	0
		19	5,76	6
		12,5	23,33	29
		9,5	18,48	47
		6,3	53	100
		< 6,3	0	100
DMC (mm)	NBR NM 248 (2003)	19		
Módulo de finura	NBR NM 248 (2003)	6,53		
Massa unitária(kg/dm <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (2006)	1,4		
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR NM 53 (2009)	2,39		

#### **4.2.5 Água**

Foi utilizada água proveniente da rede pública de abastecimento local.

#### **4.2.6 Aditivo**

Foi empregado o aditivo plastificante SIKAMENT PF 175, à base de sais sulfonados e carboidratos em meio aquoso, densidade  $1,19 \pm 0,02$  Kg/litro, PH  $5,5 \pm 1,0$  e com dosagem recomendada pelo fabricante  $0,5 - 1,0\%$  sobre o peso de cimento (de 500 a 1.000g para cada 100 Kg de cimento Portland).

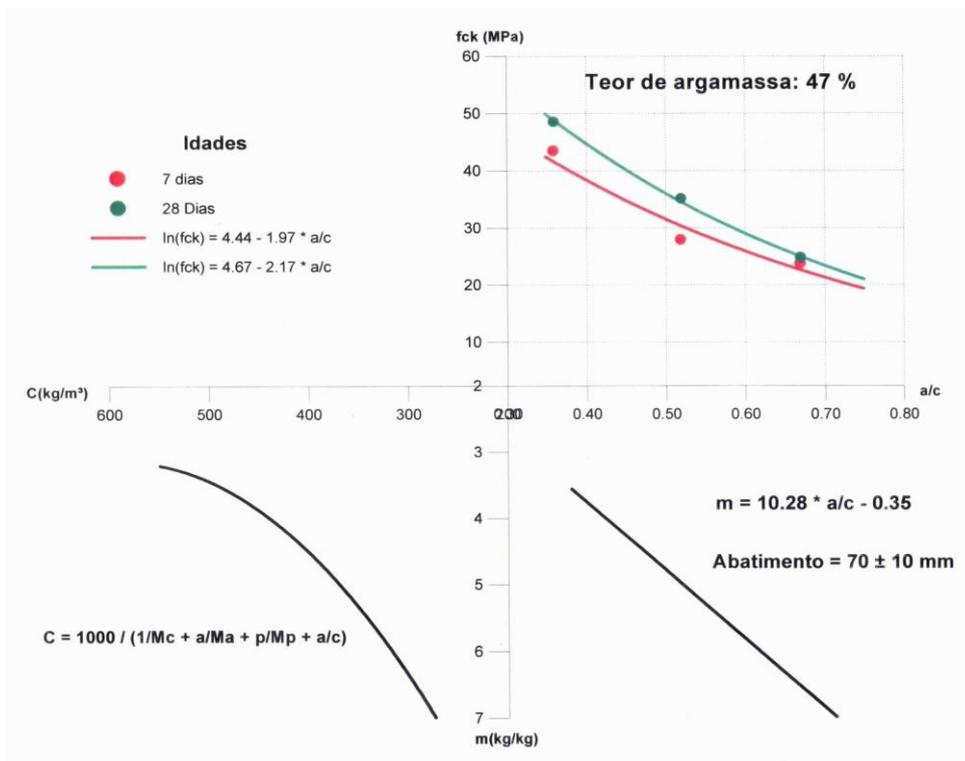
### 4.3 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO USO DA ESCÓRIA COMO AGREGADOS EM CONCRETOS

Neste trabalho, para a verificação da influência da escória nos concretos foram determinados parâmetros relacionados ao desempenho do concreto no estado fresco: abatimento de tronco de cone (NBR NM 76,1998) e no estado endurecido: resistência à compressão axial (NBR 5739, 2007), resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222, 2010) e módulo de elasticidade (NBR 8522, 2008).

### 4.4 DOSAGEM DOS CONCRETOS

O método de dosagem adotado na confecção das misturas experimentais foi o desenvolvido pelo IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1995). Neste método, fixa-se num primeiro momento o valor do abatimento para o desenvolvimento das misturas, que neste trabalho foi fixado em  $80 \pm 20$  mm. Com isso, parte-se para a obtenção do teor ideal de argamassa para os materiais empregados, adotando um traço de 1:5, definido como traço principal, nesta pesquisa o teor ideal de argamassa foi de 47% e uma relação a/c de 0,52. Após a execução do traço principal partiu-se para a execução das misturas 1:3,5 e 1:6,5, definidos como traços auxiliares. A execução das misturas possibilitou a montagem do gráfico de dosagem (Figura 4.7) que forneceu os traços da pesquisa, tendo como base as variáveis no item 4.1.1 do presente trabalho.

Figura 4.7- Diagrama de dosagem.



#### 4.4.1 Definição dos traços

Na Tabela 4.8 encontram-se os traços unitários para as três relações água/cimento definidas nesta pesquisa, bem como seus respectivos consumos de cimento.

**Tabela 4.8** - Traços unitários em massa e o consumo de cimento por metro cúbico de concreto para o concreto de referência.

Teor de argamassa	a/c	M	Traço			Consumo de cimento (Kg/m³)
			C	A	B	
47	0,65	6,3	1	2,45	3,89	295,87
	0,50	4,8	1	1,72	3,07	378,11
	0,35	3,2	1	0,99	2,25	525,57

Para os concretos com escória foi utilizado o mesmo traço, os percentuais de substituições (0%, 50% e 100%) dos agregados naturais (seixo e areia) pela escória

foram feitas em relação à massa total do agregado graúdo e miúdo. Dessa forma, totalizou-se 15 misturas para a realização do presente trabalho.

#### 4.5 PRODUÇÃO, MOLDAGEM E ARMAZENAMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA

Para a produção dos traços de concreto foi empregada uma betoneira de eixo inclinado. A colocação dos materiais transcorreu com a mesma e movimento, obedecendo aos seguintes procedimentos:

- a) 100% de agregado graúdo (convencional e/ou escória) mais 20% da água para o pré-umedecimento durante 10 min;
- b) 100% do cimento mais 30% da água;
- c) 100% de agregado miúdo (convencional e/ou escória);
- d) Restante da água.

Com a colocação de todos os materiais, foi realizada a mistura por aproximadamente 5 minutos. Após este período, foi feita a medição do abatimento do tronco de cone, com o objetivo de verificar a obtenção do valor pré-definido.

**Figura 4.8-** Medida do abatimento em concretos com agregados naturais e com escória. **(a)** concreto com agregados naturais. **(b)** concreto com escória.



Na moldagem dos corpos-de-prova foi utilizado o adensamento mecânico, com o uso do vibrador de imersão. Todo o procedimento de moldagem e cura seguiram a NBR 5738 (2003).

Após a moldagem os mesmos foram mantidos em ambiente de laboratório por aproximadamente 24 horas, conforme mostrado a seguir.

**Figura 4.9 –** Corpos-de-prova após moldagem.



Transcorrido este período, os corpos-de-prova foram retirados das formas e colocados na câmara úmida (Figuras 4.10a e 4.10b), com umidade relativa superior a 95% e temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , permanecendo até atingirem o tempo necessário à realização dos ensaios, conforme fixado no item 4.1.1.

**Figura 4.10 (a) e (b)** – Corpos-de-prova cilíndricos 10cm x 20cm. **(a)** Após desmoldagem. **(b)** Armazenados.



**(a)**

**(b)**

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido dos traços de concreto estudados, a análise foi feita junto à sua apresentação.

Os resultados encontrados referentes às propriedades do concreto no estado endurecido foram analisados com base na análise estatística, para respaldar as conclusões obtidas. A análise foi feita para cada tipo de ensaio, com o objetivo de comprovar estatisticamente a influência das variáveis investigadas, bem como a existência de possíveis interações entre estas variáveis. Foi verificada a significância estatística do efeito de cada uma das variáveis, através da análise de variância (ANOVA). Segundo Ribeiro apud. Gonçalves (2000), essa técnica permite verificar a influência das variáveis dentro de seu grupo e entre os grupos, através da média geral e os erros envolvidos. O efeito de um determinado fator sobre uma variável de resposta analisada é determinado através de um teste de comparação entre valores calculados ( $F_{\text{calculado}}$ ) e os tabelados ( $F_{\text{tabelado}}$ ) de uma função de distribuição de probabilidade Fischer. Os valores de ( $F_{\text{tabelado}}$ ) são estabelecidos para um determinado nível de significância. A hipótese que um determinado fator influencia significativamente nos resultados é confirmada se ( $F_{\text{calculado}}$ ) for maior do que ( $F_{\text{tabelado}}$ ). Para estas análises, o nível de significância adotado foi de 5%, que é comumente utilizado na área de engenharia civil. A ANOVA foi realizada através do software SPSS 17.0 (Statistical Package for the Sciences).

### 5.1 CONCRETO NO ESTADO FRESCO

A trabalhabilidade foi controlada através do ensaio de abatimento NBR NM 67 (1998), sendo este considerado um fator de controle nos concretos. Os resultados do ensaio e as relações água/cimento finais estão demonstrados na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1** – Abatimentos obtidos nos traços de concretos.

<b>CONCRETOS</b>	<b>A/C</b>	<b>ABATIMENTO (mm)</b>
<b>REFERÊNCIA</b>	0,35	60
	0,50	60
	0,65	65
<b>50% GRAÚDA</b>	0,40	70
	0,49	60
	0,65	65
<b>100% GRAÚDA</b>	0,44	70
	0,53	75
	0,69	83
<b>50% MIÚDA</b>	0,46	80
	0,54	85
	0,73	80
<b>100% MIÚDA</b>	0,61	70
	0,70	70
	0,90	70

Nesta propriedade observou-se uma grande diferença entre o material natural e o resíduo, os concretos com escória não se apresentaram trabalháveis e moldáveis. Como foi fixado um valor de referência para o abatimento, definido no item 4.4, estes concretos necessitaram de mais água para a obtenção deste, mesmo depois de ter sido empregado o máximo teor de aditivo permitido pelo fabricante, fato que gerou consideráveis aumentos nas relações água/cimento quando comparados aos concretos de referências, esta situação ocorreu principalmente nos concretos com escória miúda, em que o excesso de materiais finos reduziu o valor de abatimento dos concretos.

Alguns fatores podem ter contribuído para este comportamento, entre eles a grande quantidade de materiais pulverulentos presentes sobretudo na escória miúda, além da própria porosidade do agregado, que são fatores que exigem uma maior quantidade de água de amassamento nas misturas.

Além destes, a forma dos agregados de escória de alto-forno pode ter influenciando na trabalhabilidade dos concretos com este resíduo, uma vez que, apesar do ensaio índice de forma não ter sido realizado, é visível que a escória apresenta um formato mais cúbico que o seixo, sendo de conhecimento notório dentro da tecnologia do concreto que esta forma gera concretos com menor

trabalhabilidade do que concretos produzidos com seixo que apresenta um formato esférico.

Conclui-se que a trabalhabilidade foi afetada pelo aumento da taxa de substituição dos agregados pela escória, influenciando diretamente no aumento da relação a/c. Este comportamento assemelha-se aos obtidos em outros estudos, como o de Belachia e Hebhouh (2011), que concluíram que para manter a trabalhabilidade, é necessário aumentar a relação a/c à medida que aumenta a taxa de substituição de agregados. A mesma conclusão também foi retirada por Hebhouh et al. (2011) e por Binici et al. (2007).

## 5.2 CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

### 5.2.1 Resistência à compressão axial

O método de ensaio de resistência à compressão do concreto seguiu as determinações da NBR 5739 (2007). Os resultados das resistências encontram-se na Tabela 5.2. Adotou-se na análise o maior valor entre eles para o cálculo da resistência final em cada idade.

Tabela 5.2 - Resistência à compressão axial dos concretos.

CONCRETO	A/C	VALORES OBTIDOS (MPa)	RESISTÊNCIA 07 DIAS	VALORES OBTIDOS (MPa)	RESISTÊNCIA 28 DIAS	VALORES OBTIDOS (MPa)	RESISTÊNCIA 63 DIAS
REFERÊNCIA	0,35	46,50	<b>46,75</b>	52,61	<b>53,25</b>	54,78	<b>56,69</b>
		46,75		53,25		56,69	
	0,50	25,86	<b>30,06</b>	34,01	<b>38,47</b>	37,45	<b>37,71</b>
		30,06		38,47		37,71	
	0,65	22,42	<b>22,42</b>	23,06	<b>23,82</b>	26,75	<b>28,03</b>
		19,75		23,82		28,03	
50% GRAÚDA	0,40	36,94	<b>36,94</b>	45,86	<b>45,86</b>	48,41	<b>48,41</b>
		29,94		43,95		41,78	
	0,49	24,59	<b>24,59</b>	31,08	<b>31,08</b>	28,66	<b>28,92</b>
		24,46		25,48		28,92	
	0,65	16,82	<b>16,82</b>	21,40	<b>21,40</b>	20,64	<b>24,20</b>
		16,82		21,15		24,20	
100% GRAÚDA	0,44	37,96	<b>38,47</b>	22,68	<b>32,61</b>	37,58	<b>42,68</b>
		38,47		32,61		42,68	
	0,53	14,52	<b>24,59</b>	23,18	<b>23,18</b>	28,03	<b>28,03</b>
		24,59		23,18		25,22	
	0,69	14,90	<b>14,90</b>	16,56	<b>22,17</b>	16,82	<b>20,51</b>
		14,39		22,17		20,51	
50% MIÚDA	0,46	40,51	<b>40,51</b>	35,41	<b>40,38</b>	43,69	<b>43,69</b>
		40,25		40,38		36,18	
	0,54	25,61	<b>25,61</b>	29,43	<b>33,76</b>	34,01	<b>34,01</b>
		25,48		33,76		31,34	
	0,73	17,83	<b>18,22</b>	21,40	<b>22,29</b>	24,71	<b>24,97</b>
		18,22		22,29		24,97	
100% MIÚDA	0,61	35,67	<b>36,05</b>	33,38	<b>38,85</b>	42,68	<b>43,82</b>
		36,05		38,85		43,82	
	0,70	21,40	<b>22,68</b>	21,78	<b>25,73</b>	27,39	<b>28,03</b>
		22,68		25,73		28,03	
	0,90	13,38	<b>13,38</b>	18,09	<b>19,36</b>	15,67	<b>17,45</b>
		12,74		19,36		17,45	

Com estes resultados foi realizada a análise de variância, apresentada a seguir, que permite verificar o efeito das variáveis de controle, e se as diferenças observadas são significativas para esta propriedade. Nesta análise, um fator influencia significativamente se  $F_{calculado} > F_{tabelado}$ . Todas as hipóteses foram

testadas com um nível de confiança de 95%, ou seja, existe uma probabilidade de erro de 5%.

A significância estatística das variáveis relacionadas, relação a/c, idade e teor de substituição, assim como suas possíveis interações, são apresentadas na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3** – Resultados da ANOVA em relação à resistência à compressão axial dos concretos.

ANOVA						
FATOR	SQ	GDL	MQ	Fcal	F <sub>(0,05)</sub>	Significância
<b>1- Teor de Substituição</b>	613,923	4	153,481	211,430	2,61	<b>S</b>
<b>2- A/C</b>	4399,297	13	338,407	20,696	1,95	<b>S</b>
<b>3- Idade</b>	302,343	2	151,172	21,379	3,23	<b>S</b>
<b>12</b>	0,324	4	0,081	5,640	3,18	<b>S</b>
<b>23</b>	3298,127	13	253,705	0,750	19,42	<b>NS</b>
<b>13</b>	2564,0000	4	512,800	8,089	6,94	<b>S</b>
<b>123</b>	52.365,78	19	7.895,25	6,35	8,98	<b>NS</b>

SQ- Soma dos Quadrados      GDL – Graus de Liberdade

MQ – Média Quadrada      Fcalc – Valor de F calculado

F<sub>0,05</sub> – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Efeito significativo      NS – Efeito não significativo

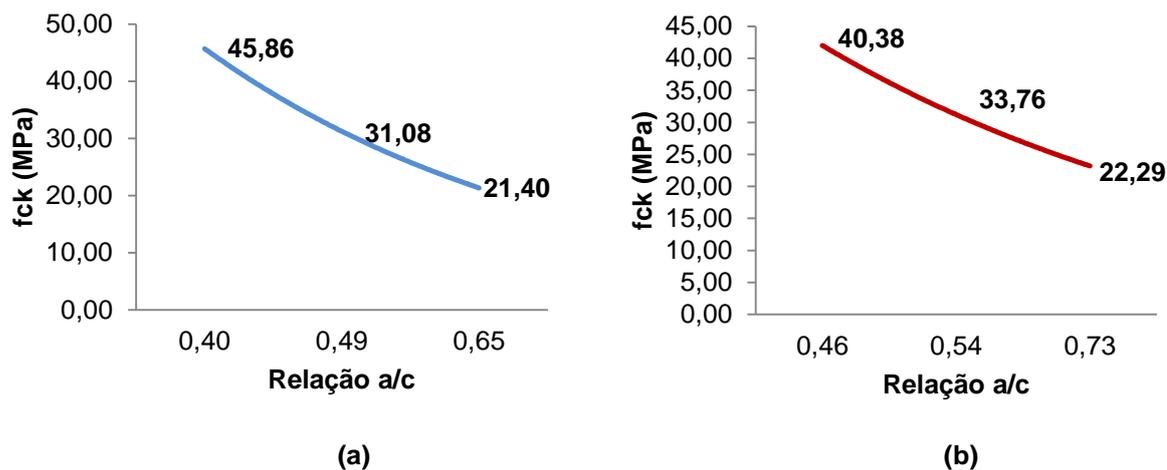
Com os resultados da ANOVA verifica-se que o efeito isolado do teor de substituição, da relação a/c e da idade apresentam-se como significativos sobre a resistência à compressão axial. Assim como, a interação entre o teor de substituição e a relação a/c, e entre o teor de substituição e a idade, também apresentaram uma relação estatisticamente significativa, sendo cada uma destas discutidas a seguir:

#### **a) Efeito da relação a/c na resistência à compressão do concreto.**

A relação a/c é um fator de extrema influência na resistência à compressão do concreto. Nas Figuras 5.1a e 5.1b, tem-se os gráficos de tendência do comportamento do efeito isolado da relação a/c, na resistência à compressão em concretos produzidos com escória de alto-forno graúda e miúda, respectivamente. Nos gráficos tem-se os valores de crescimento da resistência, em relação ao vigésimo oitavo dia, idade em que o concreto já adquiriu quase a totalidade de sua

resistência à compressão, e em relação ao teor de substituição de 50%, como forma de se obter a contribuição média das substituições.

**Figura 5.1 (a) e (b)** - Resistência à compressão em função do efeito isolado da relação a/c em: (a) concretos com escória graúda. (b) em concretos com escória miúda.

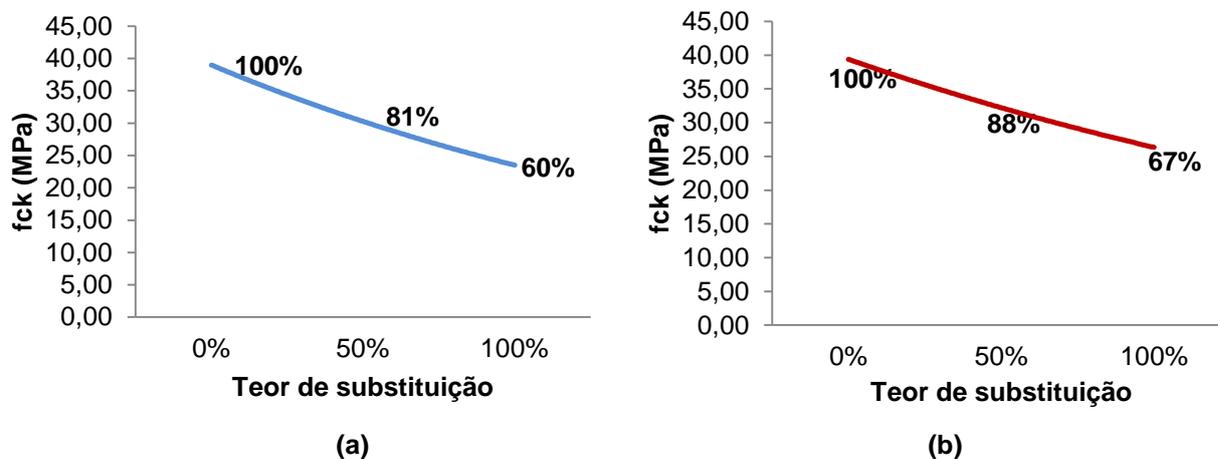


Em ambos os gráficos, constata-se que os valores de resistência à compressão vão diminuindo conforme aumenta-se os valores da relação a/c. Esta situação evidencia as leis de comportamento do concreto, de que a resistência à compressão é inversamente proporcional a relação a/c (NEVILLE, 1997), ratificando assim o fato desta relação ser consenso entre o meio técnico. Este comportamento pode ser explicado como consequência natural do enfraquecimento progressivo da matriz causado pelo aumento da porosidade com o aumento da relação água/cimento (METHA & MONTEIRO, 2008), cabe ressaltar que o comportamento apresentado nos gráficos tende a variar em decorrência de outras variáveis, como o teor de substituição de escória de alto-forno e a idade, que serão analisados adiante.

#### **b) Efeito da adição de escória de alto-forno na resistência à compressão do concreto.**

Nas figuras 5.2a e 5.2b, tem-se os gráficos de tendência do comportamento do teor de substituição da escória como agregado graúdo e miúdo, respectivamente. Para a obtenção da contribuição de cada teor, foi fixada a idade de rompimento no vigésimo oitavo dia e utilizadas relações a/c aproximadas, pelo fato de ter tido alterações desta variável por ocasião de algumas misturas.

**Figura 5.2 (a) e (b)** - Resistência à compressão em função do efeito isolado do teor de substituição de: (a) escória graúda. (b) escória miúda.



Com base nos gráficos acima é possível constatar que os teores de substituições aqui empregados não contribuíram para o aumento da resistência à compressão dos concretos. Contudo, ressalta-se que interações como teor de substituição x relação a/c e teor de substituição x idade, que serão analisados adiante, também são importantes para o comportamento desta propriedade.

Possivelmente a inserção da escória gerou uma perda da resistência, porém cabe ressaltar que essa perda foi influenciada também pela alteração da relação a/c nas misturas. Esse aumento das relações a/c fez com que a perda de resistência em decorrência da escória sofresse um acréscimo, pelo fato de que nas misturas com maiores teores de escória houve uma relação a/c maior em relação aquelas com menores teores, porém essa interação será discutida mais adiante. Acredita-se que apesar de nesse item está se estudando o efeito isolado do teor de adição, a visualização desse efeito foi um pouco dificultada pelo fato de que nas misturas com maiores teores de adição, houve uma dificuldade na manutenção da relação a/c para a obtenção do abatimento, prejudicando assim o efeito puro do teor de adição, porém não impossibilitando de ver que mesmo tendo o aumento das relações a/c, a adição de escória gerou perda de resistência.

Esses resultados diferem dos encontrados por outros pesquisadores, tais como Arrivabene (2000) que produziu o que chamou de concreto 2, constituído por: escória de alto-forno granulada (EAFG) como agregado miúdo, escória de alto-forno bruta britada (EAFBB) como agregado graúdo e escória de alto-forno granulada

moída (EAFGM) com adição de 10% sobre a massa de cimento. E o que definiu como concreto 3 foi produzido com os mesmos agregados e com uma substituição de 40% de cimento por EAFGM. Analisando-se os resultados ambos os concretos apresentaram resistências à compressão superiores ao concreto de referência (com brita gnáissica e areia natural). Acredita-se que essa diferença entre os resultados das pesquisas deve-se ao fato de Arrivabene (2000) ter utilizado escória granulada como agregado miúdo, e moída como adição e substituição ao cimento.

Rosário et al., (2010) ao utilizar escória de alto-forno cristalina em substituição ao seixo nas proporções de 25% e 50%, também constatou que o aumento do percentual de substituição dos agregados naturais pelos agregados de escória, resultou na diminuição da resistência à compressão do concreto. Acredita-se que este comportamento deve-se a interferência de maneira negativa das propriedades dos agregados que afetam o comportamento do concreto no estado fresco e endurecido, como granulometria, massa específica, forma e textura das partículas, resistência, absorção de água e os tipos de substâncias deletérias presentes.

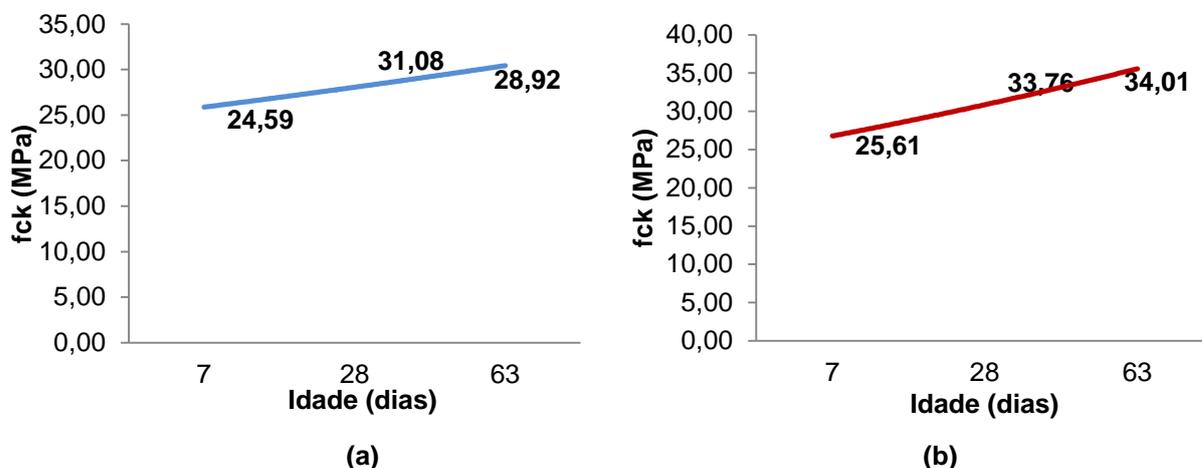
As escórias granuladas de alto-forno apresentam propriedades hidráulicas latentes, endurecendo quando misturadas com água, enquanto que as escórias cristalinas resfriadas ao ar apresentam atividades hidráulicas baixas (MASSUCATO, 2005), que é o caso das empregadas neste trabalho.

### **c) Efeito da idade na resistência à compressão do concreto.**

Assim como a relação  $a/c$ , a idade é um fator significativo na resistência à compressão do concreto, uma vez que resistência e idade são fatores ligados de maneira diretamente proporcionais. Nas Figuras 5.3a e 5.3b, tem-se os gráficos de tendência do comportamento do efeito isolado da idade na resistência à compressão em concretos com escória graúda e miúda, respectivamente.

O gráfico da Figura 5.3a, foi obtido fixando-se a relação  $a/c$  em 0,49 para todas as idades estudadas no concreto com 50% de substituição de escória graúda, como forma de se obter a contribuição média das substituições. No gráfico da Figura 5.3b, fixou-se a relação  $a/c$  em 0,54 em todas as idades, para o concreto com 50% de substituição de escória miúda.

**Figura 5.3 (a) e (b)** - Resistência à compressão em função do efeito isolado da idade em concretos com: (a) escória graúda. (b) escória miúda.



Contata-se que a influência do efeito isolado da idade de rompimento não foi tão significativa nos concretos com escória, o maior acréscimo de desempenho pode ser observado nos concretos com escória miúda, de uma maneira geral, verifica-se que grande parte do crescimento da resistência ocorreu entre zero e sete dias, após esse período os crescimentos não foram tão significativos ou até mesmo inexistente. Este comportamento já era esperado em função do tipo de cimento utilizado, que não gera grandes ganhos de resistência após os 28 dias, essa situação também indica que os agregados de escória não contribuíram para o ganho de resistência ao longo das idades.

Reis (2013), ao avaliar a durabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados provenientes de cerâmicas vermelhas, notou aos 63 dias uma queda de resistência à compressão em todas as misturas que continham agregado cerâmico reciclado. Reis apud. Leite (2001) explica a diminuição de resistência ao se utilizar AGR baseando-se na própria propriedade mecânica dos agregados reciclados que embora proporcionem uma zona de transição mais densificada e a interface entre pasta e agregado melhor aderida, quando este agregado é solicitado à compressão este tende a ter menor desempenho em relação agregados naturais.

Silva et al., (2012) em sua pesquisa visando analisar o desempenho mecânico de concretos com a incorporação de agregados finos provenientes da indústria do mármore, observou que a evolução da resistência à compressão destes

concretos seguiu um comportamento idêntico a dos concretos convencionais, para idades jovens, o acréscimo de resistência foi substancialmente maior do que para idades posteriores.

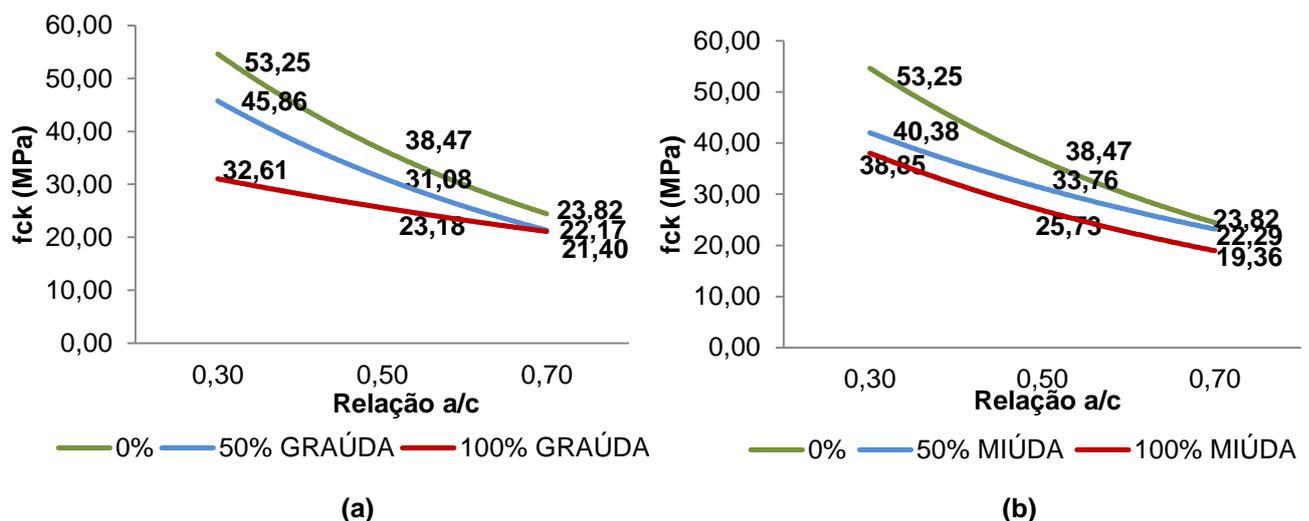
Também neste caso ressalta-se que os resultados encontrados tendem a variar em decorrência do teor de substituição, demonstrando que a interação teor de substituição x idade, também é significativa para o comportamento desta propriedade.

#### d) Efeito da adição de escória de alto-forno em função da relação a/c, na resistência à compressão do concreto.

Os gráficos das Figuras 5.4a e 5.4b, referem-se ao comportamento da resistência à compressão em função da interação entre o teor de substituição de escória graúda e miúda, respectivamente, e a relação a/c. Para a construção dos gráficos foram adotados os três valores de resistência obtidos aos 28 dias em cada um dos concretos.

**Figura 5.4 (a) e (b)** - Resistência à compressão em função da interação teor de substituição:

(a) - (escória graúda) x relação a/c. (b) - (escória miúda) x relação a/c.



Analisando os gráficos da Figura 5.4, verifica-se que para todas as relações a/c analisadas, nenhum dos concretos produzidos utilizando escória como agregado conseguiu superar o concreto de referência. Os concretos com 50% e 100% de

substituição de escória graúda, tiveram perdas de 48% e 66%, respectivamente. Os concretos com 50% e 100% de escória miúda, tiveram perdas de 55% e 50%.

É de conhecimento notório no meio técnico que nas menores relações a/c a zona de transição é mais forte, fator que possibilita uma melhor visualização do desempenho dos agregados, haja vista que nessa situação a ruptura tende a ocorrer no agregado. No caso dos concretos com escória observa-se que mesmo nas menores relações a/c, estes ficaram abaixo do concreto de referência, fato que demonstra que os agregados de escória são mais fracos em relação ao seixo e a areia que apresentaram resistências superiores em ambas às situações. No caso das maiores relações a/c, onde a zona de transição é mais fraca, a observação do efeito do agregado é dificultada, pois a resistência do agregado de escória embora baixa, mas existente, passa a ser desconsiderada pelo sistema, pois a ruptura tende a não ocorrer no agregado e sim na zona de transição.

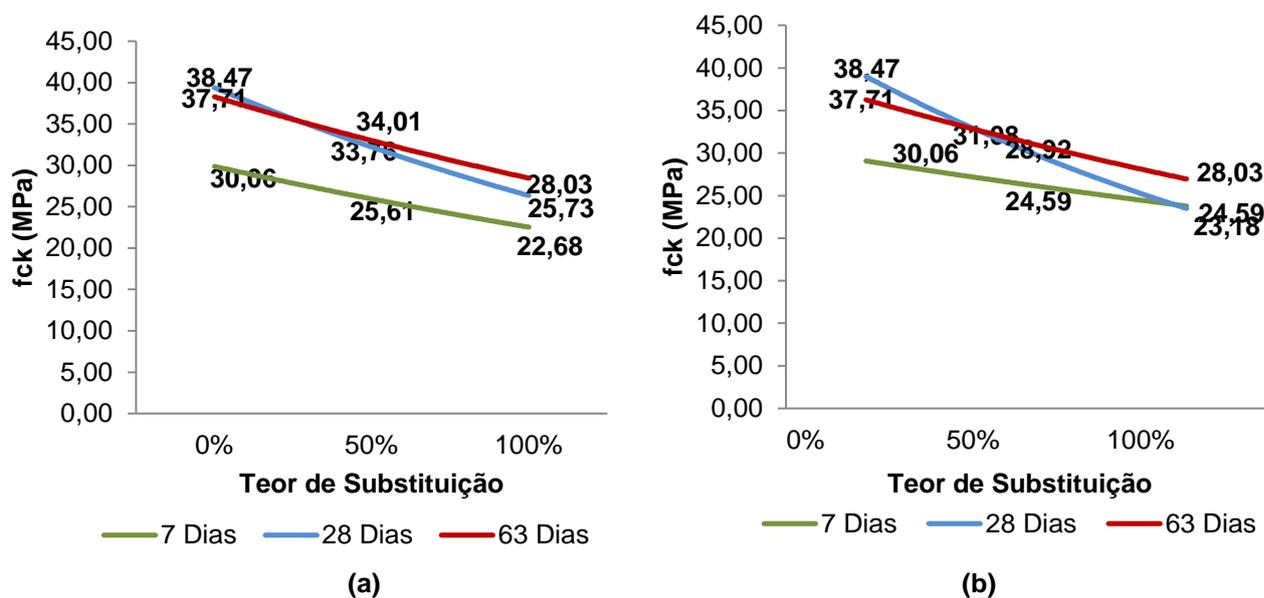
Este comportamento novamente assemelha-se ao observado nos agregados reciclados de construção civil. Reis (2013), observou aos 63 dias uma queda de resistência à compressão em todas as misturas que continham agregado cerâmico reciclado, sendo que esta diminuição foi mais evidente quanto menor o fator água/cimento nas misturas com agregado graúdo reciclado cerâmico saturados em 60% e 100%. De acordo com o autor o mesmo comportamento foi observado por Bazuco (1999), que constatou que para maiores fatores água/cimento estas diferenças tendem a ser menores.

A comparação dos resultados obtidos com os resultados de outros trabalhos que focalizaram o uso da escória de alto-forno como agregados para concretos, fica dificultada pela quase inexistência de trabalhos que abordem esta interação em relação à compressão axial.

#### **e) Efeito da adição de escória de alto-forno em função da idade, na resistência à compressão do concreto.**

O comportamento da resistência à compressão em função da interação entre o teor de substituição e a idade, pode ser visualizado na Figura 5.5a, para concretos com escórias graúdas e na Figura 5.5b, em concretos com escórias miúdas. Para a montagem dos gráficos foi adotado em cada concreto (com ou sem substituição) o valor intermediário das resistências obtidas em cada uma das idades estudadas.

**Figura 5.5 (a) e (b)** - Resistência à compressão em função da interação teor de substituição:  
 (a) - (escória graúda) x idade. (b) - (escória miúda) x idade.



Pode-se observar que há certa semelhança entre os comportamentos dos concretos quanto à resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral e ao módulo de elasticidade. Porém, quanto à resistência à tração por compressão diametral e ao módulo, não houve interação entre o teor de substituição e a idade, conforme foi verificado quanto à resistência à compressão axial.

É importante ressaltar nesta análise, o fato dos resultados obtidos aos 28 dias terem sido maiores que os encontrados aos 63 dias, em ambos os tipos de substituições, pois como é de conhecimento notório na área essa situação não ocorre. Nota-se que os valores entre estas idades encontram-se bem próximos, fato justificado anteriormente pelo tipo de cimento utilizado na pesquisa. Em função desta proximidade de valores, atribui-se estes resultados não saírem conforme o esperado, a uma possível variação durante o processo de execução do ensaio. Situação semelhante foi evidenciada por Silva (2006) ao avaliar o desempenho de concreto contendo agregado graúdo de escória de ferro-cromo, o autor justifica tal situação as variações inerentes ao ensaio relativas às influências de moldagem, cura, velocidade de ensaio, entre outros.

Analisando os gráficos em conjunto é possível visualizar que nas menores idades o efeito dos agregados de escória aparentemente é menor, enquanto que

nas maiores idades este efeito é mais significativo. Acredita-se que isto deve-se ao fato de que nas maiores idades o processo de hidratação já ocorreu de maneira mais continuada, ou seja, a pasta apresenta uma melhor rigidez, conseqüentemente a influência do agregado será mais efetiva, como neste caso o agregado de escória é fraco, gerou resistências menores que o seixo.

A comparação dos resultados obtidos é dificultada pela inexistência de trabalhos que utilizaram escória de alto-forno como agregados para concreto abordando esta interação em relação à compressão axial.

### **5.2.2 Resistência à tração por compressão diametral**

A determinação da resistência à tração por compressão diametral procedeu-se de acordo com a NBR 7222 (2010). Na Tabela 5.4, são apresentados os resultados. Adotou-se na análise o maior valor entre eles para o cálculo da resistência final em cada idade.

Tabela 5.4 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos.

CONCRETOS	A/C	VALORES OBTIDOS (MPa)	RESISTÊNCIA 07 DIAS	VALORES OBTIDOS (MPa)	RESISTÊNCIA 28 DIAS	VALORES OBTIDOS (MPa)	RESISTÊNCIA 63 DIAS
REFERÊNCIA	0,35	2,77	2,77	3,09	3,63	3,60	3,60
		2,52		3,63		3,41	
	0,50	2,96	2,96	2,39	2,87	2,23	3,03
		2,13		2,87		3,03	
	0,65	2,17	2,17	2,29	2,55	2,39	2,61
		2,01		2,55		2,61	
50% GRAÚDA	0,40	3,95	3,95	2,96	2,96	2,55	3,34
		2,55		2,64		3,34	
	0,49	3,12	3,12	2,55	2,60	2,04	2,87
		2,07		2,60		2,87	
	0,65	2,10	2,17	2,07	2,42	1,91	1,91
		2,17		2,42		1,82	
100% GRAÚDA	0,44	1,43	1,43	1,53	1,53	2,96	2,96
		1,43		1,27		2,58	
	0,53	2,10	2,10	1,46	1,46	2,23	2,23
		1,24		1,15		1,85	
	0,69	1,59	1,59	1,33	1,43	1,72	2,04
		0,96		1,43		2,04	
50% MIÚDA	0,46	2,04	2,04	1,43	3,03	1,50	1,50
		1,94		3,03		1,43	
	0,54	1,97	1,97	1,21	2,47	2,17	2,17
		1,97		2,47		1,94	
	0,73	1,59	1,88	1,02	1,21	1,50	1,85
		1,88		1,21		1,85	
100% MIÚDA	0,61	1,46	2,48	3,18	3,18	2,39	2,61
		2,48		2,93		2,61	
	0,70	1,75	1,75	1,80	1,85	0,96	1,08
		1,43		1,85		1,08	
	0,90	1,59	1,59	1,25	1,34	0,96	0,96
		1,02		1,34		0,86	

Com estes resultados foi realizada a análise de variância apresentada a seguir, que permite verificar o efeito das variáveis de controle, e se as diferenças observadas são significativas para esta propriedade. Nesta análise, um fator influencia significativamente se  $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ . Todas as hipóteses foram

testadas com um nível de confiança de 95%, ou seja, existe uma probabilidade de erro de 5%.

A significância estatística das variáveis relacionadas, relação a/c, idade e teor de substituição, assim como suas possíveis interações, são apresentadas na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5** – Resultados da ANOVA em relação à resistência à tração por compressão diametral dos concretos.

ANOVA						
FATOR	SQ	GDL	MQ	Fcal	F <sub>(0,05)</sub>	Significância
<b>1- Teor de Substituição</b>	9,79	44	2,45	6,86	3,35	<b>S</b>
<b>2- A/C</b>	16,36	13	1,26	5,07	4,62	<b>S</b>
<b>3- Idade</b>	101,25	2	49,23	12,58	2,12	<b>S</b>
<b>12</b>	59.800,80	13	4.600,06	38,03	17,58	<b>S</b>
<b>23</b>	38.956,02	2	2.895,36	2,53	15,12	<b>NS</b>
<b>13</b>	63.550,80	2	1.523,11	1,26	16,85	<b>NS</b>
<b>123</b>	54.235,62	19	4.658,26	5,64	7,85	<b>NS</b>

SQ- Soma dos Quadrados      GDL – Graus de Liberdade

MQ – Média Quadrada      Fcalc – Valor de F calculado

F<sub>0,05</sub> – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Efeito significativo      NS – Efeito não significativo

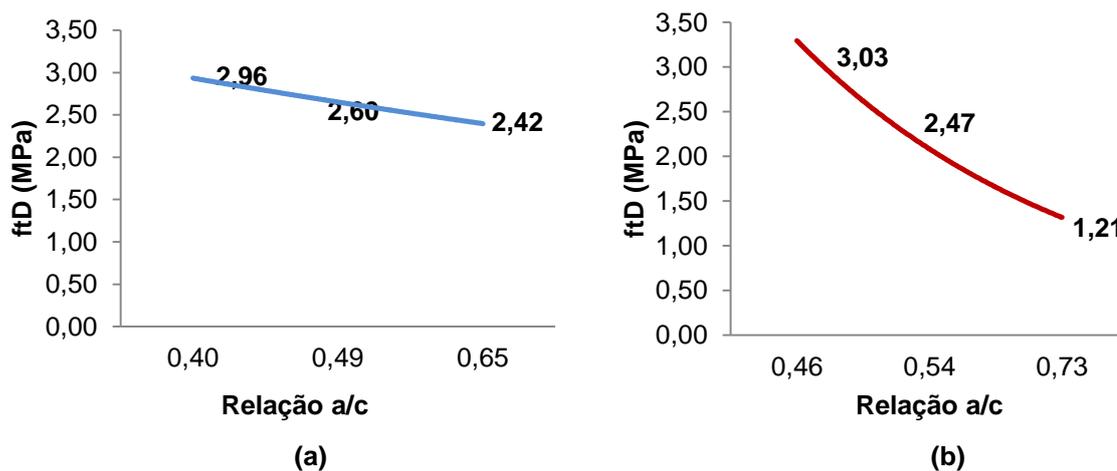
Os resultados da Tabela 5.5 mostram que há influência significativa do efeito isolado do teor de substituição, da relação a/c e da idade na resistência à tração por compressão diametral. Verifica-se ainda que há interação entre o teor de substituição e a relação a/c, sendo todas as influências significativas discutidas a seguir:

#### **a) Efeito da relação a/c na resistência à tração por compressão diametral do concreto.**

Assim como na resistência à compressão, a relação a/c é de extrema influência na resistência à tração do concreto. Nas Figuras 5.6a e 5.6b são colocados os gráficos que apresentam o comportamento do efeito isolado da relação a/c em concretos com escória graúda e miúda, respectivamente, nesta propriedade. Para a obtenção dos gráficos foram utilizados valores de resistência ao vigésimo

oitavo dia, idade em que o concreto já adquiriu quase a totalidade de sua resistência, de concretos com teores de substituição de 50%, como forma se obter a contribuição média das substituições.

**Figura 5.6 (a) e (b)** - Resistência à tração por compressão diametral em função do efeito isolado da relação a/c: (a) em concretos com escória graúda. (b) em concretos com escória miúda.

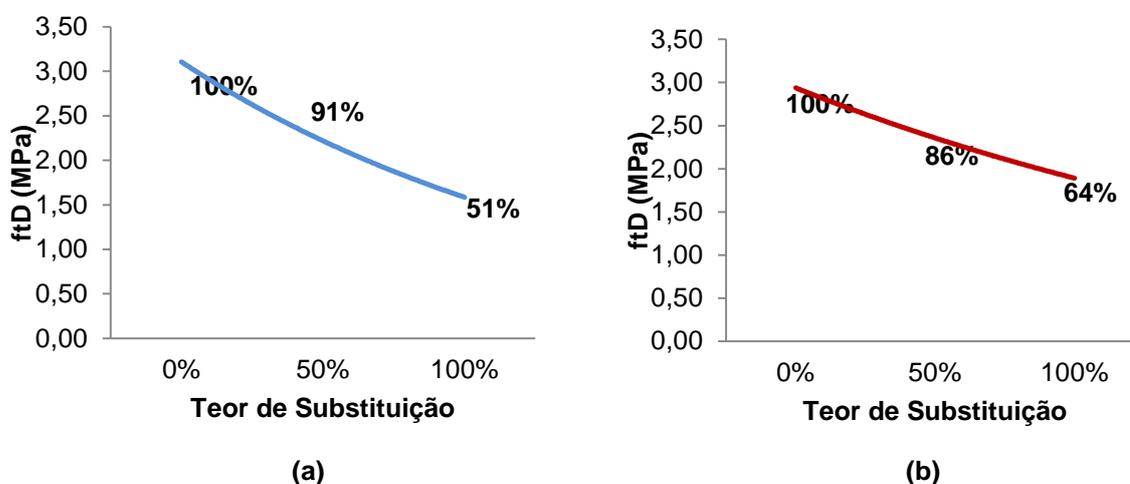


Conforme o esperado em ambos os gráficos a resistência à compressão diametral dos concretos diminuem com o aumento da relação a/c, os resultados obtidos nos dois tipos de substituições estão de acordo com a lei que rege a influência da relação a/c nesta propriedade. Verifica-se que nos concretos com escória miúda esta diminuição foi muito mais acentuada, isso deve-se as elevadas relações a/c que contribuem para um progressivo enfraquecimento da matriz devido ao aumento da porosidade.

#### **b) Efeito da adição de escória de alto-forno na resistência à tração por compressão diametral do concreto.**

Para todos os teores de substituição estudados, a contribuição obtida da escória graúda e miúda pode ser observada nas Figuras 5.7a e 5.7b, respectivamente. Foram utilizadas novamente relações a/c aproximadas, pelo fato de ter tido alteração desta variável por ocasião de algumas misturas, e a idade de rompimento foi fixada no 28<sup>o</sup> dia de idade dos concretos.

**Figura 5.7 (a) e (b)** - Resistência à tração por compressão diametral em função do efeito isolado do teor de substituição de: (a) escória graúda. (b) escória miúda.



Assim como na resistência à compressão, tem-se evidente que o aumento do teor de substituição não resultou em aumento da resistência à tração por compressão diametral dos concretos. Analisando de uma maneira geral, a queda nos valores de resistência foi muito maior nesta propriedade do que na resistência à compressão. Os concretos produzidos com teores de substituição de 50% de escória miúda e graúda apresentaram um decréscimo de 14% e 9%, respectivamente, em relação ao concreto de referência. Ao aumentar este teor para 100%, o decréscimo foi de 36% para o concreto com escória miúda e 49% para o concreto com escória graúda.

Assim como na resistência à compressão a inserção da escória provavelmente contribuiu para a diminuição da resistência, sendo esta também influenciada pela alteração da relação  $a/c$  nessas misturas. Essa alteração acentuou a perda de resistência ocasionada pela escória, uma vez que, nas misturas com elevados teores de escória teve-se as maiores relações  $a/c$ , o contrário ocorreu para aquelas com menores teores. A interação entre estas variáveis, que se mostrou significativa para o comportamento desta propriedade será discutida mais adiante. Ressalta-se que, apesar de nesse item está se estudando o efeito isolado do teor de adição, este foi um pouco dificultado, em virtude de que nas misturas com maiores teores de adição, teve-se uma dificuldade na manutenção da relação  $a/c$  para a obtenção do abatimento, afetando assim a visualização do efeito puro do teor de

adição, porém não impossibilitando de ver que mesmo tendo o aumento das relações a/c a adição de escória gerou perda de resistência.

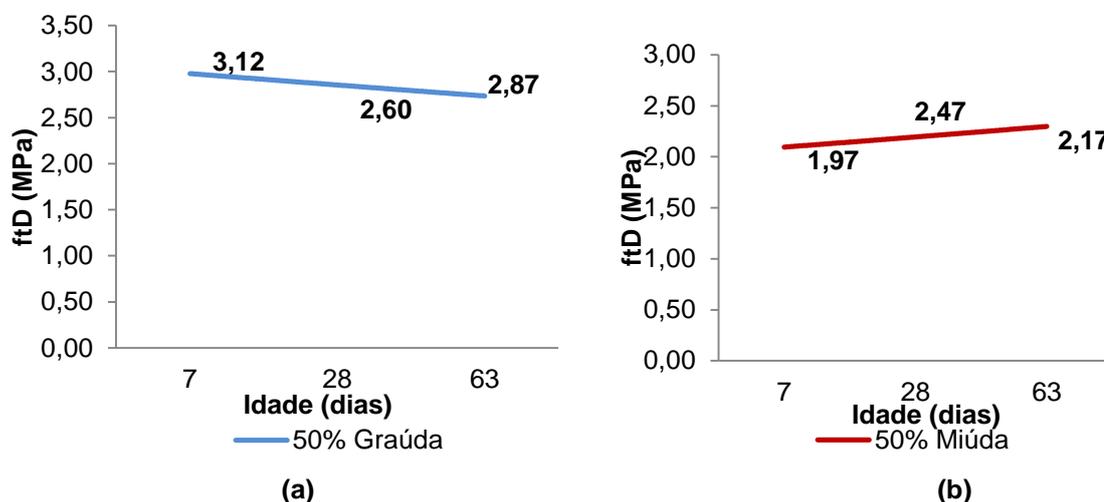
Rosário et al., (2010) ao utilizar 25% de substituição obteve resultados satisfatórios para esta propriedade, o mesmo não ocorreu ao empregar 50%, os valores de resistência sofreram uma queda, que a autora atribuiu ao aumento da água necessária para os traços com este percentual de substituição do resíduo.

Moura (2000), ao utilizar escória de cobre como agregados para concreto observou que a partir de 50% de substituição a resistência à tração por compressão diametral diminuía, comportamento semelhante ao obtido nesta pesquisa, embora nesta não se tenha utilizados teores menores que 50%. O autor justifica que as razões para este comportamento podem estar associadas à granulometria, tamanho, forma, textura ou ainda substâncias deletérias presentes nos grãos de escória, que em altos teores de substituição pode ter interferido de maneira negativa no desempenho mecânico do concreto, ratificando assim a importância destas propriedades para o desenvolvimento da resistência à tração.

### **c) Efeito da idade na resistência à tração por compressão diametral do concreto.**

Assim como na resistência à compressão, a idade é um fator de extrema influência na resistência à tração do concreto. Nas Figuras 5.8a e 5.8b tem-se os gráficos de tendência do comportamento do efeito isolado da idade em concretos com escória graúda e miúda, respectivamente, nesta propriedade. No gráfico da Figura 5.8a fixou-se a relação a/c em 0,49 para todas as idades estudadas no concreto com 50% de substituição de escória graúda. No gráfico da Figura 5.8b fixou-se a relação a/c em 0,54 em todas as idades, para o concreto com 50% de substituição de escória miúda.

**Figura 5.8 (a) e (b)** - Resistência à tração por compressão diametral em função do efeito isolado da idade em concretos com: (a) escória graúda. (b) escória miúda.



Com base nos gráficos nota-se que o efeito isolado da idade de rompimento não foi tão significativo nos concretos com escória, com grande parte do crescimento da resistência entre zero e sete dias, e tendências de comportamentos diferenciados dentro da mesma propriedade.

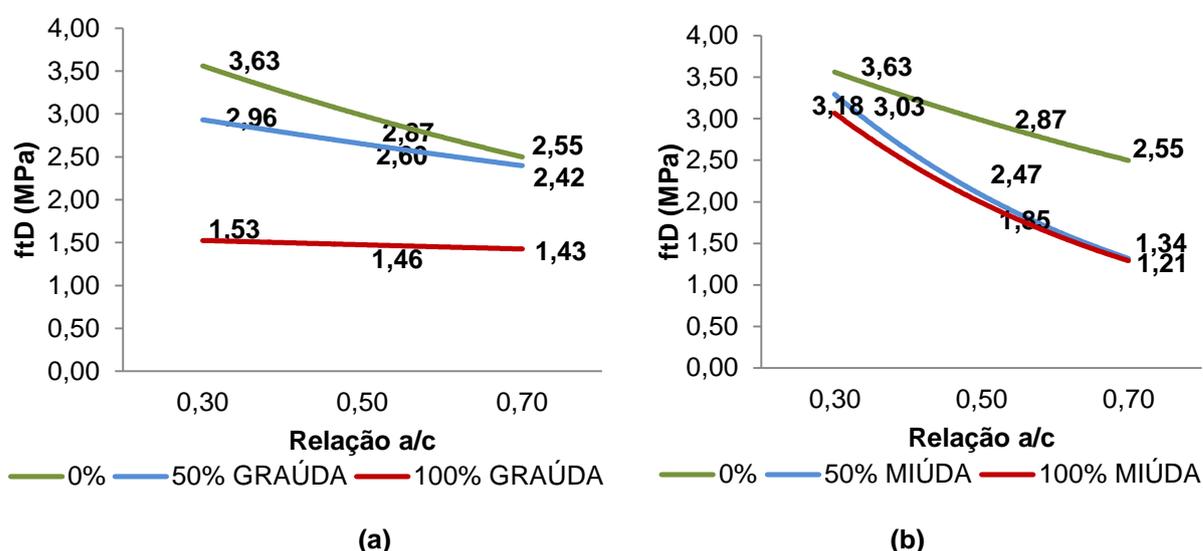
Observa-se novamente situações inesperadas em que concretos com idades mais avançadas apresentaram menores resistências que concretos em idades iniciais, no entanto, como as diferenças entre os valores foram pequenas, atribui-se este comportamento a uma possível variação durante o processo de execução do ensaio, assim como ocorrido no trabalho de Souza (2006), já que é consenso entre o meio técnico que essa situação não existe.

Os resultados obtidos para concretos com escória graúda são semelhantes ao encontrados por Erntroy apud. Coelho (2002) ao avaliar a influência do grau de vitrificação e, conseqüentemente da reatividade na resistência do concreto com escória de alto-forno. O autor realizou um estudo com variação do teor de vidro, através da re-calcinação da escória, para produzir uma escória cristalina, tal como a usada nesta pesquisa. Seis misturas foram preparadas com diferentes teores de vidro ficando demonstrado que, com a utilização de maiores teores de escória calcinada, isto é, escórias com estrutura cristalina, as resistências à compressão e a tração, a várias idades, foram significativamente reduzidas.

**d) Efeito da adição de escória de alto-forno em função da relação a/c, na resistência à tração por compressão diametral do concreto.**

Na Figura 5.9 (a) e (b), pode ser visualizado o efeito da interação teor de substituição x relação a/c sobre esta propriedade, em concretos com escória gráuda e miúda, respectivamente. Os valores para a montagem dos gráficos foram os obtidos na idade de 28 dias em cada concreto.

**Figura 5.9 (a) e (b)** - Resistência à tração por compressão diametral em função da interação teor de substituição: (a) - (escória gráuda) x relação a/c. (b) - (escória miúda) x relação a/c.



Nesta interação, assim como na resistência à compressão axial, todos os concretos apresentaram o mesmo comportamento: diminuição da resistência à tração à medida com o aumento da relação a/c e o teor de substituição.

Da mesma forma como ocorreu na resistência à compressão, mesmo nas menores relações a/c em que a zona de transição é mais forte, os concretos com escória não conseguiram superar o concreto de referência, diminuindo ainda mais a resistência à medida que aumenta o teor de substituição, fato que demonstra a fragilidade do agregado. Em se tratando das maiores relações a/c onde a zona de transição é mais fraca, a observação do efeito do agregado é dificultada, pois a resistência do agregado de escória embora baixa, mas existente, passa a ser desconsiderada pelo sistema, pois a ruptura tende a não ocorrer no agregado e sim na zona de transição.

SILVA et al., (2012) em seu estudo visando analisar o desempenho mecânico de concretos com agregados finos provenientes de resíduos da indústria do mármore, produziu concretos com diferentes taxas de substituição (0, 20, 50 e 100%) de agregados finos de primários (areias de rio, basalto e granito) por agregados finos de mármore. Os autores observaram perdas relativas de resistência à tração por compressão diametral, para qualquer padrão de substituição de agregados, os mesmos fundamentaram as razões para este comportamento o aumento da relação  $a/c$  com a taxa de substituição.

Belachia e Hebhouh (2011), no seu estudo, concluíram que a resistência à tração por compressão diametral diminui com a percentagem de substituição de agregados para todas as relações  $a/c$  analisadas, conclusões também alcançadas no presente estudo.

Aruntas et al., (2010) chegaram a conclusões semelhantes, isto é, a incorporação de agregados finos secundários resulta numa ligeira diminuição da resistência à tração por compressão diametral em função do aumento da relação  $a/c$ .

### 5.2.3 Módulo de Elasticidade

O ensaio baseou-se na NBR 8522 (2008), os valores dos módulos encontram-se na Tabela 5.6. Adotou-se na análise o maior valor obtido do módulo de elasticidade em cada idade.

**Tabela 5.6 – Módulo de elasticidade dos concretos.**

CONCRETOS	A/C	VALORES OBTIDOS (GPa)	MÓDULO 07 DIAS	VALORES OBTIDOS (GPa)	MÓDULO 28 DIAS	VALORES OBTIDOS (GPa)	MÓDULO 63 DIAS
REFERÊNCIA	0,35	31,33	<b>31,81</b>	38,55	<b>38,55</b>	41,90	<b>41,90</b>
		31,81		36,80		40,56	
	0,50	27,29	<b>27,69</b>	33,88	<b>33,88</b>	33,40	<b>33,40</b>
		27,69		32,90		32,97	
	0,65	24,42	<b>25,61</b>	29,70	<b>29,70</b>	28,33	<b>28,33</b>
		25,61		29,11		26,05	
50% GRAÚDA	0,40	32,57	<b>33,86</b>	36,49	<b>38,07</b>	41,99	<b>41,99</b>
		33,86		38,07		37,25	
	0,49	31,79	<b>31,79</b>	36,32	<b>36,56</b>	35,53	<b>38,35</b>
		28,09		36,56		38,35	
	0,65	33,24	<b>33,24</b>	26,81	<b>26,81</b>	29,12	<b>29,12</b>
		31,00		26,07		27,83	
100% GRAÚDA	0,44	30,95	<b>30,95</b>	35,13	<b>36,27</b>	33,96	<b>35,22</b>
		30,95		36,27		35,22	
	0,53	32,72	<b>32,72</b>	35,73	<b>35,73</b>	31,58	<b>31,89</b>
		32,01		35,12		31,89	
	0,69	26,40	<b>26,40</b>	27,41	<b>29,61</b>	25,45	<b>27,12</b>
		25,37		29,61		27,12	
50% MIÚDA	0,46	29,35	<b>30,20</b>	36,22	<b>36,22</b>	37,63	<b>37,63</b>
		30,20		35,49		36,70	
	0,54	27,66	<b>27,66</b>	27,37	<b>27,37</b>	29,75	<b>29,75</b>
		25,21		27,14		27,31	
	0,73	22,54	<b>22,54</b>	24,45	<b>24,45</b>	23,45	<b>24,98</b>
		20,84		22,91		24,98	
100% MIÚDA	0,61	24,86	<b>27,41</b>	31,43	<b>31,43</b>	27,64	<b>29,03</b>
		27,41		31,21		29,03	
	0,70	20,18	<b>21,95</b>	24,31	<b>24,31</b>	25,58	<b>25,69</b>
		21,95		23,08		25,69	
	0,90	19,54	<b>19,54</b>	2,06	<b>11,87</b>	19,72	<b>19,72</b>
		19,15		11,87		18,28	

Com estes resultados foi realizada a análise de variância apresentada a seguir, que permite verificar o efeito das variáveis de controle, e se as diferenças observadas são significativas para esta propriedade. Nesta análise, um fator influencia significativamente se  $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ . Todas as hipóteses foram testadas com um nível de confiança de 95%, ou seja, existe uma probabilidade de erro de 5%.

A significância estatística das variáveis relacionadas, relação a/c, idade e teor de substituição, assim como suas possíveis interações, são apresentadas na Tabela 5.7.

**Tabela 5.7 – Resultados da ANOVA em relação ao módulo de elasticidade dos concretos.**

ANOVA						
FATOR	SQ	GDL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>(0,05)</sub>	Significância
<b>1- Teor de Substituição</b>	647,736	4	161,934	6,433	2,850	<b>S</b>
<b>2- A/C</b>	1364,104	13	104,931	11,193	6,542	<b>S</b>
<b>3- Idade</b>	106,19	2	44,84	6,52	5,25	<b>S</b>
<b>12</b>	0,324	4	0,081	5,640	1,236	<b>S</b>
<b>23</b>	4,780	13	0,856	0,002	8,520	<b>NS</b>
<b>13</b>	54.231,236	4	7652,365	0,875	3,527	<b>NS</b>
<b>123</b>	50.458,71	19	8745,325	2,154	4,236	<b>NS</b>

SQ- Soma dos Quadrados      GDL – Graus de Liberdade

MQ – Média Quadrada      F<sub>calc</sub> – Valor de F calculado

F<sub>0,05</sub> – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Efeito significativo      NS – Efeito não significativo

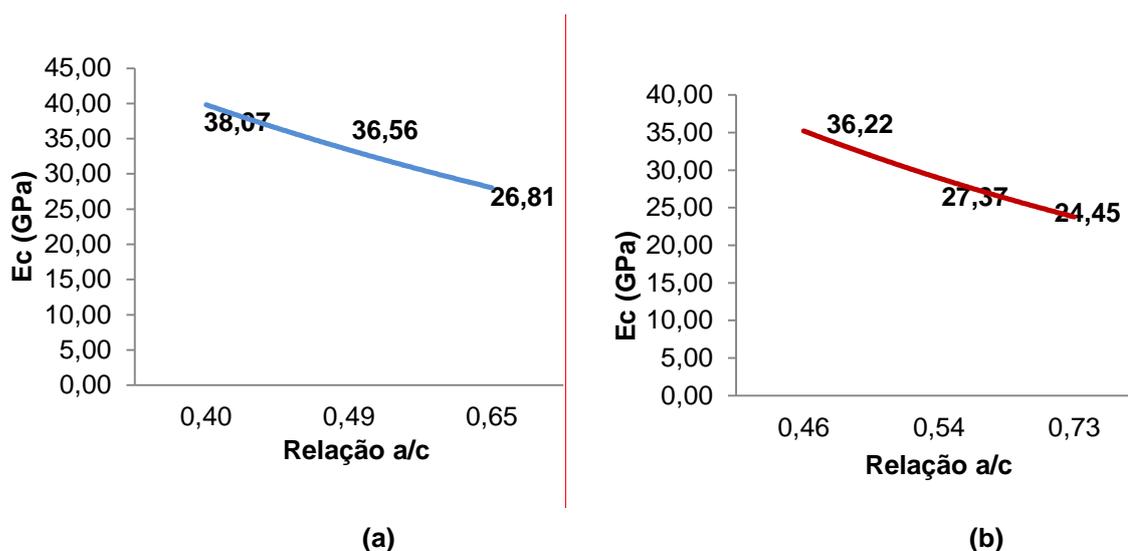
Os valores obtidos através da ANOVA, apresentados na Tabela 5.7, constataam que o teor de substituição, a relação a/c e a idade, analisados separadamente, possuem efeito significativo sobre o módulo de elasticidade. A interação entre o teor de substituição e a relação a/c também apresentou influência significativa nesta propriedade. Todas as significâncias constatadas serão analisadas a seguir:

#### **a) Efeito da relação a/c no módulo de elasticidade do concreto.**

Os gráficos das Figuras 5.10a e 5.10b representam a tendência do comportamento do efeito isolado da relação água/cimento em concretos com escória

graúda e miúda, respectivamente, no módulo de elasticidade do concreto. Os gráficos foram obtidos com os valores de resistência ao vigésimo oitavo dia, idade em que o concreto já adquiriu quase a totalidade de seu módulo de elasticidade, dos concretos com teores de substituição de 50%, como forma de se obter as contribuições médias das substituições.

**Figura 5.10 (a) e (b)** – Módulo de elasticidade em função do efeito isolado da relação a/c: (a) em concretos com escória graúda. (b) em concretos com escória miúda.



Os gráficos do efeito isolado da relação a/c apresentam uma diminuição dos valores do módulo de elasticidade conforme aumenta-se os valores da relação. Nas maiores relações a/c, tem-se um maior afastamento dos grãos de cimento fazendo com haja uma maior presença, principalmente na zona de transição, dos cristais de hidróxido de cálcio e etringita, resultando num enfraquecimento das ligações no concreto endurecido.

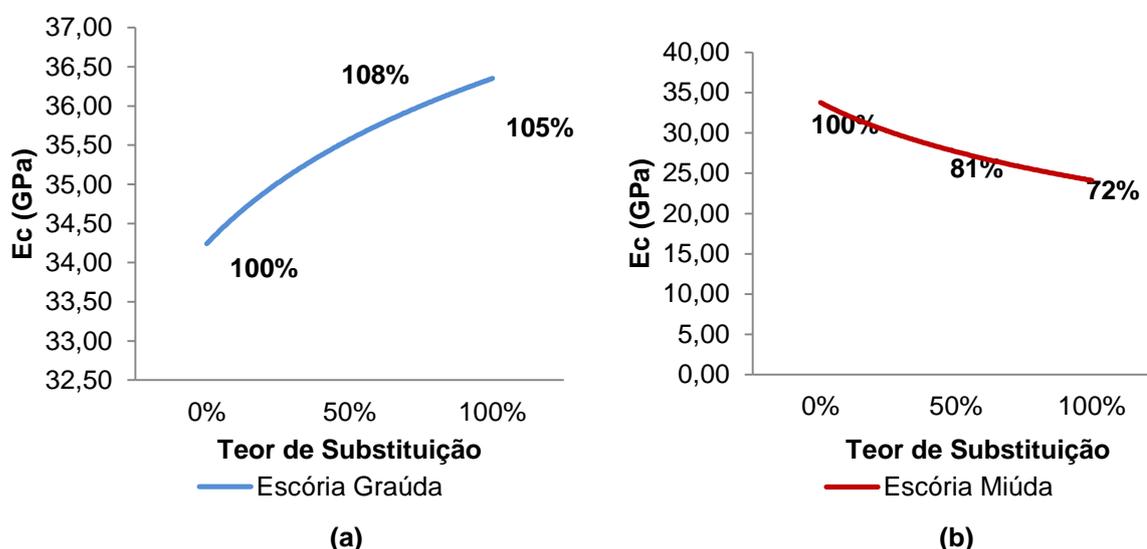
Para Leite (2001), este comportamento ocorre porque quanto maior for à relação a/c menor será a quantidade de cimento nas misturas para se combinar com a água existente. Dessa forma, aumenta-se a porosidade do concreto e, conseqüentemente, diminui o módulo de elasticidade.

Valois & Cassa (1995), avaliando o módulo de elasticidade de concretos de elevado desempenho com agregado de escória britada, também constataram a significância desta variável e obtiveram um comportamento semelhante.

## b) Efeito da adição de escória de alto-forno no módulo de elasticidade do concreto.

São apresentados nas Figuras 5.11a e 5.11b o efeito isolado do teor de substituição da escória graúda de miúda, respectivamente, no módulo de elasticidade do concreto. Nestas figuras tem-se a contribuição para todos os teores de substituição estudados, obtidos no 28º dia de idade dos concretos, de relações a/c aproximadas, que novamente foram utilizadas, devido alterações desta variável por ocasião de algumas misturas.

**Figura 5.11 (a) e (b)** - Módulo de elasticidade em função do efeito isolado do teor de substituição de: (a) escória graúda. (b) escória miúda.



Ao contrário do que vêm ocorrendo nas demais variáveis de resposta, os gráficos demonstram tendências de comportamentos diferenciados dentro da mesma propriedade, para a escória graúda até 50% de substituição, o módulo apresentou um ligeiro crescimento, ao contrário do que ocorreu para a escória miúda, onde todos os teores avaliados exerceram influência negativa sobre o módulo.

Da mesma forma como ocorreu nas outras propriedades, à avaliação do efeito puro do teor é um pouco dificultada pelo aumento da relação a/c, sobretudo na escória miúda que possui uma quantidade considerável de teor de finos, aumentando assim o poder de absorção de água e prejudicando o módulo, pois conforme a bibliografia (Metha & Monteiro, 2008) quanto maior a relação a/c, menor módulo. No entanto, mesmo sob a influência da relação a/c, ainda assim é possível

perceber que o agregado de escória não contribuiu para a melhoria do módulo de elasticidade dos concretos com este resíduo. Possivelmente os agregados de escória possuem uma rigidez menor que agregados naturais, não sendo assim capazes restringir a deformação na matriz, aumentarem a rigidez do composto e conseqüentemente o módulo de elasticidade, acredita-se que o ligeiro aumento ocorrido com 50% de substituição deva-se em sua maior parte a presença do seixo na mistura, comportamento que não ocorreu quando esse percentual foi pra 100%, onde observa-se a diminuição no valor do módulo.

De acordo com Prado (2006), a influência do agregado no módulo de elasticidade só pode ser percebida em idades mais avançadas, uma vez que em idades mais baixas a pasta exerce grande influência sobre o módulo e, à medida que a pasta vai ganhando resistência, os esforços vão sendo transferidos para os agregados que serão os maiores responsáveis pelo valor do módulo de elasticidade. No caso dos agregados com escória o prejuízo nos valores do módulo com a substituição, demonstram a fragilidade desse agregado frente as solicitações.

Na comparação com outros trabalhos, os resultados diferem dos encontrados nesta pesquisa. Arrivabene (2000) constatou que os concretos contendo escória apresentaram para todas as idades maiores valores de módulo de deformação quando comparados com o de referência. Esta melhoria pode ser explicada devido a fatores como: microestrutura mais densa da pasta de cimento hidratada (Neville, 1997), maior aderência pasta-agregado, eventual hidratação superficial da escória granulada utilizada como agregado miúdo (SCANDIUZZI et al,1990) e devido a melhorias que a escória bruta britada, utilizada como agregado graúdo, pode produzir quando atua no sentido de favorecer a união mecânica entre a pasta e o agregado.

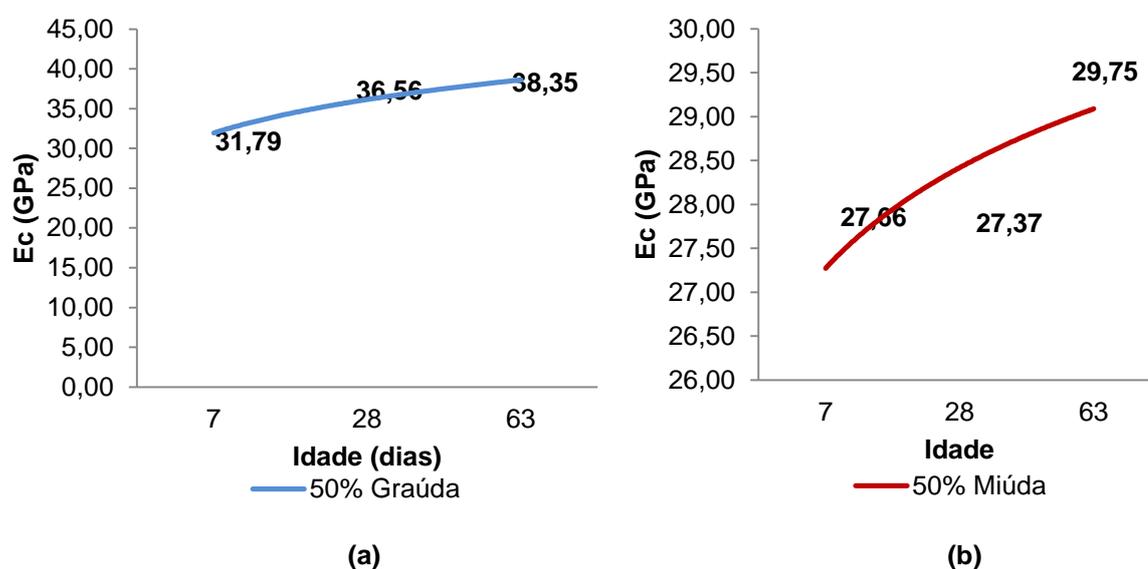
Silva (2006), ao avaliar o desempenho de concreto contendo agregado graúdo de escória de ferro-cromo aos produzidos com agregado graúdo convencional (brita), verificou comportamentos compatíveis ao apresentarem níveis de módulo de elasticidade equivalente.

Silva (2003), em seu estudo do módulo de elasticidade tangente inicial de concretos da região de Goiânia, observou que o módulo de elasticidade do concreto variou diretamente com o módulo do agregado graúdo, apresentando valores mais elevados para o basalto, seguido do calcário e por último o seixo.

### c) Efeito da idade no módulo de elasticidade do concreto.

Nas Figuras 5.12a e 5.12b, tem-se os gráficos de tendência do comportamento do efeito isolado da idade de rompimento em concretos com escória graúda e miúda, respectivamente, no módulo de elasticidade do concreto. No gráfico da Figura 5.12a fixou-se a relação a/c em 0,49 para todas as idades estudadas no concreto com 50% de substituição de escória graúda. No gráfico da Figura 5.12b, fixou-se a relação a/c em 0,54 em todas as idades, para o concreto com 50% de substituição de escória miúda.

**Figura 5.12 (a) e (b)** – Módulo de elasticidade em função do efeito isolado da idade em concretos com: (a) escória graúda. (b) escória miúda.



Os resultados do efeito da idade mostram-se coerentes com o que acontece nos concretos com agregados naturais, crescimento do módulo com a idade, que é um comportamento esperado, pois como sabe-se o concreto adquire rigidez com o processo de hidratação continuada que ocorre ao longo das idades.

Percebe-se novamente que em ambas as situações o crescimento ocorreu de maneira mais acentuada entre zero e sete dias, após esse período os concretos com escória miúda apresentaram crescimento de 8%, enquanto que os com escória graúda apresentaram crescimento de 21%. Os concretos contendo escória graúda apresentaram uma maior capacidade de absorção de carga para uma menor deformação, uma possível causa para este ganho pode ter sido as características do

agregado, como sua superfície áspera e irregular, que podem ter provocado a retenção das partículas de cimento na sua superfície resultando numa boa aderência entre agregado e pasta, e com isso melhorando as características da zona de transição ao longo das idades. O aumento da porosidade como consequência de uma maior relação a/c pode ter influenciado no resultado dos concretos com escória miúda, que apesar de também apresentarem tendência de crescimento com a idade, seus resultados foram inferiores.

Silva (2011) estudou as propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes agregados reciclados, os resultados mostraram que independente do agregado graúdo utilizado o módulo de elasticidade aumentou com a idade.

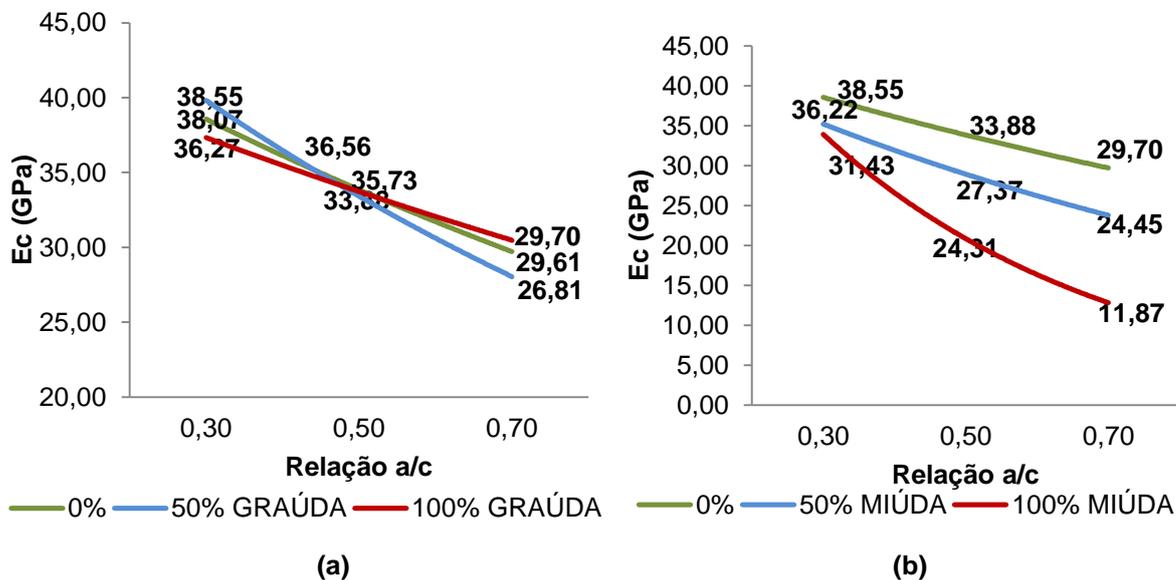
Almeida (2012), ao analisar o módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento portland, constatou um crescimento proporcional de ambos em relação à idade.

**d) Efeito da adição de escória de alto-forno em função da relação a/c, no módulo de elasticidade do concreto.**

Para a verificação desta interação no módulo de elasticidade, adotou-se os três valores do módulo obtidos ao 28<sup>o</sup> dia em cada concreto. Os gráficos obtidos para cada substituição estão colocados na Figura 5.13 (a) e (b).

**Figura 5.13 (a) e (b)** – Módulo de elasticidade em função da interação teor de substituição:

(a) - (escória graúda) x relação a/c. (b) – (escória miúda) x relação a/c.



Nesta interação diferentemente do comportamento que se esperava o agregado não apresentou influência sobre o módulo de elasticidade dos concretos, sendo a relação a/c o fator decisivo para o comportamento apresentando.

O aumento da relação a/c gerou prejuízos nos valores do módulo tanto para os concretos produzidos com agregados naturais, quanto para os produzidos com escória. Para Leite (2001), este comportamento ocorre porque quanto maior for à relação a/c menor será a quantidade de cimento nas misturas para se combinar com a água existente. Dessa forma, aumenta-se a porosidade do concreto e, conseqüentemente, diminui o módulo de elasticidade. Nos concretos com escória miúda, essa perda foi mais acentuada à medida que ocorreu o aumento do teor substituição, atribui-se a este a quantidade de finos presentes nessa escória que demandou um aumento da relação a/c.

MELO Neto e Helene (2002) analisaram a influência do teor de agregados no módulo de elasticidade em concretos convencionais. Os autores constataram uma diminuição no módulo de elasticidade com o aumento do teor de agregados para os traços com abatimento constante. A explicação dos autores é que o aumento da quantidade de agregados tem seu efeito positivo prejudicado pelo aumento do fator a/c para manter um abatimento constante, o que resultará em uma pasta de cimento

mais fraca, diminuindo assim o módulo de elasticidade. Porém, na situação inversa, mantendo-se o fator a/c constante e aumentando-se o teor de agregados graúdos, ocorre um aumento do módulo em razão da maior quantidade de agregados graúdos, que possuem um módulo de elasticidade maior do que o da pasta.

Silva (2003), em estudo do módulo de elasticidade tangente inicial de concretos da região de Goiânia variou a relação água/cimento para três tipos de agregados graúdos: calcário, seixo e basalto. A pesquisa mostrou que existe uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da relação água/cimento. O módulo de elasticidade do concreto variou diretamente com o módulo de elasticidade do agregado graúdo, apresentando valores mais elevados para o basalto, seguido do calcário e por último o seixo.

Tenório (2007), avaliou a influência da relação a/c sobre o módulo de elasticidade do concreto. Sua pesquisa relacionou três fatores a/c (0,67;0,5;0,4) com três tipos de agregados graúdos, sendo um natural de origem granítica para o concreto de referência e outros dois obtidos do beneficiamento de resíduos de construção e demolição, o autor constatou que com a diminuição da relação houve um acréscimo no módulo de elasticidade, conclusões também alcançadas no presente estudo.

No caso da escória graúda, os concretos apresentaram comportamentos muito próximos ao de referência (chegando a se sobrepor), com resultados ligeiramente superiores dos concretos com escória em pontos isolados, atribui-se este comportamento a uma possível variação durante o processo de execução do ensaio.

A comparação dos resultados obtidos com os resultados de outros trabalhos que focalizaram o uso da escória de alto-forno como agregados para concretos, fica dificultada pela quase inexistência de trabalhos que abordem esta interação em relação ao módulo de elasticidade.

## 6 CONCLUSÕES

### 6.1 Considerações finais

Com a finalização deste trabalho pode-se verificar que o mesmo atingiu o objetivo principal desta pesquisa, visto que, ele pode avaliar os concretos utilizando escória de alto-forno como agregados sob o ponto de vista do desempenho mecânico, ou seja, avaliou-se a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade dos concretos produzidos com este tipo de resíduo. Além do objetivo principal conseguiu-se alcançar os objetivos específicos aqui propostos, tais como: verificou-se as diferenças nas propriedades dos concretos com diferentes teores de escória graúda e miúda; avaliou-se a influência desses teores na trabalhabilidade do concreto; analisou-se a influência que a relação a/c, idade e teor de substituição exerceram sobre as propriedades estudadas, e por fim, com os resultados obtidos conseguiu-se fornecer uma ferramenta, de tal maneira que possa minimizar os impactos que o despejo deste resíduo possa causar ao meio ambiente. Com a obtenção dos objetivos propostos pelo trabalho pode-se chegar a algumas conclusões referentes aos ensaios realizados, conforme colocado abaixo:

#### 6.1.1 Em relação à resistência à compressão

- a) O efeito da relação a/c encontra-se dentro do esperado, os comportamentos de todos os concretos seguiram a Lei de Abrams.
- b) Na verificação do efeito isolado do teor de substituição do seixo e da areia pela escória de alto-forno, constatou-se que, embora a visualização isolada deste tenha sido um pouco dificultada pela influência da relação a/c, ainda assim foi possível verificar que os teores aqui empregados não contribuíram para o aumento da resistência à compressão axial. Esse efeito apresentou-se muito significativo na resistência à compressão.
- c) O efeito isolado da idade de rompimento não foi tão significativo nos concretos com escória, com grande parte do crescimento entre zero e sete dias, após esse período os resultados não foram tão significativos ou até mesmo inexistentes, conclui-se que, os agregados de escória não contribuíram para o ganho de resistência ao longo das idades.

- d) Na interação da relação  $a/c$  com o teor de substituição, verificou-se que para todas as relações  $a/c$  estudadas, nenhum dos concretos com escória conseguiu superar o de referência, apresentando desempenho inferior até mesmo nas menores relações  $a/c$ , fato que demonstra a maior fragilidade dos agregados de escória em relação aos agregados naturais. Esta interação apresentou-se como um dos parâmetros de maior significância na variável de resposta.
- e) Na interação da idade com teor de substituição ocorreram alguns comportamentos inesperados, que foram atribuídos a variações durante o processo de execução do ensaio. Contudo, foi possível observar-se que nas menores idades o efeito do agregado de escória aparentemente foi menor, enquanto que nas maiores idades este efeito foi mais significativo.

#### **6.1.2 Em relação à resistência à tração por compressão diametral**

- a) O efeito da relação  $a/c$  encontra-se dentro do esperado, houve uma diminuição à medida que a relação  $a/c$  aumentou.
- b) Na verificação do efeito isolado do teor de substituição, assim como na resistência à compressão, a inserção de escória provavelmente contribuiu para a diminuição da resistência, embora novamente a relação  $a/c$  tenha gerado certa dificuldade para a visualização do efeito puro. Nesta propriedade a diminuição da resistência foi maior que na resistência à compressão axial. Constatou-se uma grande significância deste efeito.
- c) No efeito da idade embora novamente tenha ocorrido um comportamento inesperado dentro de uma propriedade, atribuído à variação no processo de execução do ensaio, ainda assim foi possível verificar que os agregados de escória não contribuíram de modo significativo para o aumento da resistência ao longo das idades.
- d) A interação da relação  $a/c$  com o teor de substituição apresentou o mesmo comportamento observado na resistência à compressão axial, mesmo nas menores relações  $a/c$  os concretos com escória apresentaram desempenho inferior, ratificando assim sua inferioridade em relação ao seixo e areia. Esta interação coloca-se entre os parâmetros que mais contribuíram na resistência à compressão diametral.

### 6.1.3 Em relação ao módulo de elasticidade

- a) O efeito da relação a/c esteve dentro do esperado, diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da relação a/c.
- b) Na verificação do efeito isolado do teor de substituição, teve-se um comportamento diferenciado do que ocorreu nas demais propriedades, os gráficos apresentaram tendências de comportamentos distintos. E embora novamente a relação a/c tenha gerado certa dificuldade para a visualização do efeito puro, ainda assim é possível perceber que o agregado de escória não contribuiu para a melhoria do módulo de elasticidade dos concretos com este resíduo, sendo grande parte do ligeiro aumento no módulo com 50% de substituição de escória graúda atribuído ao seixo presente no concreto.
- c) O efeito da idade apresentou o comportamento esperado, crescimento proporcional com o tempo, os concretos com escória graúda tiveram um desempenho mais expressivo, fato atribuído as características do agregado, enquanto que nos concretos com escória miúda o aumento da relação a/c pode ter contribuído para os resultados inferiores.
- d) Na interação da relação a/c com o teor de substituição, diferentemente do comportamento que se esperava o agregado não apresentou influência sobre o módulo, sendo a relação a/c o fator decisivo para o comportamento apresentando.

Em síntese, pode-se dizer que a utilização de escória de alto-forno como substituição aos agregados naturais, nos teores empregados nesta pesquisa, não proporcionaram melhorias nas propriedades mecânicas avaliadas. Ressalta-se que, as conclusões apresentadas referem-se apenas aos resultados obtidos com concretos produzidos com os tipos, quantidades, características específicas dos materiais, e técnicas de execução utilizadas no trabalho. Sua representatividade deve ser confirmada através da execução de novas pesquisas que apresentem resultados que possam complementá-las e confirmá-las, uma vez que, a utilização da escória de alto-forno como agregados para concreto apresenta-se como uma grande alternativa, tanto na possibilidade de redução do consumo dos agregados naturais, como na diminuição do acúmulo desse resíduo nas siderúrgicas.

## 6.2 Sugestões para futuras pesquisas

Considerando a quantidade significativa de geração de escórias de alto-forno pelas siderúrgicas e o excedente estocado em pátios de armazenamento, cabe continuar investigando suas possibilidades de aplicação, sobretudo com o intuito de consolidar e melhorar o desempenho de seu emprego como agregados para concreto. Assim sendo, são feitas a seguir algumas propostas de trabalhos para futuras pesquisas:

- a) Avaliação das propriedades mecânicas de concretos com teores de substituição diferentes dos utilizados neste trabalho, como por exemplo, 10%, 20% e 30%.
- b) Analisar propriedades referentes à durabilidade de concretos produzidos com escória de alto-forno como agregados graúdos e miúdos, focando em aspectos como: permeabilidade à água e aos gases, ataque por sulfatos, carbonatação, resistência à penetração de cloretos e reação álcali-agregado;
- c) Realizar um estudo mais completo sobre o comportamento da interface pasta-agregado escória;
- d) Fazer um estudo mais detalhado do agregado de escória, realizando análises microestruturais por meio de difratometria de raios-x, MEV, e PIM, visando quantificar as fases formadas e compreender a influência do teor de impurezas;
- e) Avaliar de maneira isolada o uso da escória como agregado graúdo e como agregado miúdo para concretos;
- f) Determinação da relação custo x benefício para a utilização da escória de alto-forno a carvão vegetal como substituição aos agregados naturais (areia e seixo) no concreto.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, S. M. “**Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento portland através de ensaios de compressão simples de frequência ressonante**”. 2012. 103f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

ARRIVABENE, L.F. “**Uma contribuição ao estudo de utilização da escória de alto-forno bruta e granulada para a produção de concretos**”. 2000. 34f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2000.

ARUNTAS, H.Y., GURU, M., DAYI, M., TEKIN, I. (2010) - Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. *Materials and Design*, Volume 31, Issue 8, pp. 4039-4042.

ASTM C/150: standard specification for portland cement. Disponível em: < [www.astm.org/Standards/C150.htm](http://www.astm.org/Standards/C150.htm)>. Acesso em: Em cache Similares Acesso em: 5 mar.2011.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL - ANEPAC **Agregados para a construção civil no Brasil**: Comissão de Serviços de Infraestrutura do Senado Federal. Brasília, DF, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: cimento portland composto. Rio de Janeiro, 1991. Versão corrigida 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 5735: cimento portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 18**: cimento Portland: análise química: determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 15**: cimento Portland: análise química: determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 14**: 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. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 16**: cimento Portland: análise química: determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 17**: cimento Portland: análise química: método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 12**: cimento Portland: análise química: determinação de óxido de cálcio livre. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 11579**: cimento Portland: determinação da finura por meio da peneira (nº200): Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 76**: Cimento Portland: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 65**: cimento Portland: determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: agregados: - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67**: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: concreto: ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**: concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

BARATA, M. S; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação preliminar do resíduo caulínico das indústrias de beneficiamento de caulim como matéria-prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa. Ambiente **Construído**, Porto Alegre: ANTAC, v. 2, n. 1, p. 69-78, jan./mar. 2002.

BARBOSA, M.T.G. **Análise crítica de materiais alternativos empregados na construção civil**. Argentina, 2004. Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural.

BARIN, D.S. **Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento Portland branco com altos teores de adição de escória de alto-forno e ativador químico**. 35 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria,RS, 2008.

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

BELACHIA, M., HEBHOUB, H. (2011) – Use of the marble wastes in the hydraulic concrete. 6th **International Advanced Technologies Symposium**, Elazig, Turkey.

BOUDERAU, L. The Agenda 21 on Sustainable Construction. **Construction & Environment**, São Paulo, 23 - 24, nov. 2000.

BOURGUIGNON, K.M.B.G.; SILVA, M.G.; SANTOS, F.L.S.; ZANDONADE, E. A carbonatação de concretos com adição de escória granulada de alto-forno na betoneira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO IBRACON, 43. **Anais...** [S. l.], 2005.

BRASIL. **Ministério de Minas e Energia**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/mme>>. Acesso em: 15 jul. 2010.

BINICI, H.; KAPLAN, H.; YILMAZ, S. Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. **Scientific Research and Essay**, Volume 2, Issue 9, pp. 372-379. 2007

BRITO, J.O.; LACLAU, J.P.; RIOM, M.; QUIRINO,W.F. Le charbon de bois au Brésil. **Bois et Forêts des Tropiques**, Paris, v.2, n.288, p.58-59. 2006.

CAMPOS, A.C.M. **Carvão de Eucalyptus**: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR. Lavras, 2008. 09 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2008.

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

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

CARRIJO, P.M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 1986. V. 2.

CINCOTTO, M.A.; JOHN, V.M. Cimento alternativo à base de escória de alto-forno, **Revista Construção São Paulo**, n.2204, p. 19-22, 1990. (Encarte técnico IPT/PINI-009).

CINCOTTO, M.A.; AGOPYAN, V. Novos empregos da escória de alto-forno: estudos realizados no Brasil, Buenos Aires. In: SEMINÁRIO LATINO AMERICANO SOBRE UTILIZACIÓN DE ESCORIAS DE ALTOS HORNOS EM LA CONSTRUCCIÓN., 1991. [S. l.]. **Anais...** [S. l.: s.n], 1991. p.256-276..

CINCOTTO, M.A.; BATTAGIN, A.F.; AGOPYAN, V. Caracterização da escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado miúdo. **Boletim 65**. São Paulo, 1992,IPT.

COELHO, M.A.M. **Contribuição ao estudo da carbonatação e da retração em concretos com elevados teores de escória de alto-forno**. 2002. 40 f. Dissertação. (Mestrado Engenharia Civil), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.

COELHO, M.A.M.; SILVA, M.G.; SOUZA, F.L.S.; SARMENTO, R.; FRASSON, R.P.M.; PINHEIRO, S.M.; ZANDONADE, E.; MORIMOTO, T. Avaliação de concreto de cimento de escória de alto-forno e com escória de alto-forno como agregado. **Revista IBRACON de materiais**, v. 1, n.1. p. 08, 2004.

CONSTRUBUSINESS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO (9ª EDIÇÃO) BRASIL 2022: planejar, construir, crescer. Segundo Seminário da Indústria Brasileira de Construção, 2010, São Paulo. **Anais...** São Paulo: FIESP; CIESP, 2010.

DAL MOLIN, D.C.C.; GEYER, R.M.T; VILELA, A.C.F. Caracterização e aplicações das escórias siderúrgicas na indústria da construção civil.In: ENCONTRO REGIONAL MEIO AMBIENTE NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA: Seminário Gestão e Qualidade Ambiental na Siderurgia 5.,1995, Vitória, **Anais...** Vitória: ILAFA; IBS, 1995.13 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL- DNPM. Sumário Mineral- Edições- 2001 a 2008.

DIMSON, B. Principles and challenges of sustainable design and construction. **Industry and Environment Magazine**. France, v. 19, n. 2, apr./jun. 1996.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO PARÁ - FIEPA. Disponível em: <<http://www.fiepa.org.br>>. Acesso em: 12. jun.2010.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS PROJETOS. **Perfil da cadeia produtiva da construção civil e da indústria de materiais**. Rio de Janeiro: ABRAMAT, 2007. 16 p.

GONÇALVES, J P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para a produção de concretos**. 2000. 120 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

HABITAT ET AL. 2010 Disponível em< <http://www.onuhabitat.org/>>. Acesso em: 05 mar.2012.

HEBHOUB, H.; AOUN, H.; BELACHIA, M.; HOUARI, H.; GHORBEL, E. Use of waste marble aggregates in concrete. **Construction and Building Materials**, Volume 25, Issue 3, pp. 1167- 1171. 2011

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1995.

IBGE. **A economia brasileira no 3º trimestre de 2010**: visão geral. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso em: 7 fev.2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA - IBS. Disponível em: <<http://www.ibs.org.br>>. Acesso em: 10 jun.2010.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Política para a madeira energética**: por uma política para a madeira energética e o carvão vegetal. [S.l.:s.n.], 2006. p.15.

INVESTIMENTOS E NOTÍCIAS. Disponível em: <<http://www.investimentosenoticias.com.br>>. Acesso em: 17 jan. 2012.

IWATA, Mamoru; HISAMATSU, Yuji; DOHNOMAE, Hitoshi. Environmental Burden Reduction in Building Life Cycle. In: **Integrated life cycle design of materials and structures**. Finland: A. Sarja, 2000, p. 512-516. (International Symposium).

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

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo, 2000. 102 f. Tese (Doutorado livre docência)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

JOHN, V.M.; SILVA, M.G. Cinzas e aglomerantes alternativos. **Revista Ambiente Construído**, São Paulo, v.1, n.2, p. 37-44, 1998.

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.

JOHN, V. M.; SILVA, V. G; AGOPYAN, V. Agenda 21: uma proposta de discussão para o construbusiness brasileiro. In: ENCONTRO NACIONAL E ENCONTRO LATINO AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 1., 2001, Canela. **Anais...** Canela: ANTAC-2001.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290 f. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

LIPPIATT, B. BEES. **Building for Environmental and Economic Sustainability**. Technical manual and user guide. NIST national Institute Standards and Technology – U. S. Department of commerce technology administration. NISTIR 6144. U. S. 1998.

LIPPIATT, Barbara, C.; NORRIS, Gregory, A. **Selecting Environmentally and Economically Balanced Building Materials**. In: Second International Green Building Conference and Exposition, A. H. Fanney, K. M. Whitter; T. B. Cohn, (Ed.) **National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg**, 1995, p. 38-46. Disponível em: <<http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build95/PDF/b95087.pdf>>. Acesso em: 3 jun. 2010.

LITTLE, A.D.; SETEPLA. **Tecnometal Engenharia Ltda**: estudo sobre aplicações de escórias siderúrgicas no Brasil e em outros oito países. Sumário Executivo preparado para o Instituto Brasileiro de Siderurgia - IBS e Empresas Siderúrgicas Associadas, [S.l.: s.n.], 1999.

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.

MASSUCATO, C.J. **Utilização de escória de alto-forno à carvão vegetal como adição no concreto**. 2005. 17f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MAYFIELD, B.; LOUATI, M. Properties of pelletized blast furnace slag concrete. **Magazine of Concrete Research**, n. 150, v. 42, 8 p. 1990.

MELLO, M.; BARROS, A.S.; SOUZA, C.S.; NOVAES, D.S.; MIRANDA, D.A.; BOCKHORNY, J.A.; BRUNES, J.L.P.; MEDEIROS, L.G.; SANTOS, L.M.; PAES, M.F.; MONTEIRO, R.S.; FIGUEIREDO, R.S. **Feira da indústria**: norma regulamentadora 14: fornos- escola técnica do Rio de Janeiro, 2010.

MELO NETO, A. A.; HELENE, P. R.L. Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2002.

MENÉNDEZ, G.; BONAVETTI, E.F.; IRASSAR, E. Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, n.1, p.61-67, jan. 2003.

METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEYER, C. The us Concrete Industry and Sustainable Development Department of Civil Engineering And Engineering Mechanics Columbia University, New York, NY In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 7., 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Ct-207, 2006.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. Disponível em <http://www.mme.gov.br/mme>. Acesso em: 15 jul.2010.

MORAES, R.C.; ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G. Efeitos da cinza de casca de arroz e fíler calcário sobre a resistência mecânica do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43, 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2000.

MOURA, W.A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. 2000. 37 f. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

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**. 2ª ed. São Paulo: PINI, 1997.

OLIVEIRA, V. M. **Estudo da porosidade de pelotas de minério de ferro para altos-fornos através de adsorção física**. 2010. 08 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

**PARA a Construção Sustentável da Agenda 21**. Tradução do Relatório CIB: publicação 237. [S. l.: s. n.], p. 17, nov. 2000.

PASTORE, J. **Empregos na Infra-Estrutura: potencial e barreiras**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1998.

PELÁEZ-SAMANIEGO, M. R.; M.R.; GARCIA-PEREZ, M.; CORTEZ, L.B.; ROSILLO- CALLE, F.; MESA, J. Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.12, n.4, p.1063-1086, 2008.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia: fonte FGV, 2011.

\_\_\_\_\_. Certificação Digital Nº 0511101/CA. Disponível em: [www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/11326/11326\\_5.PDF](http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/11326/11326_5.PDF).> Acesso em: 25 fev. 2012.

PRADO, L. A. **Módulo de deformação estático do concreto de baixa e alta relação A/C pelo método ultra – sônico**. 2006. 226 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás. Goiás, 2006.

PROGRAMA de educação tutorial em Engenharia Civil. Disponível em: <<http://blogdopetcivil.com/2012/05/23/visita-tecnica-arcelormittal-parte-1/>>. Acesso em: 28 fev. 2011.

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.

RAMADAN, J.T. **Contribuição ao desenvolvimento de especificações por desempenho para concretos com escória de alto-forno.** 2010. 131f. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2010.

REIS, F.J.L. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados provenientes de cerâmicas vermelhas com diferentes taxas de pré-saturação.** 2013. 84f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Pará. Belém, 2013.

ROSA, J. J. **Utilização de escória de alto-forno como adição em argamassa colante tipo AC-I.** 2009. 01f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia-PIPE), Universidade Federal do Paraná. Paraná, 2009.

ROSA, D.W. **Resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de escória de alto-forno e ativador químico.** 2005. 45 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil, Área de concentração em Materiais de Construção), Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2005.

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.

SANTOS, D. N. **Extração de areia e a dinâmica sedimentar no alto curso do Rio Paraná na região de Porto Rico, PR,** 2008. 87f. Dissertação (Mestrado em Análise Geoambiental), Universidade Guarulhos. Guarulhos, 2008.

SCA. Slag Cement Association. Disponível em: <<http://www.slagcement.org/shared>>. Acesso em: 19.dez.2010.

SCANDIUZZI, L.; BATTAGIN, A.F. A utilização da escória granulada de alto-forno como agregado miúdo. **Boletim da ABCP**, São Paulo, n. 33, 1990.

SCHINDLER, A. Heat of hidration models for cementitious materials. **ACI Materials Journal** ,v.102, n. 1, p. 24-33., 2005.

SILVA, A.S.R. **“Avaliação do desempenho de concreto contendo agregado graúdo de escória de ferro-cromo”.** 2006. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2006.

SILVA, D.C.; BRITO, J. Desempenho em termos mecânicos de betões com incorporação de agregados finos provenientes de resíduos da indústria do mármore. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.20, p. 51-59, 2012.

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.

SILVA, K.A.N. **Estudo de propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes agregados reciclados**. 2011. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Alagoas. Macéio, 2011.

SILVA, K.J. **Estudo do comportamento do módulo de deformação de concretos, com um ano de idade, produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Coordenação da área de Construção Civil, Centro Federal de Educação Tecnológico de Goiás. Goiânia, 2003.

SILVA, M. G. **Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimento de escória**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

SINDICATO DAS INDÚSTRIAS DO FERRO - SINDIFER. **Produção de ferro gusa no Brasil**. Disponível em: <<http://www.sindfer.com.br>>. Acesso em: 3 maio 2009.

SINDICATO DAS INDÚSTRIAS DE FERRO GUSA DO ESTADO DO PARÁ - SINDIFERPA. Disponível em: <<http://www.sindiferpa.com.br>>. Acesso em: 02 ago.2010.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO-SINDUSCON-SP. 2009. Informativo Eletrônico. Disponível em: <[www.sindusconsp.com.br](http://www.sindusconsp.com.br)>. Acesso em: 2 jan.2012.

SJÖSTRÖM, C. **Durability and sustainable use of building materials**. In.: **Sustainable use of materials**. J.W.Llewellyn&H.Davies Ed..London, BRE/RILEM, 1992.

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, C. S. **Análise energética do processo de produção de ferro gusa em altos-fornos**: Identificação de oportunidades em redução de emissões de gases de efeito estufa. Aracruz, 2010. 41f. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia Ambiental), Faculdade de Aracruz. Aracruz , 2010.

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...**Goiania, 2006.

TENÓRIO, J.J.L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção demolição visando aplicações estruturais**. 2007.138 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

UHLIG, A.; GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. O uso do carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto nas mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Energia**, São Paulo, v.14, n.2, p.67-85, 2008.

VALOIS, J.G.C.; CASSA, J.C.S. Avaliação do módulo de elasticidade de concreto de elevado desempenho com agregado de escória britada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 37, 1995, Salvador. **Anais...** Salvador, 1995.

VOGT, J.C. **Estudo da influência de adições no módulo de elasticidade dinâmico, na resistência à fadiga e na tenacidade à fratura para concretos convencionais**. 2006. 21f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.