

**ESCÓRIA GRANULADA DE FUNDIÇÃO UTILIZADA COMO
SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO EM CONCRETOS:
AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES RELACIONADAS COM A
DURABILIDADE**

Juliana Soares Reschke

Porto Alegre
novembro 2003

JULIANA SOARES RESCHKE

**ESCÓRIA GRANULADA DE FUNDIÇÃO UTILIZADA COMO
SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO EM CONCRETOS:
AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES RELACIONADAS COM A
DURABILIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre
novembro 2003

JULIANA SOARES RESCHKE

**ESCÓRIA GRANULADA DE FUNDIÇÃO UTILIZADA COMO
SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO EM CONCRETOS:
AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES RELACIONADAS COM A
DURABILIDADE**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 07 de novembro de 2003

Prof.a Ângela Borges Masuero
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
orientadora

Prof. Antonio Cezar Faria Vilela
Dr. Ing. pela Universidade Técnica de
Aachen, Alemanha
co-orientador

Prof. Américo Campos Filho
Coordenador do PPGE/UFGRS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Carlos Alberto Mendes Moraes (UNISINOS)
Ph.D. pela University of Manchester and Institute of Science and
Technology/UMIST/Inglaterra

Prof. Claudio de Souza Kazmierczak (UNISINOS)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Maria Luisa Martins (UCPEL)
Dra. pela Universidade Politécnica de Madrid

Prof.a Denise Carpena Coitinho Dal Molin (UFGRS)
Dra. pela Universidade de São Paulo

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Professora Ângela Borges Masuero pela orientação, pela dedicação e pela amizade ao longo deste trabalho.

Agradeço ao Professor Carlos Moraes e Professor Antônio C. F. Vilela, também orientadores deste trabalho, pelos ensinamentos e amizade.

À Professora Denise Dal Molin pelos ensinamentos ao longo de todo mestrado.

Agradeço ao Professor Fernando Recena pelas contribuições prestadas ao longo desta dissertação e, principalmente, pelos ensinamentos, incentivos e por sua amizade desde o período da minha graduação.

Agradeço à minha família, principalmente minha mãe, pelo apoio e dedicação que sempre estiveram presentes em todos os momentos da minha vida.

Ao Alexandre, pelo amor, apoio e companheirismo dedicados durante seis anos que estamos juntos.

Agradeço em especial à amiga Diana pelo companheirismo e amizade ao longo de todo o “nosso” projeto experimental. Pela dedicação, motivação e competência que ela demonstrou durante esta fase.

Às amigas Ana Paula, Dóris, Geilma, Ludmila, Águida e Marlova pela amizade e contribuições valiosas para este trabalho.

Aos colegas de mestrado Henrique, Dayana, Marcos, Ricardo, Rafael, Adriana, Leandro, Alexandre, Hilton, Daniel, Marco e Constance.

Aos laboratoristas Éderson, Airton, Fontes, Flávio e Teixerinha pelo auxílio no desenvolvimento dos trabalhos de laboratório.

Aos bolsistas de iniciação científica Márcio, Mário, Diego, Vanessa, Priscila, Valter, Francis e Lucas pelo auxílio nos experimentos e pela dedicação.

Agradeço à Empresa Becker pela gentileza e pelo material estudado neste trabalho.

Agradeço às Empresas Camargo Corrêa Industrial S.A. e Fosroc pelos materiais doados necessários para a realização dos experimentos.

Agradeço à Fundação Luiz Englert pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	19
1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA	20
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	21
2 IMPORTÂNCIA AMBIENTAL - RECICLAGEM	22
2.1 RESÍDUOS INDUSTRIAIS.....	22
2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS PELOS RESÍDUOS.....	23
3 INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO	31
3.1 FORNO CUBILÔ.....	35
3.1.1 Matérias-Primas para Fusão em Cubilô.....	38
3.1.1.1 Coque.....	39
3.1.1.2 Calcário.....	39
3.1.1.3 Ferro-gusa.....	40
3.1.1.4 Sucata de Aço.....	41
3.1.1.5 Ferroligas.....	41
3.2 ESCÓRIA DE FUNDIÇÃO.....	41
4 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	48

4.1 BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS	51
4.2 AGREGADOS EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS	52
4.3 AGREGADOS EM CONCRETOS.....	53
4.4 MATÉRIA-PRIMA PARA FABRICAÇÃO DE CIMENTO.....	55
4.4.1 Escória de alto-forno.....	55
4.4.2 Escória de aciaria.....	57
5 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETOS.....	59
5.1 DEFINIÇÃO DE DURABILIDADE E VIDA ÚTIL.....	59
5.2 AGENTES DE DEGRADAÇÃO DO CONCRETO	63
5.3 PROCESSO DE TRANSPORTE DE FLUIDOS	65
5.3.1 Absorção de Água por Sucção Capilar.....	67
5.3.2 Permeabilidade	69
5.3.3 Difusão de Íons	71
5.3.4 Migração de Íons	73
5.4 DURABILIDADE DE CONCRETOS COM ESCÓRIAS.....	74
6 PROGRAMA EXPERIMENTAL	78
6.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA	78
6.2 ESCOLHA DOS FATORES CONTROLÁVEIS	79
6.3 METODOLOGIA	80
6.3.1 Amostragem da Escória Granulada de Fundição (EGF).....	80
6.3.2 Beneficiamento da Escória Granulada de Fundição (EGF).....	81
6.3.3 Materiais utilizados	83
6.3.3.1 Cimento	83
6.3.3.2 Escória Granulada de Fundição (EGF).....	84
6.3.3.2.1 Caracterização física.....	84
6.3.3.2.2 Caracterização química e estrutural.....	85

6.3.3.2.3 <i>Caracterização ambiental</i>	90
6.3.3.2.4 <i>Índice de atividade pozolânica</i>	91
6.3.3.3 Agregados	92
6.3.4 Curva de Dosagem	93
6.3.5 Proporcionamento dos Materiais	95
6.3.6 Moldagem, Adensamento e Cura	98
6.3.7 Ensaio	98
6.3.7.1 Absorção de Água por Sucção Capilar	99
6.3.7.2 Penetração de Íons Cloretos	102
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	106
7.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR SUCCÃO CAPILAR.....	107
7.1.1 Efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a taxa de absorção	110
7.1.2 Efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a taxa de absorção.....	111
7.1.3 Efeito da interação da relação água/aglomerante e do teor de substituição de cimento por EGF sobre a taxa de absorção.....	114
7.2 PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO.....	121
7.2.1 Efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a penetração de cloretos.....	124
7.2.2 Efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a penetração de cloretos.....	125
7.2.3 Efeito da interação da relação água/aglomerante e do teor de substituição de cimento por EGF sobre a penetração de cloretos.....	127
8 CONCLUSÕES	133
8.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR SUCCÃO CAPILAR DOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM EGF	133
8.2 PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETOS DOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM EGF	134
9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	135

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
ANEXOS	145
ANEXO 1: distribuição granulométrica da escória granulada de fundição moída nos tempos de 40, 60, 80, 100 e 120 minutos.....	146
ANEXO 2: distribuição granulométrica do cimento CP II-F 32.....	157
ANEXO 3: relatório de ensaio do grau de vitrificação da EGF realizado pela ABCP.....	160
ANEXO 4: classificação ambiental da EGF.....	162
ANEXO 5: ganho de massa ao longo do tempo no ensaio de sucção capilar – Método Kelham.....	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 produção de fundidos por região.....	32
Tabela 3.2 composição química dos ferros fundidos cinzentos.....	34
Tabela 3.3 composição química das escórias ácidas de fundição.....	43
Tabela 3.4 características das escórias de forno cubilô ácido ar frio.....	44
Tabela 6.1 composição química das amostras de EGF.....	80
Tabela 6.2 características físicas e químicas do cimento CP II-F 32.....	83
Tabela 6.3 composição granulométrica e características físicas da EGF não beneficiada.....	85
Tabela 6.4 características físicas da EGF beneficiada.....	85
Tabela 6.5 características químicas da EGF.....	86
Tabela 6.6 resultados obtidos nas análises de EDS da EGF não beneficiada.....	88
Tabela 6.7 resultados obtidos nas análises de EDS da EGF beneficiada.....	90
Tabela 6.8 resultado do ensaio de índice de atividade pozolânica.....	91
Tabela 6.9 composição granulométrica e características físicas da areia.....	92
Tabela 6.10 composição granulométrica e características físicas da brita...	93
Tabela 6.11 resultados do ajuste da curva de dosagem.....	94
Tabela 6.12 proporcionamento dos materiais em massa.....	96
Tabela 6.13 consumo de material aglomerante, EGF e cimento.....	97
Tabela 6.14 ingresso de íons cloreto baseado na carga passante (ASTM C 1202).....	105
Tabela 7.1 valores dos parâmetros B0, B1 e B2 e do R ² obtidos no SPSS	107
Tabela 7.2 valores obtidos e previstos para taxa de absorção.....	108
Tabela 7.3 resultados da análise de variância da taxa de absorção.....	109

Tabela 7.4	parâmetros dos fatores analisados para taxa de absorção.....	110
Tabela 7.5	resultados da taxa de absorção em função do efeito isolado da relação água/aglomerante.....	110
Tabela 7.6	resultados da taxa de absorção em função do efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF.....	112
Tabela 7.7	resultados da taxa de absorção em função do efeito da relação água/aglomerante e do teor de substituição de cimento por EGF.....	114
Tabela 7.8	resultados da taxa de absorção para os valores de resistência à compressão 20, 25, 30 e 35 MPa.....	117
Tabela 7.9	resultados dos consumos de cimento para níveis iguais de taxa de absorção dos concretos com e sem EGF.....	120
Tabela 7.10	valores dos parâmetros B0, B1 e B2 e do R ² obtidos no SPSS	121
Tabela 7.11	valores obtidos e previstos para penetração de cloretos.....	122
Tabela 7.12	resultados da análise de variância da penetração de cloretos...	123
Tabela 7.13	parâmetros dos fatores analisados para penetração de cloretos.....	124
Tabela 7.14	resultados da penetração de cloretos em função do efeito isolado da relação água/aglomerante.....	124
Tabela 7.15	resultados da penetração de cloretos em função do efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF.....	126
Tabela 7.16	resultados da penetração de cloretos em função do efeito da relação água/aglomerante e do teor de substituição de cimento por EGF.....	127
Tabela 7.17	resultados da penetração de cloretos para os valores de resistência à compressão 20, 25, 30 e 35 MPa.....	130
Tabela 7.18	resultados dos consumos de cimento para níveis iguais de penetração de cloretos dos concretos com e sem EGF.....	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	energia demandada por tonelada de cimento produzido (EHRENBERG e GEISELER, 2000).....	26
Figura 2.2	emissão de CO ₂ por tonelada de cimento produzido (EHRENBERG e GEISELER, 2000).....	27
Figura 2.3	comparação entre os materiais, consumo de energia e emissão de CO ₂ dos pavimentos (MROUEHT et al., 2001).....	28
Figura 3.1	produção de fundidos no Brasil (ABIFA, 2003).....	31
Figura 3.2	crescimento das exportações da indústria de fundição no Brasil (fonte: ABIFA, 2002).....	32
Figura 3.3	fluxograma básico do processamento de ferros fundidos (MORAES, 2000).....	33
Figura 3.4	representação esquemática do forno cubilô (PIESKE, 1980).....	37
Figura 3.5	representação esquemática da formação da escória no cadinho durante a fusão do metal (SIEGEL, 1982).....	42
Figura 3.6	força de corte dos materiais s (sem lubrificante), e (escória em pó), z (zinco em pó), c (cobre em pó) e o (CaO+Al ₂ O ₃ +SiO ₂) utilizados no corte de metais (UEHARA e SAKURAI, 1996)...	46
Figura 4.1	destinação das escórias de alto-forno (LOUZADA, 1991).....	50
Figura 4.2	destinação das escórias de aciaria LD (LOUZADA, 1991).....	51
Figura 5.1	modelo de vida útil para estruturas atacadas pela corrosão de armaduras (TUUTTI, 1982).....	61
Figura 5.2	vida útil de estruturas de concreto (MEHTA, 1994).....	62
Figura 5.3	representação esquemática dos mecanismos de transporte de íons cloreto no concreto (HELENE, 1993).....	66
Figura 6.1	vazamento da escória de fundição (a) e escória granulada de fundição após resfriamento (b).....	81
Figura 6.2	amostra de escória granulada de fundição não beneficiada (a) e moída durante 40 minutos (b).....	82

Figura 6.3 difração de Raios X da EGF.....	87
Figura 6.4 micrografia eletrônica de varredura – MEV – elétrons secundários (a) ampliação 30x (b) ampliação 60x (c) ampliação 500x (d) ampliação 2000x. Detalhe das áreas selecionadas para análise de EDS (1 e 2).....	88
Figura 6.5 micrografia eletrônica de varredura – MEV – elétrons secundários (a) ampliação 125x (b) ampliação 500x (c) ampliação 1000x (d) ampliação 2000x. Detalhe das áreas selecionadas para análise de EDS (3 e 4).....	89
Figura 6.6 diagrama de dosagem.....	95
Figura 6.7 aspecto das laterais do corpo-de-prova seladas com resina epóxi.....	100
Figura 6.8 aspecto da face superior coberta com a tampa de PVC.....	100
Figura 6.9 ensaio de absorção de água por sucção capilar.....	101
Figura 6.10 aspecto das laterais do corpo-de-prova seladas com resina epóxi.....	103
Figura 6.11 aspecto dos corpos-de-prova submetidos ao vácuo em um dessecador.....	103
Figura 6.12 ensaio de penetração de íons cloretos.....	104
Figura 7.1 curvas previstas pelo modelo matemático para taxa de absorção.....	109
Figura 7.2 efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a taxa de absorção para TE (30%).....	111
Figura 7.3 efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a taxa de absorção.....	112
Figura 7.4 efeito da interação da relação água/aglomerante e do teor de substituição de cimento por EGF sobre a taxa de absorção.....	114
Figura 7.5 comparação entre os efeitos das interações água/aglomerante e teor de substituição de cimento por EGF sobre a taxa de absorção em valores reais.....	115

Figura 7.6	comparação entre os efeitos das interações água/aglomerante e teor de substituição de cimento por EGF sobre a taxa de absorção em porcentagem.....	116
Figura 7.7	relação entre taxa de absorção e resistência à compressão para os concretos com e sem EGF, aos 28 dias.....	116
Figura 7.8	taxa de absorção para os valores de resistência à compressão 20, 25, 30 e 35 MPa.....	118
Figura 7.9	diagrama de dosagem dos concretos referência e com EGF, para idade de 28 dias (CECCATTO, 2003).....	119
Figura 7.10	consumo de cimento dos concretos referência e com EGF para níveis iguais de taxa de absorção.....	120
Figura 7.11	curvas previstas pelo modelo matemático para penetração de cloretos.....	123
Figura 7.12	efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a penetração de cloretos.....	125
Figura 7.13	efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a penetração de cloretos.....	126
Figura 7.14	efeito da interação da relação água/aglomerante e do teor de substituição de cimento por EGF sobre a penetração de cloretos.....	127
Figura 7.15	comparação entre os efeitos das interações água/aglomerante e teor de substituição de cimento por EGF sobre a penetração de cloretos em valores reais.....	128
Figura 7.16	comparação entre os efeitos das interações água/aglomerante e teor de substituição de cimento por EGF sobre a penetração de cloretos em porcentagem.....	128
Figura 7.17	relação entre penetração de cloretos e resistência à compressão para os concretos com e sem EGF, aos 28 dias.....	129
Figura 7.18	penetração de cloretos para os valores de resistência à compressão 20, 25, 30 e 35 MPa.....	131
Figura 7.19	consumo de cimento dos concretos referência e com EGF para níveis iguais de penetração de cloretos.....	132

RESUMO

RESCHKE, J. S. Escória Granulada de Fundição Utilizada como Substituição ao Cimento em Concretos: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Tendo em vista que a redução da geração de resíduos industriais é limitada, a reciclagem de resíduos tem sido praticada na tentativa de minimizar os danos causados pelos mesmos. Devido à grande quantidade de materiais consumidos, a indústria da construção civil mostra-se promissora para reciclagem de resíduos. Assim como vem sendo praticado com as escórias de alto-forno, esta pesquisa propõe a utilização da escória granulada de fundição, resíduo gerado no processo de fusão de ferro fundido via cubilô, como um material cimentante em concretos na construção civil. Ensaios de caracterização da escória apresentaram bons resultados para aplicação deste resíduo como substituição ao cimento, em termos de índice de pozolanicidade, grau de vitrificação, entre outros. Em razão de um grande número de estruturas de concreto armado necessitarem de intervenções, por não apresentarem um desempenho satisfatório em pouco tempo de uso, que a durabilidade das estruturas de concreto vem sendo amplamente estudada. Sendo assim, esta pesquisa avalia a durabilidade dos concretos com escória granulada de fundição, em termos de absorção de água por sucção capilar e penetração de íons cloreto. Foram estudados concretos contendo diferentes teores de substituição de cimento por escória granulada de fundição (0% - 10% - 30% - 50%), em volume, e relações água/aglomerante (0,40 - 0,55 - 0,70). Os resultados mostram que, para a mesma relação água/aglomerante, a substituição de cimento por escória granulada de fundição aumenta significativamente a taxa de absorção de água e não prejudica significativamente a penetração de íons cloreto. Entretanto, para um mesmo valor de resistência à compressão, a incorporação de escória granulada de fundição é viável tecnicamente, pois diminui a taxa de absorção e a penetração de cloretos.

Palavras-chave: escória granulada de fundição; material cimentante; durabilidade.

ABSTRACT

RESCHKE, J. S. Granulated Foundry Slag Used as Substitution to the Cement in Concretes: evaluation of properties related with the durability. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

As the reduction of the industrial solid waste generation is limited, its recycling has been practiced in the attempt to minimize the damages caused by it to the environment. Due to the great amount of consumed materials, the civil construction industry is a promising sector for recycling some industrial solid wastes. This research proposes the use of the granulated foundry slag, solid waste generated in the melting of cast iron, via cupola furnace, as a cement material in concretes in the civil construction, in a similar way as it has been practiced with the blast-furnace slag over some decades. The characterization of the slag presented good results, which support its application as a substitution to the cement, in terms of pozzolanic index, degree of glazing, and so on. As a great number of reinforced concrete structures need maintenance, because they present unsatisfactory performance in a short time of use, the durability of the concrete structures has been studied thoroughly. According to this, the present study evaluates the durability of the concretes containing granulated foundry slag, in terms of water absorption by capillary suction and chloride permeability test. Concretes containing different combinations of granulated foundry slag (0% - 10% - 30% - 50%), substituting cement in volume, and water/binding ratio (0,40–0,55–0,70) were studied. The results have shown that, to the same water/binding ratio, the granulated foundry slag used as a substitute of cement increases significantly the water absorption by capillary suction and it doesn't harm significantly the chloride permeability. However, to the same value of compression resistance, the granulated foundry slag used as a substitute of cement is viable technically, because decreases the water absorption by capillary suction and the chloride permeability.

Key-words: granulated foundry slag; cement material; durability.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a reciclagem de resíduos industriais torna-se uma prática indispensável na preservação de recursos naturais e redução de impactos ambientais, tendo em vista que a redução da geração de resíduos, apesar de prioritária, é tecnicamente limitada.

A principal fonte de degradação ambiental é a geração de resíduos. Os caminhos para minimizar os danos gerados pelos resíduos são: minimizar sua geração, reutilizá-los ou reciclá-los.

A reciclagem é essencial para o desenvolvimento sustentável, uma vez que é impossível pensar em uma sociedade que não gere resíduos. Dentro deste contexto, a cadeia produtiva da indústria da construção civil tornou-se a maior recicladora da economia, possuindo enorme potencial para aumentar o volume de materiais que recicla, em função da grande quantidade de materiais consumidos (JOHN, 2000).

Existe um grande distanciamento entre o potencial de novos materiais (incluindo produtos com materiais reciclados) e/ou novas tecnologias de processamento e as necessidades do mercado, que muitas vezes é a causa do insucesso de sua aplicação no meio produtivo (BINA et al., 2002).

Dessa forma, a necessidade de reciclar resíduos industriais tem motivado cada vez mais a investigação científica, visando minimizar o impacto ambiental provocado pelo acúmulo destes resíduos, através do desenvolvimento de aplicações adequadas aos mesmos. Esta preocupação também se aplica à escória granulada de fundição, especificamente àquela gerada em forno cubilô na produção de ferro fundido, cuja geração no Brasil está em torno de 8 mil toneladas por mês, sendo, atualmente, encaminhada para aterro no final do seu processo.

Como já vem acontecendo com as escórias granuladas de alto-forno, que são utilizadas na fabricação de cimento, devido a sua característica reativa, a escória granulada de fundição, por apresentar propriedades cimentícias, sugere também ser usada para o mesmo fim, como material cimentante em concretos e argamassas na construção civil. No entanto, a correta utilização deste material reciclável depende de investigação científica, através do desenvolvimento de aplicações adequadas ao mesmo, ressaltando que o aproveitamento de

um resíduo só pode ser considerado uma solução quando for aceitável, tanto técnica quanto economicamente.

O concreto contém cada vez mais frequentemente adições minerais que possuem características que lhe conferem propriedades específicas. A ciência do concreto está apenas começando a se desenvolver e é esperado que nos próximos anos, novos tipos de concretos que melhor satisfazem diferentes necessidades sócio-econômicas serão desenvolvidos (AÏTCINb, 2000).

O concreto é um material estrutural versátil e muito difundido, devido às vantagens que apresenta como baixo custo, adequação a formas variadas, fácil execução, excelente resistência à compressão, entre outras. Apesar destas vantagens que proporcionam o seu uso diversificado, pode apresentar algumas desvantagens como a sua porosidade e permeabilidade que o tornam vulnerável à ação de agentes agressivos externos, gerando problemas quanto a sua durabilidade (FERREIRA, 1999).

Tem sido observado um grande interesse pelos aspectos relacionados à durabilidade das estruturas de concreto, que pode ser justificado pelos altos custos que têm sido despendidos para manutenção e reparos das mesmas. Segundo Long (2001), 50% dos recursos da indústria da construção na Europa são gastos em reparos e manutenção.

A deterioração das estruturas de concreto é um problema importante em muitos países no mundo. Isto tem estimulado a busca de métodos para prever a vida útil de novas e velhas estruturas.

As manifestações patológicas apresentadas pelas estruturas, decorrentes de falhas ao longo de seu processo produtivo e durante sua utilização, tornam crescentes as preocupações com a segurança estrutural e com os custos com manutenção e recuperação das estruturas existentes (HOFFMANN et al., 2002).

Até poucos anos atrás, o principal enfoque dos projetistas das estruturas de concreto armado era relacionado às propriedades mecânicas do concreto, com foco na resistência à compressão. Porém, ultimamente, as preocupações com os custos de manutenção, reforço e recuperação das estruturas têm provocado uma mudança nesse comportamento, por ter sido constatado que aspectos referentes à durabilidade das estruturas são mais abrangentes, e

envolverem, inclusive, os aspectos relativos às propriedades mecânicas dos concretos (ISAIA, 1995 e HELENE, 1993).

A tecnologia do concreto se concentrava na obtenção de altas resistências, pois acreditava-se que concretos resistentes eram concretos duráveis, mas, atualmente, sabe-se que estas propriedades devem ser avaliadas com mais cuidado, sempre considerando as condições de exposição das estruturas de concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (1994) é usualmente aceito que, ao projetarem-se estruturas, as características de durabilidade dos materiais em questão devam ser avaliadas com o mesmo cuidado que outros aspectos, tais como propriedades mecânicas e custo inicial.

A penetração de água, cloretos e outros íons agressivos no concreto são os fatores mais importantes nos processos de deterioração físicos e químicos, e, sobretudo, é a microestrutura do concreto que controla os fenômenos físicos/químicos associados aos movimentos da água e ao transporte de íons no concreto (MEHTA e AİTCIN, 1990, apud OH et al., 2002)¹.

Empregando-se adições minerais, consideradas rejeitos de outras indústrias, no concreto pode-se alterar suas propriedades e ao mesmo tempo obter uma vantagem ecológica por dar destino útil a rejeitos. A norma brasileira NBR 11578 (1991) que aborda a produção de cimentos compostos, admite de 6 a 14% de substituição de cimento Portland (em massa), por materiais pozolânicos na sua composição, e de 6 a 34%, por escória granulada de alto-forno.

1.1 OBJETIVOS

Como objetivo geral, esta pesquisa visa avaliar as alterações de comportamento, com relação à durabilidade, de concretos produzidos com escória granulada de fundição, em relação aos concretos convencionais.

Como objetivos específicos têm-se:

- verificar a influência da substituição de cimento por diferentes teores de escória granulada de fundição em concretos com diferentes relações água/aglomerante sobre

¹ Mehta, P. K., Aitcin, P C., 1990. Micro-structural basis of selection of materials and mix proportions for high-strength concrete. In: Seoul International Symposium. American Concrete Institute.

propriedades relacionadas com a durabilidade, através dos ensaios de absorção de água por sucção capilar e de penetração de íons cloreto, quando comparados com concretos convencionais;

- verificar o desempenho dos concretos com escória granulada de fundição quanto à durabilidade para valores iguais de resistência à compressão.

1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa foi estruturada em 8 capítulos, conforme a descrição realizada na seqüência.

No primeiro capítulo está apresentada uma introdução, na qual encontra-se a importância da pesquisa, os objetivos da pesquisa, a sua estrutura e suas limitações.

O segundo capítulo aborda uma revisão bibliográfica com relação à importância ambiental da reciclagem de resíduos industriais e os impactos ambientais que os mesmos podem causar.

O terceiro capítulo apresenta a indústria da fundição; o forno cubilô, dados sobre a sua operação, as matérias-primas utilizadas para fusão no cubilô; a escória de fundição, com dados sobre sua geração e composição química, bem como sobre a sua aplicação atualmente.

No quarto capítulo está apresentado um breve levantamento sobre as principais aplicações dadas às escórias na construção civil.

O quinto capítulo aborda uma revisão bibliográfica sobre a durabilidade de concretos.

O programa experimental é detalhado no sexto capítulo, abrangendo desde o planejamento dos experimentos, escolha das variáveis de resposta e dos fatores controláveis, a metodologia aplicada no experimento, amostragem, beneficiamento do resíduo, caracterização do mesmo, dosagem dos concretos, até a descrição dos ensaios realizados.

O sétimo capítulo apresenta os resultados obtidos dos ensaios realizados e uma discussão dos mesmos.

Por último, o oitavo capítulo aborda as conclusões sobre a pesquisa realizada, apontando o desempenho dos concretos produzidos com a escória granulada de fundição nos ensaios de

absorção de água e de penetração de cloretos. Este capítulo finaliza com sugestões para trabalhos futuros baseadas no desenvolvimento e conclusões da pesquisa.

1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Como limitação da pesquisa foi considerada a não realização do estudo do tempo ótimo de moagem para o equipamento utilizado, ou seja, o estudo da finura ideal da escória granulada de fundição que conferisse uma melhor relação custo x desempenho em termos de resistência mecânica. Isto não foi possível de ser realizado em função da grande quantidade de escória moída necessária para confecção dos corpos-de-prova, da baixa capacidade de produção do moinho disponível no laboratório e do tempo disponível para pesquisa. Em função desta limitação, a escolha da finura da escória granulada de fundição utilizada neste trabalho foi baseada nas prescrições da NBR 12653 (1992), que classifica materiais pozolânicos.

Também considerou-se como limitação a não avaliação de outras propriedades relacionadas com a durabilidade, tais como, a carbonatação e resistência aos sulfatos.

Além disso, este trabalho limitou-se a estudar a escória granulada de fundição proveniente de uma só empresa, conseqüentemente, a análise dos resultados obtidos nesta pesquisa refere-se restritamente à esta escória de fundição.

2 IMPORTÂNCIA AMBIENTAL – RECICLAGEM

Grande parte dos processos com atividade econômica são fontes geradoras de poluição, na forma de gases, líquidos ou sólidos, causando grande degradação ambiental quando não tratados e controlados adequadamente, não contribuindo assim, para um desenvolvimento sustentável.

2.1 RESÍDUOS INDUSTRIAIS

Resíduo sólido tornou-se um grande problema, atualmente, devido à sua inevitabilidade, à sua crescente multiplicação e às condições cada vez mais limitantes para seu descarte final. Com o constante aumento populacional mundial, o consumo em geral é crescente e, portanto, a produção de resíduo também é crescente (TEIXEIRA, 2000).

Resíduos industriais podem ser fontes de poluição de ar, água e solo. Eles também afetam crescimento de plantas e vegetação, além de serem perigosos à saúde quando contêm metais radioativos e pesados além dos limites permitidos (RAI, 2002).

No caso da Indústria de Fundição, esta contribui para a limpeza do ambiente ao consumir as mais diversas sucatas metálicas, mas por outro lado gera apreciáveis volumes de resíduos sólidos não-metálicos, além de efluentes gasosos e líquidos, resultante da degradação de materiais auxiliares empregados. Os resíduos sólidos gerados pelas fundições são compostos principalmente por escórias, restos de refratários, poeiras diversas e areia descartada. No Brasil, a quantidade de areia gerada monta provavelmente a pouco menos de 2 milhões de toneladas anuais, correspondendo a mais de três quartos do total de resíduos sólidos gerados pela Indústria de Fundição (MARIOTTO, 2000).

Quanto à Indústria Siderúrgica, as escórias de alto-forno e aciaria correspondem a cerca de 75% do total dos resíduos de uma usina. São principalmente elas as responsáveis pela tipificação dos resíduos de usinas siderúrgicas como volumosos e de baixa toxidez (KRÜGER, 1995).

Em função das restrições quanto a emissões e disposição de resíduos serem crescentes e tendendo a se irradiar para todo o mundo, a indústria siderúrgica caminha inexoravelmente para soluções de reciclagem dos resíduos por elas gerados (KRÜGER, 1995).

2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS PELOS RESÍDUOS

O desenvolvimento sustentável pode ser definido como aquele que *"permite atender às necessidades básicas de toda a população e garante a todos a oportunidade de satisfazer suas aspirações para uma vida melhor sem, no entanto, comprometer a habilidade das gerações futuras em atenderem as suas próprias necessidades"* (CHEN e CHAMBERS *apud* JOHN 2000)².

Com o rápido crescimento da industrialização, a terra disponível no mundo inteiro vem sendo super valorizada, não só para moradia e complexos industriais, mas também para disposição de quantidades enormes de resíduos gerados pelas operações de processos industriais e minerações. Estas últimas chegam a ser muito maior que as áreas ocupadas pelas próprias indústrias (RAI, 2002).

A degradação ambiental e suas conseqüências provocam por parte da sociedade reações na forma de regulamentações, manifestações, entre outras, que induziram empresas a reverem suas políticas, no sentido de atender as novas exigências. Isto, naturalmente, implica em ônus adicionais, tanto decorrentes da instalação e/ou sofisticação dos sistemas de captação e/ou tratamento quanto pela elevação dos custos da disposição (KRÜGER, 1995).

Na gestão de resíduo sólido passou-se a dar prioridade a sistemas que busquem e/ou propiciem uma diminuição da quantidade de resíduo a ser descartada como uma forma de evitar a tendência de aumento crescente. A minimização dos resíduos tornou-se obrigatória em qualquer plano de gerenciamento moderno, assim como o reaproveitamento energético dos mesmos (TEIXEIRA, 2000).

² Chen, J.; Chambers, D. Sustainability and the impact of chinese policy initiatives upon construction. J. Construction Management and Economies, 1999.

Com relação à gestão de resíduos, atualmente, vigora uma hierarquia de objetivos (LEACH et al., GRÜBL e RÜHL, EU, apud JOHN, 2000)³:

- a) reduzir a geração de resíduos na fonte;
- b) reutilizar o resíduo;
- c) reciclar;
- d) incinerar recuperando a energia;
- e) depositar em aterros sanitários.

Considerando a possibilidade de redução da geração dos resíduos, as empresas podem apresentar, dependendo do porte da empresa, limitações tanto financeiras quanto técnicas para mudanças nos processos industriais.

Segundo a Agenda 21 (1992), o manejo ambientalmente saudável dos resíduos deve procurar mudar os padrões não sustentáveis de produção e consumo. Isso implica na utilização do conceito do manejo integrado com a proteção do ambiente. Em consequência, a estrutura da ação necessária deve apoiar-se numa hierarquia de objetivos a centrar-se nas quatro principais áreas de programas relacionadas com os resíduos, a saber: redução ao mínimo dos resíduos gerados; aumento ao máximo da reutilização e reciclagem ambientalmente saudáveis dos resíduos; promoção do depósito e tratamento ambientalmente saudáveis dos resíduos; e, ampliação do alcance dos serviços que se ocupam dos resíduos.

Segundo Kiperstok et al. (1999), a redução de resíduos na fonte, bem como as tecnologias limpas, visam aproximar o processo produtivo na condição de emissão zero. Objetiva também a eliminação da poluição a montante dos processos, tentando se afastar da visão do binômio tratamento/disposição final ("*End of Pipe*") como soluções para os problemas ambientais gerados pela indústria.

³ Leach, M.A., et al. A systems approach to materials flow in sustainable cities: a case study of paper. J. Environmental Planning and Management, 1997.
Grübl, P., Rühl, M. German committee for reinforced concrete (Dafstb).In: Use of recycled concrete aggregate. DHIR, Henderson&Limbachiya eds Tomas Telford, 1998.
EU (European Union) Construction and demolition waste management practices and their economic impacts. Report to DGXI European Commission. 1999.

Os rejeitos industriais, materiais residuais do processo produtivo de qualquer indústria, podem ser reciclados dentro do próprio processo (regeneração), podem ser tratados e classificados para serem utilizados como insumos em outros processos e produtos (reciclados), ou finalmente serem transformados em rejeitos, que devem receber tratamento adequado para evitar sua transformação em contaminantes. Preocupados com os rejeitos não tratados e não administrados, os órgãos de controle ambiental trabalham no sentido de disciplinar sua destinação final, evitando-se que contaminem os recursos naturais (ar, água e solo), e desta forma minimizando a agressão ao ser humano (BINA et al., 2002).

Segundo EPA (1998), entre outras vantagens da reciclagem têm-se:

- a) preservação dos recursos ambientais;
- b) redução do volume de aterros e incineração;
- c) redução do consumo energético;
- d) redução da poluição emitida para a fabricação de um mesmo produto;
- e) geração de empregos;

A construção civil é um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais. Estima-se que consome entre 20 a 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade. No Brasil, o consumo estimado de agregados naturais, somente na produção de concretos e argamassas, é de aproximadamente 220 milhões de toneladas (JOHN, 2000; BINA et al., 2002).

O consumo de agregados naturais no Brasil varia entre 1 a 8 toneladas por habitante por ano, enquanto no Reino Unido o valor é de 6 toneladas por habitante por ano (BINA et al., 2002).

Segundo Mroueh et al. (2001), por volta de 70 milhões de toneladas de agregados minerais naturais são utilizados por ano na Finlândia para construção de rodovias e muralhas de contenção. Enquanto que ao mesmo tempo, várias atividades industriais produzem grandes quantidades de produtos secundários que poderiam ser adequados para este fim.

O setor da Construção Civil, além de consumir grandes quantidades de recursos naturais não renováveis, é gerador de poluição (para cada tonelada de clínquer produzido mais de uma tonelada de CO₂ é gerada) (BILODEAU et al., 2000).

De acordo com Bourdeau (2000), na União Européia, as edificações são responsáveis por mais de 40% da energia total consumida e o setor da construção produz aproximadamente 40% dos desperdícios gerados pelo homem.

Segundo os estudos do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP-1997), a utilização de resíduos como matéria-prima para construção civil possibilita: a redução de uso de recursos naturais, a redução de demanda de energia para sua extração, a redução de transporte dos mesmos, a redução do volume utilizado nos aterros sanitários e industriais, aprovados ou não, significando risco de acidentes ambientais, a redução dos custos totais, diretos e indiretos na construção de habitações, infra-estrutura ou obras sociais. O uso de insumos primários (matérias-primas) provenientes de exploração de fontes naturais ou industrializadas, bem como o manuseio de rejeitos que utilizam grandes volumes de combustíveis fósseis, gerando grandes demandas de CO e CO₂, são responsáveis pelo incremento contínuo da temperatura ambiente e portanto participantes da alteração do clima mundial. Desta forma, existe um grande interesse de se viabilizar a utilização de rejeitos industriais na construção civil (BINA et al., 2002).

Através dos levantamentos feitos por Ehrenberg e Geiseler (2000), na Alemanha, o uso de escória granulada de alto-forno na fabricação de cimentos contribui tanto do ponto de vista econômico, através da economia de energia (figura 2.1), quanto ambiental (figura 2.2), através da redução na emissão de CO₂.

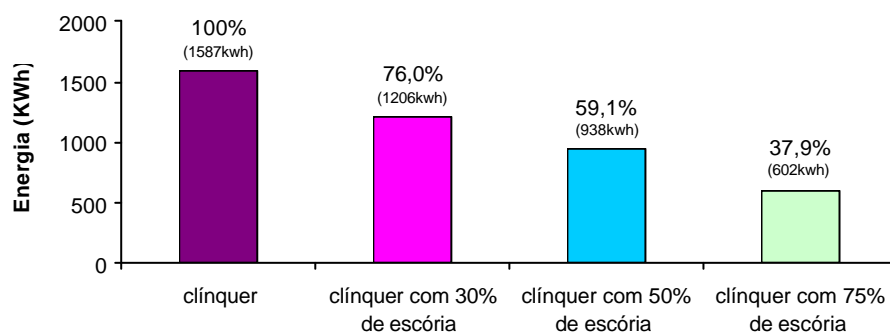


Figura 2.1: energia demandada por tonelada de cimento produzido (EHRENBERG e GEISELER, 2000)

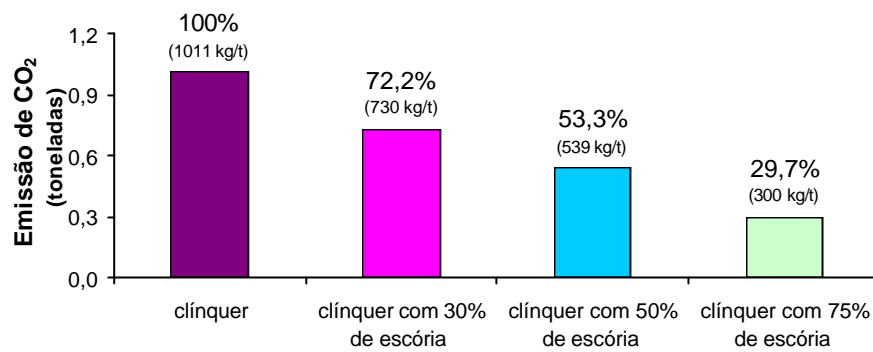


Figura 2.2: emissão de CO₂ por tonelada de cimento produzido (EHRENBERG e GEISELER, 2000)

De acordo com John (1995), a adição de 65% de escória granulada de alto-forno reduz a energia gasta na produção do cimento de 3,53G J/t para 1,67G J/t, incluindo a energia para secagem e moagem da escória.

Já os estudos realizados por Mroueht et al. (2001) mostram que certos materiais alternativos quando utilizados na construção de rodovias podem aumentar o consumo de energia e o aumento de emissão de CO₂.

Mroueht et al. (2001) analisaram o ciclo de vida de seis materiais alternativos para construção de rodovias; incluindo a produção e o transporte dos materiais, a construção do pavimento e a utilização do mesmo. Foram comparadas estruturas de pavimentos de dimensões iguais e construídas ao mesmo tempo. O período escolhido para análise foi de 50 anos, tempo considerado pelos autores suficiente para analisar os impactos da rodovia. A distância média de transporte dos materiais utilizada no estudo foi a seguinte: agregado mineral natural (10 km); concreto moído (10 km); cimento (100 km); cinza volante (10 km); asfalto (10 km); escoria de alto-forno (50 km).

Na figura 2.3 podem ser observados o consumo de energia e a emissão de CO₂ dos pavimentos alternativos. As construções que utilizavam cinza volante e cimento (FA1 e FA2) apresentaram o maior consumo de energia, já a construção de concreto moído com espessura do pavimento reduzida (CC2) apresentou o menor consumo de energia.

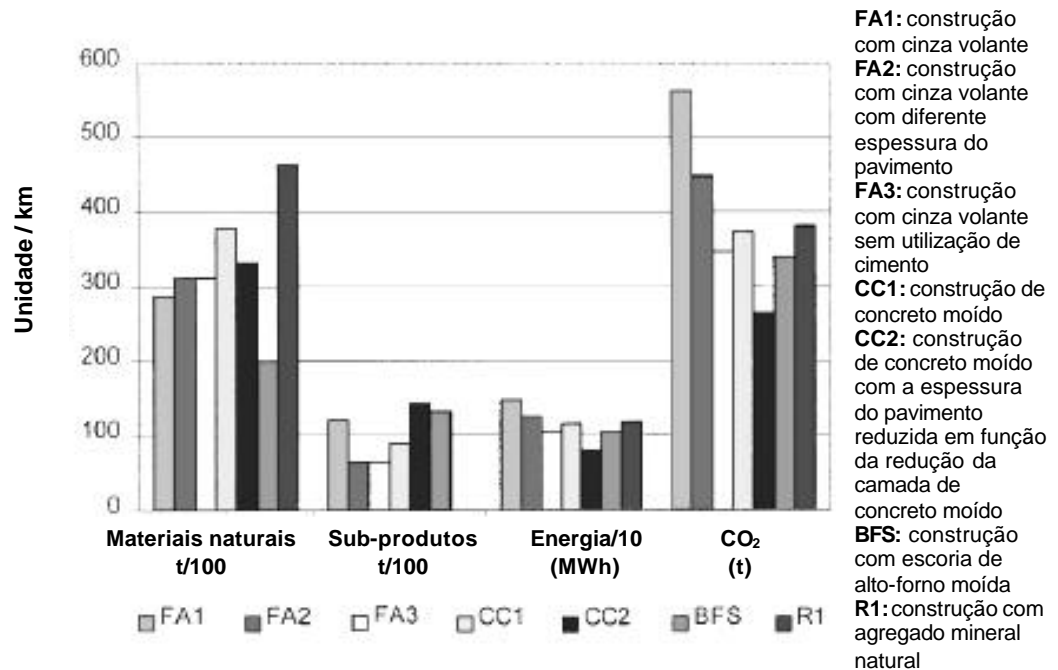


Figura 2.3: comparação entre os materiais, consumo de energia e emissão de CO₂ dos pavimentos (MROUEHT et al., 2001)

Bilodeau e Malhotra (2000) enfatizam que, para a Engenharia Civil, a concepção de desenvolvimento sustentável envolve o uso e produção de materiais de elevado desempenho a custos razoáveis, com o menor impacto ambiental possível.

John (2000) apresenta uma metodologia de pesquisa e desenvolvimento de reciclagem de resíduos como materiais de construção civil. Esta metodologia é de grande importância para direcionar os estudos envolvendo resíduos sólidos, servindo como uma orientação para pesquisas em andamento e uma referência para pesquisas que se iniciarão, evitando o uso inadequado e prevenindo acidentes.

De forma resumida, vários autores (JOHN, 2000; GONÇALVES, 2000; BINA et al., 2002) consideram que a metodologia de pesquisa para a reciclagem de resíduos sólidos envolve os seguintes aspectos:

- a) identificação do resíduo a ser pesquisado, quantificação do resíduo gerado, custos de disposição e destinação, risco de contaminação ambiental e aspectos sociais;
- b) conhecimento do processo de geração do resíduo, visando a verificação da uniformidade das características do resíduo gerado, pois afetarão no desenvolvimento do novo produto;
- c) caracterização do resíduo, devendo incluir análises física, química, microestrutural e risco ambiental;
- d) proposição de aplicações dentro da construção civil, baseadas nas características físicas e químicas, buscando um maior aproveitamento do potencial de reciclagem do resíduo;
- e) desenvolvimento de aplicações técnica, ambiental e economicamente viáveis. Dentre estas aplicações podem ser desenvolvidas as tecnicamente viáveis e economicamente inviáveis, considerando os danos que o resíduo causa ao meio ambiente;
- f) desenvolvimento do produto, envolvendo processo de produção e controle da qualidade;
- g) análise do desempenho do novo produto frente às diferentes necessidades dos usuários para cada aplicação específica;
- h) análise do impacto ambiental do novo produto, considerando o ciclo de vida total do produto.

A possibilidade de reutilização de certos resíduos, além de eliminar a necessidade de sua disposição em aterros industriais, devolve-lhe algum tipo de valor para seu próprio gerador ou para outro interessado, que possa utilizá-lo de forma adequada. Além disso, gera substancial economia de matéria-prima, no outro processo em que é utilizado (BINA et al., 2002).

O esforço para a redução de emissões e efluentes têm levado à adoção de novas tecnologias de produção, menos poluentes e mais eficazes em termos energéticos. Além disso, as legislações ambientais têm se tornado mais restritivas, particularmente no que concerne à

geração, ao transporte, ao tratamento e á disposição final dos resíduos industriais (PEREIRA, 1994).

3 INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO

As origens dos ferros fundidos datam de 600 anos antes de Cristo, na China, quando eram usados para fabricação de painéis, arados e estátuas. No lado ocidental, foi introduzido na Europa em torno de 1400 depois de Cristo (MORAES, 2000).

No Brasil, as fundições primitivas, sobretudo de ferro, desenvolveram-se em São Paulo, e depois, em Minas Gerais, durante os séculos XVII e XVIII (SIEGEL, 1982).

A indústria de fundição é de importância básica ao desenvolvimento industrial de um país. A produção de máquinas em geral e em particular de máquinas operatrizes, auto-motrizes, tratores, hidroelétricas e agrícolas, depende intimamente da disponibilidade de peças fundidas, de qualidade e em quantidades adequadas (SIEGEL, 1982).

No cenário mundial o Brasil é o 9º produtor de fundidos⁴, superando países como Espanha, Canadá e Reino Unido (MORAES, 2000).

A figura 3.1 apresenta a produção brasileira de fundidos, em toneladas, segundo dados da ABIFA (Associação Brasileira das Indústrias de Fundição de Ferro e Aço).

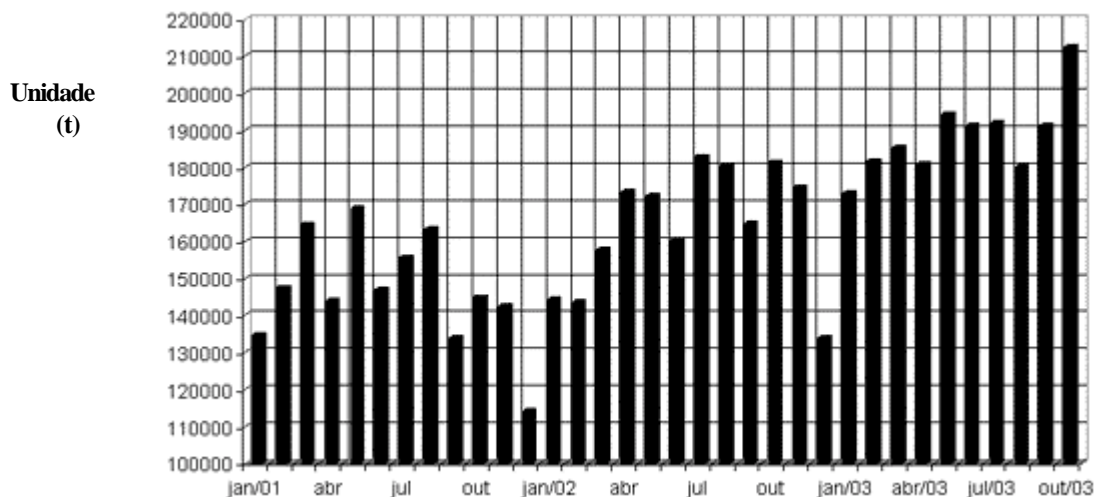


Figura 3.1: produção de fundidos no Brasil (ABIFA, 2003)

⁴ entende-se por fundidos, ligas ferrosas (aço e ferro fundido) e ligas não-ferrosas (alumínio, cobre, zinco, magnésio, entre outros) produzidos em fundição.

Ainda segundo a ABIFA, a tabela 3.1 apresenta a produção de fundidos por região, sendo que a região Sul é responsável por quase 30% da produção brasileira.

Tabela 3.1: produção de fundidos por região

PRODUÇÃO DE FUNDIDOS POR REGIÃO (t)								
REGIÃO	JUN/03 (A)	MAI/03 (B)	JUN/02 (C)	A/B%	A/C%	1º SEM 2003 (D)	1º SEM 2002 (E)	D/E%
1- CENTRO/MG	49.714	50.941	49.296	2,4	0,8	296.410	281.228	5,4
2- NORTE/NE	4.093	4.478	3.636	8,6	12,6	24.090	22.589	6,6
3- RIO DE JANEIRO	13.680	12.882	10.167	6,2	34,6	69.196	59.290	16,7
4- SÃO PAULO	69.439	69.181	50.619	0,4	37,2	400.480	324.811	23,3
5- SUL	54.220	56.887	46.726	4,7	16,0	316.132	264.217	19,6
6- TOTAL	191.146	194.369	160.444	1,7	19,1	1.106.308	952.135	16,2

Fonte: ABIFA (2003)

Considerando que a produção de ferro fundido corresponde, aproximadamente, 85% da produção total de fundidos, conforme tabela 3.1, a produção de ferro fundido no Brasil durante o mês de junho de 2003 estaria em torno de 162.474 t. Considerando, ainda, que a produção de escória de fundição deve estar em torno de 50kg/t de ferro fundido via forno cubilô (CASPER, 1999, e SIEGEL 1982), o Brasil no mês de junho de 2003 teria produzido cerca de 8.124 t de escória de fundição.

Na figura 3.2 está apresentado o crescimento das exportações da indústria de fundição no Brasil, sendo que o crescimento de 1980 a 2002 foi de 8,3% ao ano, segundo ABIFA.

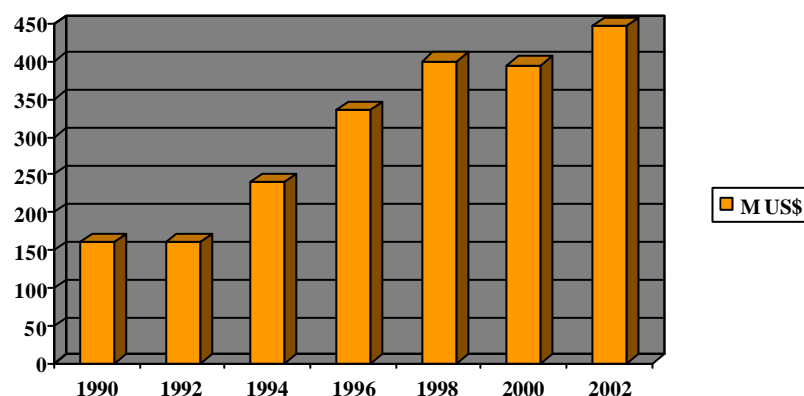


Figura 3.2: crescimento das exportações da indústria de fundição no Brasil (fonte: ABIFA, 2002)

Segundo Moraes (2000), a seqüência geral de fabricação dos ferros fundidos em fornos cubilô obedece as seguintes etapas, indicadas na figura 3.3.

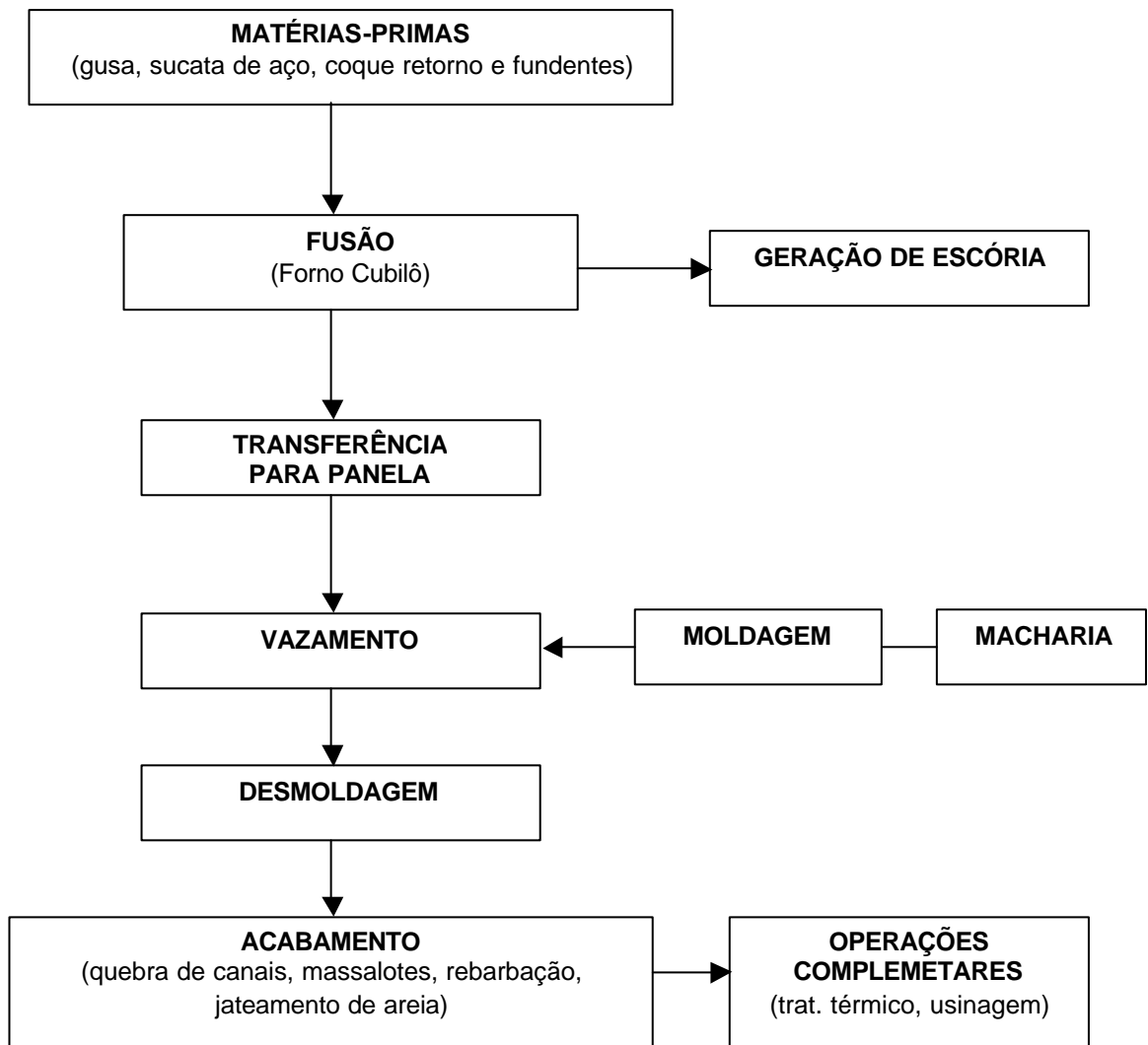


Figura 3.3: fluxograma básico do processamento de ferros fundidos via forno cubilô (MORAES, 2000)

De uma forma geral, os ferros fundidos podem ser classificados quanto a sua microestrutura, quanto à tonalidade da fratura e pelos nomes comerciais, sendo designados comercialmente em *brancos*, *cinzentos*, *vermiculares*, *nodulares*, *maleáveis* e *mesclados* (MORAES, 2000).

No Brasil, o ferro fundido cinzento é a liga fundida mais produzida, sendo utilizado em várias áreas industriais (como automobilística, agroindústria, siderúrgicas, entre outras). Dois exemplos que caracterizam a utilização deste ferro fundido são bases de máquinas e blocos de motor em veículos, pela sua capacidade de amortecimento de vibrações.

Os ferros fundidos cinzentos são comercialmente definidos como sendo ligas ferro-carbono-silício cuja característica estrutural dominante é apresentar carbono livre na forma de veios (lamelas) de grafita. Podem apresentar também parte do carbono combinado, em geral sob a forma do microconstituente denominado de perlita. A fratura do ferro fundido com grafita lamelar é cinzenta daí a denominação clássica – ferro fundido cinzento (PIESKE, 1980).

Os ferros fundidos com grafita lamelar apresentam uma composição química contendo como elementos principais: carbono, silício, manganês, enxofre e fósforo. A faixa de composição química pode ser ampla, conforme tabela 3.2.

Tabela 3.2: composição química dos ferros fundidos cinzentos

Compostos	Quantidade (%)
C	2,5 a 4,0
Si	1,0 a 3,0
Mn	0,25 a 1,0
S	0,02 a 0,25
P	0,05 a 1,0

Fonte: PIESKE (1980)

As características essenciais de um ferro fundido cinzento são determinadas durante a solidificação pela ação combinada dos efeitos de composição, velocidade de resfriamento, nucleação e da velocidade de crescimento das células eutéticas (PIESKE, 1980).

As propriedades mais comumente especificadas na comercialização de ferros fundidos cinzentos são apenas a resistência à tração e a dureza (PIESKE, 1980).

Dentre os resíduos de fundição gerados, a areia usada na confecção dos moldes é o mais gerado de todos seus resíduos sólidos, com volumes substanciais. Outros resíduos sólidos importantes gerados em processos de fundição são, por exemplo, escória, pó de exaustão da preparação da areia, da desmoldagem, do forno de fusão, da limpeza de peças e da usinagem, lama do tratamento de água de refrigeração, e cavaco da usinagem (MORAES, 2002).

3.1 FORNO CUBILÔ

O forno cubilô surgiu na Inglaterra em 1794, inventado por John Wilkinson, datando aí o verdadeiro surto da indústria de fundição de ferro fundido (SIEGEL, 1982).

O conhecimento da metalurgia dos ferros fundidos e da técnica de operação e controle do forno cubilô permite que com ele se produzam peças de elevado conteúdo tecnológico. Um exemplo típico é a produção de ferros fundidos cinzentos para blocos de motor (PIESKE, 1980).

É um forno vertical feito de chapa de aço, revestida internamente de tijolos refratários; a parte superior é aberta e o fundo consta de um par de portas de ferro fundido cuja finalidade é permitir a remoção do coque não consumido e do metal não fundido após cada corrida (SIEGEL, 1982).

Segundo Pieske (1980), é um equipamento de fusão empregado para a produção de ferros fundidos, por meio da refusão de materiais metálicos ferrosos e funciona baseado no princípio de contra corrente, ou seja, a carga metálica e combustível possuem um fluxo contrário ao do comburente, que é o oxigênio do ar.

O forno cubilô é um forno de fusão que utilizando matérias-primas metálicas ferrosas, permite a obtenção, por aquecimento e reações físico-químicas, ferro fundido líquido, com composição, produção e temperaturas determinadas (VALLINA, 1998).

Seu custo de instalação é considerado relativamente baixo, particularmente para as fundições pequenas, sendo capaz de propiciar a qualidade apropriada do ferro, especialmente do ferro fundido cinzento (POWELL e SMITH, 1999).

Como combustível é empregado o coque, que é introduzido inicialmente de forma a constituir uma coluna (pé de coque) para a sustentação das cargas. Posteriormente sua introdução se faz em porções menores, chamadas de coque de fusão, juntamente com as cargas metálicas, visando-se a substituição do coque consumido pela combustão de parte do pé de coque (PIESKE, 1980).

O custo de fusão mais significativo refere-se à carga metálica e à habilidade de processar sucata de qualidade inferior, e portanto mais barata, no forno cubilô, devido a sua ação de

refino e a maior tolerância a materiais não-metálicos incluídos, o que torna o benefício considerável, particularmente para aplicações de grande peso (POWELL e SMITH, 1999).

Segundo Pieske (1980), o forno cubilô é constituído basicamente das partes apresentadas na figura 3.4, onde algumas delas são descritas abaixo:

- a) cuba(1) – parte do forno compreendida do plano superior das ventaneiras até a porta de carga;
- b) cadinho(2) – parte inferior do forno, desde a soleira até o plano médio das ventaneiras. É o elemento básico para o dimensionamento do forno cubilô e tem por finalidade servir de reservatório para o ferro fundido e escória;
- c) anel ou caixa de vento(3) – de formato retangular ou circular, que envolve todo o forno e serve para a distribuição do ar nas ventaneiras;
- d) ventaneiras(4) – orifícios para a entrada do ar. Construídas de ferro fundido e parafusadas internamente contra a carcaça;
- e) porta de trabalho ou de visita(6) – está geralmente diametralmente oposta a bica de sangria do ferro fundido. Serve para possibilitar a preparação da soleira e acendimento do forno;
- f) porta de carga(7) – serve para dar entrada aos materiais da carga. Suas dimensões dependem do tipo de carregamento: “skip” ou panela de fundo falso;
- g) chaminé(9) – prolongamento da cuba com a finalidade de levar os gases para fora do recinto da fundição;

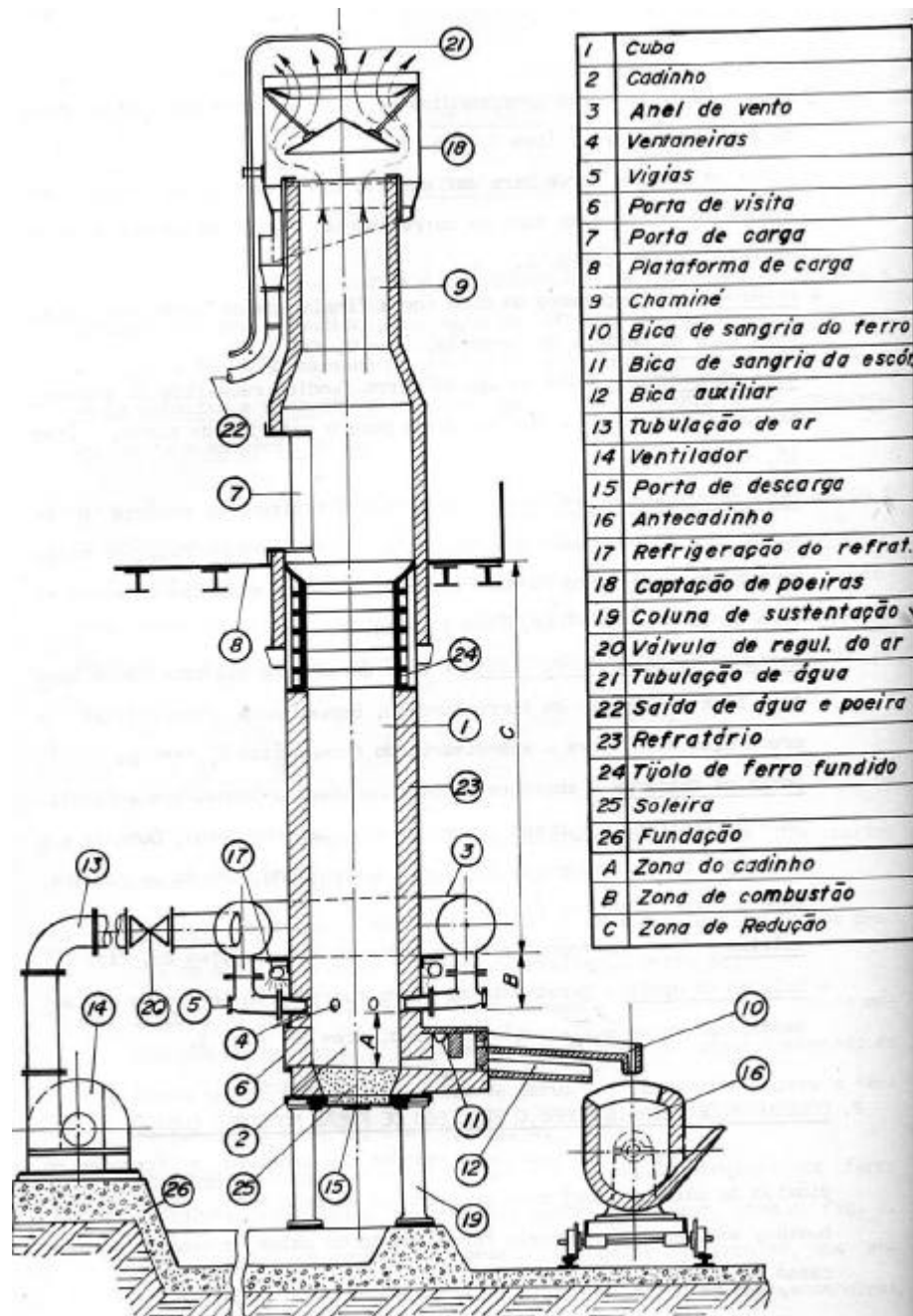


Figura 3.4: representação esquemática do forno cubilô (PIESKE, 1980)

- h) bica de sangria(10) – calha de aço ou ferro fundido revestida de argamassa, pela qual o banho líquido jorra para o exterior do forno;
- i) bica de sangria da escória(11) – destina-se à retirada da escória e se situa 10 a 15cm abaixo do plano inferior das ventaneiras. As bicas de escória e de ferro fundido podem constituir-se num só elemento no caso de sangria contínua;

- j) porta de descarga(15) – abertura situada na base do forno, com a finalidade de retirar, por queda livre, os materiais de carga. Durante a operação é parte integrada do fundo, sustentando através da soleira, toda a carga;
- k) colunas de apoio(19) – geralmente de ferro fundido, ou perfis de aço soldados, servem de sustentação do forno.
- l) soleira(25) – fundo do forno feito de areia de moldar;
- m) carcaça – envoltório cilíndrico de eixo vertical, construído de chapas de aço, em seções soldadas ou rebitadas entre si.

Aproximadamente a 5 cm do fundo, está colocada a bica de vazamento e o espaço entre o fundo e a bica é coberto com areia de moldagem assentada em rampa a fim de permitir o fácil escoamento do metal. Mais acima, geralmente do lado oposto, é colocada a bica de escória, numa altura tal que permita formar um reservatório para o metal líquido (SIEGEL, 1982).

Os fornos cubilô, na zona do cadinho (A) e na zona de máxima temperatura (B), são revestidos monoliticamente, empregando-se argamassas refratárias, de composição idêntica aos tijolos refratários, mas que possuem a grande vantagem de constituírem-se num bloco único, eliminando as juntas, além de serem de colocação mais fácil (PIESKE, 1980).

Segundo Powell e Smith (1999), à medida que realiza a campanha de fusão, o material refratário sofre erosão mecânica e quimicamente até que a espessura remanescente fique insuficiente para permitir a continuação de uma operação segura. Esta situação de erosão limita a campanha de fusão e geralmente requer a instalação de dois fornos, para que enquanto um estiver fundindo o outro possa ser reparado.

3.1.1 Matérias-primas para Fusão em Cubilô

As matérias-primas normalmente utilizadas na produção de ferros fundidos cinzentos em forno cubilô são o coque, calcário, ferro-gusa, sucata de aço e ferroligas.

3.1.1.1 Coque

A qualidade do coque é um dos fatores mais importantes para o êxito na marcha de operação do cubilô. Alterações na qualidade do coque podem promover interferências significativas na temperatura do ferro fundido, na carburação e no teor de enxofre da liga fundida (PIESKE, 1980).

É desejável que o coque de fundição seja de difícil combustão, de tamanho grande (80 – 120 mm) e de baixa reatividade (VALLINA, 1998).

A dificuldade de combustão destina-se a evitar a queima do coque antes que o mesmo atinja a zona de combustão, o que provocaria aproveitamento inútil de coque. O tamanho do coque tem grande influência na temperatura do ferro fundido (PIESKE, 1980).

Segundo Vallina (1998), as propriedades químicas e físicas podem variar um pouco entre diferentes produtores, mas um coque de fundição com as seguintes especificações gerais dará bons resultados:

- a) carbono fixo87,0% mínimo;
- b) materiais voláteis.....1,5% máximo;
- c) cinzas.....10,0% máximo;
- d) enxofre.....0,8% máximo.

3.1.1.2 Calcário

Os fundentes mais comuns são o carbonato de cálcio natural, calcário, ou o carbonato duplo de cálcio e magnésio, dolomita. Num bom calcário o teor de sílica não deve ser superior a 2% e deve conter alta porcentagem de óxido de cálcio que, teoricamente, atinge até quase 58%. Calcários com teores de CaO inferior a 45% não dão resultados satisfatórios no cubilô (SIEGEL, 1982).

Segundo Vallina (1998), as características de um bom calcário de fundição são:

- a) pureza.....90 a 95% de CaCO_3 ;

- b) sílica.....2% no máximo;
- c) enxofre.....0,3% no máximo (seria ótimo se fosse 0%);
- d) tamanho.....30 a 40mm;
- e) finos e pós.....5% no máximo;
- f) deve ser compacto e duro.

3.1.1.3 Ferro-gusa

Os ferros-gusa para fabricação de ferros fundido são classificados segundo a especificação NBR 7838 (VALLINA, 1998).

Segundo Vallina (1998), há 5 tipos de ferro-gusa para ferro fundido:

- a) silício (% em massa).....0 até 0,50
 - 0,51 até 1,00
 - 1,01 até 1,50
 - 1,51 até 2,00
 - 2,01 até 2,50
- b) fósforo (% em massa)...0,10 máximo
 - 0,11 até 0,25
 - 0,26 até 0,50
- c) enxofre (% em massa)....0,025 máximo para todos os tipos

3.1.1.4 Sucata de Aço

O emprego de sucata de aço na produção de ferros fundidos cinzentos está condicionado principalmente ao tipo de ferro fundido que se deseja obter. Para as classes de baixa resistência à tração, o que equivale a dizer de elevado carbono equivalente, onde as principais características são boa fundibilidade e boa usinabilidade, o emprego de sucata de aço como elemento de carga fica limitado em torno de 10%. Para as classes de resistência mecânica mais elevada a proporção de sucata pode atingir até 40 – 50%, dependendo do teor de carbono final desejado, e da matéria-prima disponível (PIESKE, 1980).

3.1.1.5 Ferroligas

Segundo Pieske (1980), o emprego de ferroligas na produção de ferros fundidos cinzentos tem as seguintes finalidades:

- a) corrigir os teores de certos elementos na carga metálica;
- b) adicionar ao ferro fundido determinado elemento que não conste nos materiais de carga;
- c) inocular a liga fundida com o objetivo de aumentar seu potencial de grafitação.

As principais ferroligas empregados em fornos cubilô para a produção de ferro fundido cinzento são as ligas de *ferro-silício* e *ferro-mangânês* (VALLINA, 1998).

3.2 ESCÓRIA DE FUNDIÇÃO

No processo de fusão em cubilô, uma certa quantidade de materiais não metálicos é gerada ou acumulada, e esta porção é denominada de escória. A cinza do coque, os produtos de oxidação, refratário consumido e todos os materiais estranhos contribuem para a formação da escória (SIEGEL, 1982).

A figura 3.5 mostra uma ilustração esquemática das fases presentes possíveis, durante a fusão e enquanto o metal permanecer líquido. As flechas indicam as reações possíveis: (1) solubilidade de gases no metal líquido; (2) reações geradoras de gases no metal e desenvolvimento de vapores; (3) e (4) trocas metal – escória; (5) reações do metal com o cadinho que o contém (SIEGEL, 1982).

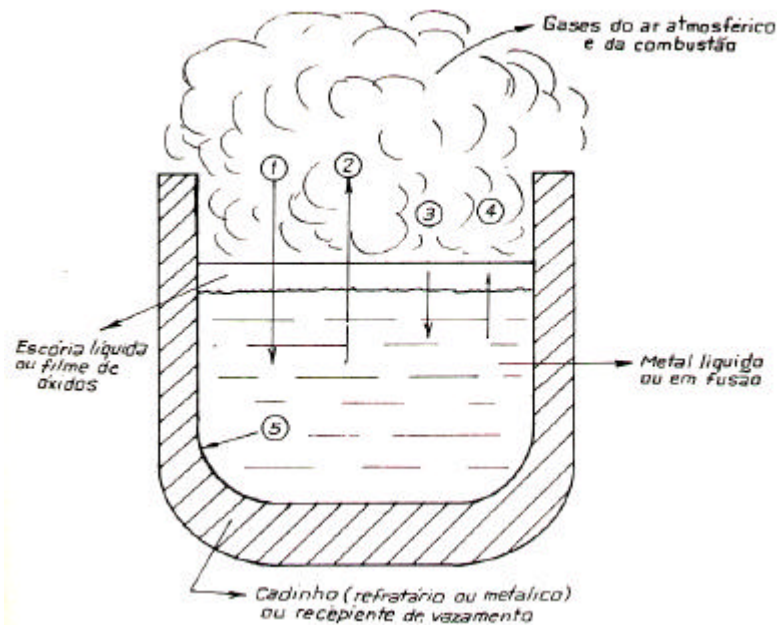


Figura 3.5: representação esquemática da formação da escória no cadinho durante a fusão do metal (SIEGEL, 1982)

A escória constitui-se basicamente de três componentes: Al_2O_3 , SiO_2 e CaO . A alumina é proveniente do desgaste do refratário; a sílica também do refratário, da areia aderente aos materiais da carga e da cinza do coque; e o CaO provém da adição de calcário (PIESKE, 1980).

Normalmente as escórias são indicadas por meio do índice de basicidade que é definido como sendo a relação entre a soma dos componentes básicos e a soma dos componentes ácidos. Quando esta relação é maior do que um diz-se que a escória é básica, sendo ácida quando a relação é menor do que um (PIESKE, 1980).

Em fornos cubilô basta considerar-se a relação CaO/SiO_2 , já que estes óxidos definem o caráter de acidez da escória (PIESKE, 1980).

A composição química das escórias de cubilô ácidos tem sido apresentada na literatura com valores os mais dispersos, conforme apresentada na tabela 3.3

Tabela 3.3: composição química das escórias ácidas de fundição

Compostos	Quantidade (%)	
	SIEGEL (1982)	CASPERS (1999)
SiO ₂	38 a 52	50 a 55
Al ₂ O ₃	6 a 23	14 a 16
CaO	20 a 44	22 a 27
MnO	1,7 a 3,6	2,0 a 3,5
FeO	5 a 15	0,5 a 2,0

É desejável que a escória seja fluida, assim a sua operação de extração do interior do forno não é prejudicada. A escória fluida trabalhará melhor o banho metálico, retirando os óxidos nocivos, e aglomerando as partículas estranhas, contidas no interior da massa de metal. Isto se consegue adicionando calcário e fluorita à escória, pois com a adição de calcário, que se consegue conservar, nas temperaturas de fusão do metal, a escória líquida, é assim, de fácil retirada do interior do cubilô. Estes materiais adicionados são chamados de fundentes, pois adicionados à carga conseguem diminuir o ponto de fusão da escória, aumentando sua fluidez e sua capacidade de refino (SIEGEL, 1982).

A maneira mais elementar de verificar se a escória está funcionando bem é a observação de sua cor. Para que se tenha uma garantia de uniformidade, é necessário retirar amostras de escória sempre da mesma maneira, pois ela é muito afetada pelo regime de resfriamento (SIEGEL, 1982).

A cor considerada boa é a de um verde escuro, as escórias mais escuras contêm com frequência mais óxidos de ferro e manganês (SIEGEL, 1982; PIESKE, 1980). As escórias de cor clara indicam alta porcentagem de óxidos de cálcio e de magnésio, e baixo teor de óxido de ferro (SIEGEL, 1982). Além disso ela é lisa e compacta, apresenta-se quebradiça, rompendo-se pedaços pontiagudos e cortantes (PIESKE, 1980).

À medida que aumenta a presença de FeO, a escória passa a ter uma cor marrom até preto intenso. No caso de uma escória preta, esta atacará com maior intensidade o refratário, pois o FeO deve ser equilibrado por SiO₂ e Al₂O₃ (PIESKE, 1980).

Além da cor, Pieske (1980) apresenta na tabela 3.4 outras características físicas das escórias:

Tabela 3.4: características das escórias de forno cubilô ácido ar frio

Características a observar		Observações
Fluxo	calmo	Viscosidade boa, operação normal
	agitado	Escória espumosa, operação irregular
Basicidade	ácida	Fios longos
	básica	Fios curtos
Cor	preta	Escória ruim, condições extremamente oxidantes
	marrom escuro	Escória ruim, condições oxidantes
	verde garrafa	Operação normal
	verde tingido de amarelo	Operação normal, mas com excesso de manganês
	marrom	Escória ruim, excesso calcário

Fonte: PIESKE (1980)

A análise química da escória deve ser feita para controle periódicos, porém não é praticável realizar análises completas das escórias durante a marcha do cubilô (SIEGEL, 1982).

Além de serem removidos os componentes não-metálicos do cubilô, existe a necessidade de que a escória contenha o mínimo possível de óxidos de ferro e manganês; não prejudique o aumento de carbono e não aumente a queima de silício e manganês; ocasione a mínima incrustação de escória no refratário; e absorva o enxofre (CASPERS, 1999).

Segundo Caspers (1999) e Siegel (1982), a quantidade de escória por 100 kg de ferro deve estar em torno de 5 kg.

Aplicação da Escória de Fundição

Os resíduos sólidos gerados nos processos de fundição têm-se tornado alvo de muitos estudos, em especial em países desenvolvidos, uma vez que o descarte está se transformando num complexo problema ambiental. O tratamento e a reciclagem são fundamentais, não só por uma necessidade de matéria-prima para este e outros setores, mas no sentido de atender as regulamentações ambientais estabelecidas pelos órgãos ambientais. Além disso, o mercado vem exigindo que as empresas tenham políticas de processamento, tratamento e aplicabilidade para os resíduos, visando certificação como a ISO 14000 (MORAES, 2002).

As escórias de fundição geralmente são depositadas em aterros e tratadas como resíduos industriais. Poucos estudos foram realizados com as escórias de fundição, ao contrário da areia de fundição, cujo resíduo tem sido amplamente estudado na construção civil, sendo utilizado como matéria-prima na fabricação do cimento Portland (REGAN et al., 1998), como agregado em concreto e em misturas asfálticas (ARANZABAL et al., 1999).

Segundo Moraes (2002), as escórias de fundição, em especial de cubilô, já podem ser recicladas como cimento ou em concreto, pois os novos fornos vêm com sistema de resfriamento brusco que permite a amorfização da estrutura da escória, transformando-a num subproduto de alto valor agregado, além de ser um resíduo classe III. Porém, muitas fundições brasileiras não têm conhecimento desta possibilidade e encaminham este resíduo para aterro.

Tayeb (1995) estudou a possibilidade de armazenagem de energia solar em alguns resíduos industriais, tais como, escória de cobre, escória de ferro, escória de fundição, escória de alumínio e fragmentos de cobre. Quantidades iguais de material (20kg cada) foram colocados em coletores solares em uma mesma área. Cada coletor foi instalado sobre um suporte de ferro e conectado a um tanque de entrada e um tanque de saída para alimentar o HTF (Fluido Transferidor de Calor) e descarregando-o. Os tanques foram isolados termicamente, garantindo uma alimentação constante de temperatura e uma conservação constante da temperatura. A eficiência de armazenagem de calor de cada material foi calculada através da relação: *Eficiência de armazenagem = Calor solar recuperado / Calor solar total recebido durante o experimento*. Quanto ao desempenho da escória de fundição, esta demonstrou a mais baixa temperatura durante o experimento. Enquanto que a escória de ferro, a escória de alumínio e a escória de cobre armazenaram, respectivamente, 319 J, 294,3 J e 225,5 J de energia solar, a escória de fundição somente armazenou 123,8 J (joules).

Uehara e Sakurai (1996) estudaram a aplicação da escória de fundição como substituição à gelenita no corte de metais. Através de análises químicas foi constatado que a escória de fundição possui estrutura semelhante à da gelenita ($2\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$), um material amorfo utilizado como inibidor de difusão na interface da ferramenta de corte do equipamento, na tentativa de prolongar a vida útil do equipamento. Além da semelhança da composição química, a escória apresentou o mesmo desempenho no corte de metais que a gelenita. Como pode ser observado na figura 3.6, a escória reduz a força de corte do equipamento em comparação aos outros materiais estudados.

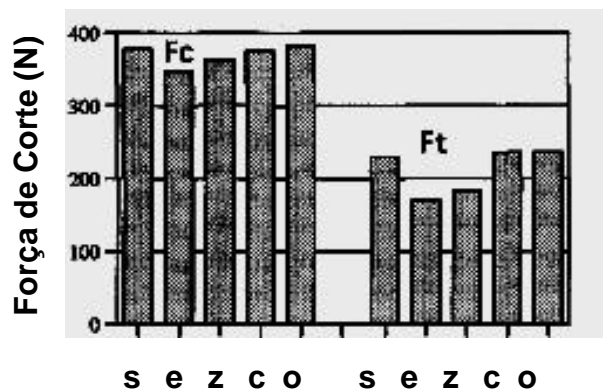


Figura 3.6: força de corte dos materiais **s** (sem lubrificante), **e** (escória de fundição em pó), **z** (zinco em pó), **c** (cobre em pó) e **o** ($\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$) utilizados no corte de metais (UEHARA e SAKURAI, 1996)

Miranda et al. (1998) utilizaram escórias de fundição de forno cubilô como matéria-prima na indústria cerâmica com percentuais de adição de 15 a 45% na fabricação da cerâmica branca (porcelana). Foram produzidas duas misturas, uma com escória moída, substituindo o quartzo da massa, e outra sem escória (referência), composta por quartzo, feldspato, argila e caulim. A mistura com escória apresentou maior resistência à compressão, menor absorção de água e uma coloração clara de tom pastel. Os autores consideram que a escória de fundição pode ser empregada como matéria-prima na indústria cerâmica, principalmente para as cerâmicas que não exigem padrões de cor muito claras.

Ceccatto (2003) avaliou o desempenho, em termos de resistência mecânica, da escória granulada de fundição como material cimentante em concretos. Diferentes teores de substituição (0, 10, 30 e 50%) de escória granulada de fundição por cimento foram analisados. A autora observou que o concreto com 10% de substituição de cimento por escória granulada de fundição obteve os melhores resultados de resistência à compressão em relação aos demais teores de substituição, quando comparados ao concreto referência (0%). Entretanto, os

concretos com teores 30 e 50% obtiveram um crescimento significativo da resistência à compressão após 28 dias. Este estudo evidencia a contribuição da substituição de cimento por escória granulada de fundição, em termos de economia no consumo de cimento, visto que é possível produzir um concreto com resistência à compressão de 25 MPa aos 91 dias utilizando 50% de escória granulada de fundição. O que representa uma economia de 25,8% de cimento consumido em relação ao concreto referência.

4 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Segundo Calleja (1982), as escórias siderúrgicas começaram a ser usadas como materiais de construção na Inglaterra no final do século XVIII.

As escórias siderúrgicas podem agregar valor quando empregadas na construção civil como substituição de matérias-primas em estradas, concreto e cimento. Suas possibilidades de reciclagem podem ser as seguintes (VIKLUND et al., 1999; GARCÍA et al., 1999):

- a) base e sub-base de pavimentos;
- b) lastro de ferrovias;
- c) agregado graúdo em revestimento asfáltico;
- d) material de aterro;
- e) agregados no concreto;
- f) matéria-prima na produção de cimento;
- g) matéria-prima para a indústria cerâmica (MIRANDA et al., 1998).

As aplicações práticas das escórias siderúrgicas em diversos setores da construção civil têm se tornado soluções de baixo custo, além de boa qualidade técnica. Segundo Burnier et al. (1988), o agregado siderúrgico conta com as seguintes vantagens sobre o agregado pétreo (brita):

- a) menor custo, já que não requer explosivos para desmonte;
- b) maior resistência à abrasão, tornando o pavimento mais durável;
- c) estrutura vesicular, permitindo perfeita drenagem quando utilizado em drenos e lastros ferroviários;
- d) forma de grão (cúbica), que confere ótima consistência e adesividade às misturas asfálticas. Já a brita geralmente apresenta forma lamelar;

- e) maior massa específica; resultando em economia de material no dimensionamento de contenções e lastros, assegurando grande estabilidade.

Dentre as escória siderúrgicas, destacam-se as escórias chamadas de alto-forno, geradas na fusão redutora dos minérios para obtenção do ferro-gusa; as escórias de aciaria, resultantes dos processos de fabricação do aço. Dependendo dos métodos utilizados para a produção do aço, as escórias de aciaria são chamadas de escória de aciaria LD, quando geradas durante o refino do gusa líquido realizado em conversores a oxigênio, e escórias de aciaria elétrica, quando geradas durante a fusão e refino da sucata em fornos elétricos a arco.

No final do processo de fusão, tanto do ferro-gusa, quanto do aço, as escórias líquidas a mais de 1500° C são vertidas em um leito, no qual solidifica. Segundo Masuero (2001), as escórias podem sofrer três tipos de resfriamento (resfriamento ao ar, controlado com água e brusco com água ou ar), gerando características físicas distintas.

O uso dado às escórias, tanto de alto-forno, quanto de aciaria, objetivando um melhor aproveitamento das suas características físicas, depende tipo de resfriamento que recebe. Como exemplo, tem-se a escória de alto-forno, que segundo Aiticin (2000), pode ser deixada resfriar lentamente de tal maneira que se cristalice principalmente na forma de melilita, uma solução sólida de ackermanita e gelenita. Quando resfriada dessa maneira, a escória de alto-forno é cristalizada e pode ser usada como agregado no concreto, no asfalto e como lastro de cobertura ou para construir estradas e embarcadouros, mas não tem praticamente valor hidráulico e não pode ser usada como material cimentício suplementar, mesmo que finamente moída. Contudo, se a escória é resfriada rapidamente quando sai do alto-forno, ela solidifica numa forma vítrea e pode então desenvolver propriedades cimentícias, se adequadamente moída e ativada.

De acordo com Masuero et al. (1998), a geração mundial de escória de alto-forno é estimada em 120 milhões de toneladas para uma produção anual de 700 milhões de toneladas de aço.

Dados do IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia (1999) informam que no Brasil são gerados em torno de 5,7 milhões de toneladas de escória de alto-forno por ano.

A destinação das escórias de alto-forno, segundo dados do IBS, pode ser observada na figura 4.1 (LOUZADA, 1991).

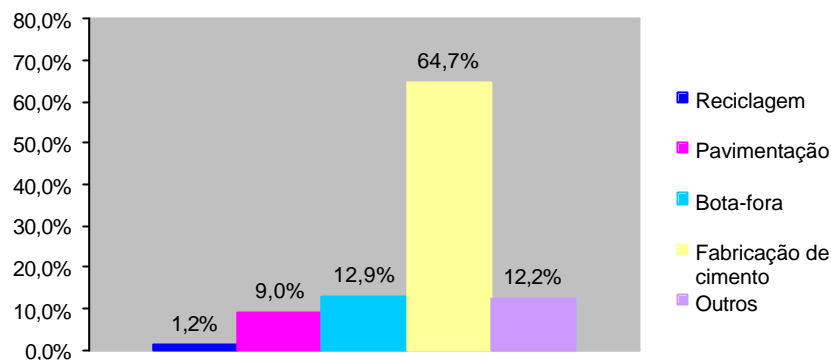


Figura 4.1: destinação das escórias de alto-forno (LOUZADA, 1991)

No Brasil, cerca de 88% das escórias de alto-forno são resfriadas de forma granulada. Destas, em torno de 5 milhões de toneladas são utilizados na fabricação do cimento (MOURA, 2000).

Segundo a NBR 5735 (1991), o conteúdo de escória de alto-forno, que pode ser moída em conjunto ou em separado, deve estar compreendido entre 35 e 70% da massa total de aglomerante, formando assim, o cimento Portland de Alto-Forno (CP III). Quando moída em conjunto com o clínquer Portland, em proporções que variam entre 6% e 34%, segundo a NBR 11578 (1991), formam o cimento Portland composto com escória (CPII E).

No caso das escórias de aciaria, escórias geradas no processo de refinamento do aço, de um modo geral, possuem um uso restrito na construção civil devido a sua heterogeneidade e à presença de compostos expansivos, que são os causadores de certas manifestações patológicas quando incorporadas em pavimentos e em concretos. Porém, as escórias de aciaria têm sido aplicadas em grande escala como agregado para pavimentação de rodovias, sendo utilizadas tanto como base e sub-base quanto como agregado para misturas asfálticas.

Conforme dados do IBS (2003), a geração de escória de aciaria no Brasil, em 2002, correspondeu a 3,6 milhões de toneladas.

De acordo com Gumieri (2002), aproximadamente 44% das escórias LD são empregadas em lastros ferroviários, bases e sub-bases rodoviárias e 56% não possuem utilização definida, sendo estocadas nos pátios siderúrgicos.

Segundo dados do IBS, a destinação das escórias de aciaria LD pode ser observada na figura 4.2 (LOUZADA, 1991).

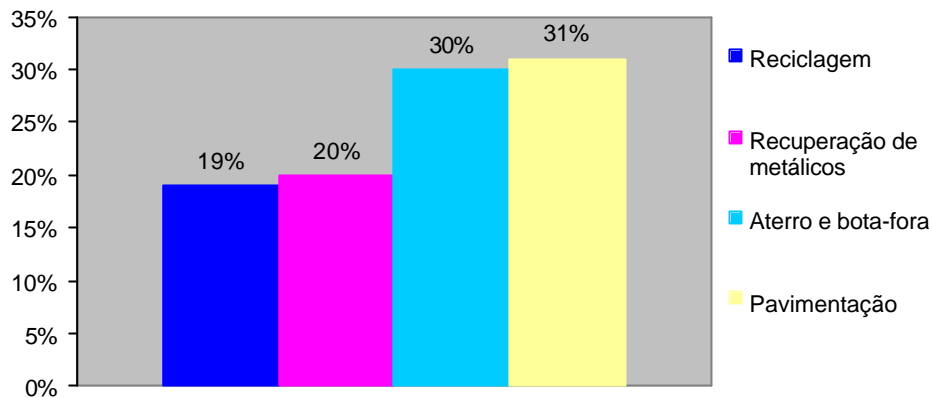


Figura 4.2: destinação das escórias de aciaria LD (LOUZADA, 1991)

As escórias de aciaria são empregadas satisfatoriamente em pavimentação em função de certas propriedades, tais como, boa resistência ao desgaste, resistência mecânica, excelentes propriedades de atrito e facilidade de compactação (BURNIER et al.,1988; KRÜGER, 1995; RHODE, 2002).

4.1 BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS

Em base e sub-base de pavimentos rodoviários as escórias mais comumente utilizadas são as de aciaria, pois, normalmente, estas são resfriadas lentamente e praticamente não possuem valor hidráulico, o que não contribui para que estas sejam utilizadas como material cimentante em concretos.

Mesmo que as escórias apresentem propriedades adequadas para o uso em pavimentação, muita atenção deve ser dada ao problema da expansão, principalmente para bases confinadas, onde a expansão da escória pode gerar sobreelevações e fissuração da camada superior. Em função disto, vários autores (KRÜGER, 1995; MASUERO, 2001 e GUMIERI, 2002) recomendam que as escórias de aciaria utilizadas em bases confinadas estejam curadas, ou seja, que estas tenham passado por um determinado período de tempo que assegure que seus compostos químicos não sofram o fenômeno da expansão.

Rhode (2002) estudou a utilização de escória de aciaria elétrica resfriada lentamente em camadas granulares de pavimentos. Após uma correção da granulometria da escória, os resultados apontaram um módulo de resiliência superior quando comparada aos materiais granulares tradicionais.

Akinmusuru (1991) afirma que as escórias de aciaria moídas quando utilizadas na estabilização de solos para pavimentos, aumentam a capacidade de suporte e a densidade dos solos, bem como a permeabilidade dos mesmos. As escórias utilizadas neste estudo foram curadas por um período de 3 meses. O autor considera que o teor ótimo de adição de escória é de 10%.

Gumieri (2002) cita várias obras experimentais realizadas no estado de Minas Gerais em que foram utilizadas escórias de aciaria como base e sub-base. Algumas obras onde não houve a preocupação com a cura do resíduo, o trecho construído apresentou excessiva expansão após algum tempo, todavia, outras obras apresentaram bom comportamento com relação à expansibilidade.

4.2 AGREGADOS EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Segundo Coomarasamy (1995), o uso de escórias de aciaria como agregado em misturas asfálticas quentes em pavimentação teve início em Ontário, em 1969. Mesmo que as escórias não tenham sido empregadas amplamente como os agregados convencionais, existem muitos casos de aplicação com sucesso em diferentes tipos de pavimentos.

Ali et al. (1999) estudaram cinco misturas asfálticas contendo escória de aciaria e compararam com três misturas asfálticas convencionais, comumente usadas na província Nova Scotia, Canadá. Os resultados laboratoriais mostraram que as misturas contendo agregados de escória de aciaria apresentaram características tais como, resistência mecânica, módulo de resiliência, resistência à derrapagem, deformação permanente, facilidade de compactação e fadiga; superiores às das misturas convencionais.

De acordo com Khan et al. (1998), as escórias de aciaria usadas em camadas asfálticas podem melhorar a qualidade e o desempenho de rodovias construídas na Arábia Saudita, onde o clima é muito árido e severo, os agregados calcários convencionais são de menor qualidade e o tráfego pesado de veículos é intenso. As camadas asfálticas executadas com misturas de escórias e agregados calcários apresentaram os melhores resultados, em comparação com as camadas executadas somente com escória ou calcário. Os autores afirmam que a utilização somente de escórias nas camadas asfálticas provoca segregação e dificuldade de mistura devido à alta densidade das escórias.

Segundo National Slag Association (2000), as escórias de aciaria têm se mostrado excelentes agregados para uso em misturas betuminosas. Com relação as suas características físicas, os revestimentos asfálticos produzidos com escória conferem maior resistência à derrapagem e resistência à deformação.

4.3 AGREGADOS EM CONCRETOS

O resfriamento lento da escória de alto-forno em grandes moldes de ferro viabiliza um produto que pode ser moído e graduado para se obter partículas densas e resistentes para uso como agregado (MEHTA e MONTEIRO, 1994). No entanto, as escórias de alto-forno, normalmente, sofrem um resfriamento brusco que viabiliza a sua utilização na indústria do cimento.

Em relação ao uso das escórias de aciaria como adição a concretos, poucas têm sido as pesquisas realizadas, mas mesmo assim indicam resultados contraditórios entre si. Algumas apontam à viabilidade do uso da escória curada, especialmente de aciaria elétrica, como um material potencial para utilização como adição, propiciando melhorias significativas nas propriedades mecânicas e durabilidade. Por outro lado, outras pesquisas indicam que seu uso acarreta diminuição de propriedades mecânicas (MASUERO, 2001).

Segundo Morino (1999), as escórias de aciaria dificilmente eram usadas como agregados no concreto, devido à deterioração causada pela hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio livres presentes nas escórias.

Entretanto, nos últimos anos, um aprofundado conhecimento sobre as propriedades das escórias têm possibilitado o aumento da aplicação das mesmas como agregados no concreto.

Louzada (1991) empregou escórias de aciaria LD e escórias de alto-forno como agregado em blocos de concreto. A resistência à compressão dos blocos apresentou valores inferiores à recomendação da norma estabelecida para blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural, entretanto, após um melhoramento no processo de cura dos blocos, houve uma considerável melhoria da resistência, viabilizando o uso das escórias em blocos de concreto.

Morino et al. (1999) estudaram concretos produzidos com 4 diferentes escórias oxidantes de aciaria elétrica, que sofreram um resfriamento brusco, semi-brusco e lento, e que tiveram a fração de ferro removida. Os resultados obtidos foram satisfatórios para a utilização das escórias oxidantes de aciaria elétrica como agregados, visto que a diferença entre a resistência à compressão do concreto com agregado de escória e do concreto com agregado de rocha não foi significativa.

Akinmusuru (1991) estudou escória de aciaria como agregado miúdo e graúdo em concretos, avaliando o desempenho mecânico e a durabilidade dos concretos quando comparado a um concreto de referência. Segundo o autor, a escória utilizada foi exposta ao ambiente por mais de três meses, na tentativa de minimizar futuras reações de hidratação dos óxidos. Os resultados dos concretos com escória foram superiores aos de referência.

No caso das escórias de cobre, Moura (2000) avaliou sua utilização como agregado miúdo no concreto e concluiu que com até 40% em volume de escória ocorre um melhor desempenho dos concretos, tanto no estado fresco (trabalhabilidade e massa específica) quanto endurecido (propriedades mecânicas, massa específica e durabilidade).

Escórias de ferro-cromo, obtidas a partir da produção de ligas de cromo de alto carbono, foram estudadas por Silva Filho (2001) como agregado graúdo em concretos. O autor concluiu que houve um melhor desempenho dos concretos com escória de ferro-cromo, quanto a resistência à compressão, para relações água/cimento mais baixas. Já para relações água/cimento maiores, observou o melhor desempenho dos concretos com agregado graúdo convencional.

De uma forma geral, as experiências realizadas com as escórias de aciaria como agregado, tanto graúdo quanto miúdo, em alguns casos beneficiadas por uma simples britagem, têm apresentado como resultado um bom desempenho para esta utilização, mesmo que os autores salientem que a escória utilizada já esteja exposta ao meio ambiente por um determinado tempo (MASUERO, 2001).

4.4 MATÉRIA-PRIMA PARA FABRICAÇÃO DE CIMENTO

Como matéria-prima para fabricação de cimento e como material cimentante no concreto, em geral, as escórias mais utilizadas são as escórias de alto-forno, em função de suas características físico-químicas reativas. Entretanto, a utilização das escórias de aciaria como material cimentante no concreto vem sendo bastante estudada, obtendo-se resultados satisfatórios.

4.4.1 Escória de alto-forno

As escórias de alto-forno finamente granulada, subproduto da manufatura do ferro-gusa num alto-forno, podem ser utilizadas como adição ao clínquer para fabricação do cimento Portland, devido a sua capacidade hidráulica.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o cimento Tipo IS, equivalente ao CP III-ABNT, deve consistir de uma mistura homogênea e íntima do cimento Portland e da escória de alto-forno de granulação fina no qual o componente escória tem entre 25 e 70% da massa do cimento Portland com escória de alto-forno.

Pode-se dizer que as escórias finamente moídas e em contato com a água são capazes de endurecer sozinhas. Contudo, a capacidade hidráulica das escórias se manifesta lentamente (CALLEJA, 1982).

A escória de alto-forno pode ser misturada com o cimento depois da moagem do clínquer ou junto com o clínquer, ou então ser vendida separadamente aos produtores de concreto, como material cimentício suplementar. Materiais misturados são mais comuns na Europa, enquanto o uso de escória como um ingrediente à parte prevalece na América do Norte (AÏTCINA, 2000).

A escória de alto-forno pode ser considerada um resíduo para o qual existe uma solução de reciclagem de caráter definitivo e satisfatório. Com efeito, a faixa de composição química desta escória de alto-forno corresponde àquela do cimento e, quando resfriada bruscamente, tem propriedades hidráulicas. Graças a isto, a utilização da escória de alto-forno na produção de cimento é feita há mais de 100 anos e é a aplicação predominante (KRÜGER, 1995).

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

Segundo Metha e Monteiro (1994), a produção de cimento com escória na Alemanha representa aproximadamente um quarto da produção total de cimento.

Para a escória ser utilizada como matéria-prima para fabricação do cimento Portland, mais importante que a sua composição química é a sua composição de fase vítrea, que, segundo Calleja (1982), deve ser superior a 95%, pois quanto maior a porcentagem de fase vítrea, mais hidráulica é a escória. Altas porcentagens de fase vítrea são alcançadas mediante o resfriamento rápido da escória, que pode ser através do ar ou água, de forma que os compostos da escória em equilíbrio na temperatura de fusão se mantenham em estado vítreo depois do resfriamento.

Segundo Calleja (1982), as vantagens de um resfriamento brusco da escória líquida são:

- a) aumento do conteúdo de fase vítrea e da hidraulicidade da escória;
- b) evita a transformação $B \rightarrow Y$ do silicato dicálcio (C_2S), que além de não ser hidráulico é expansivo ao sofrer hidratação;
- c) elimina completamente os compostos indesejáveis SH_2 e SO_2 ;
- d) a permanência do Mg em forma vítrea, ao invés de formar cristais expansivos ao se hidratarem. Obtendo-se assim, escórias reativas e estáveis.

Cimentos com escórias de alto-forno são muitas vezes vantajosos do ponto de vista da resistência ao ataque químico, pois ensaios realizados com argamassa com escória de alto-forno mostram que a permeabilidade à água é reduzida em até 100 vezes e que há uma grande redução da difusividade, especialmente com relação aos íons cloreto (NEVILLE, 1997).

John (1995) estudou a utilização de escória ativada por silicatos de sódio para produção de cimento. Neste estudo, o autor conclui que os cimentos de escória apresentam boas possibilidades de mercado, principalmente em aplicações em que não é recomendável o uso de cimento Portland, por exemplo, em matrizes de baixa alcalinidade para reforço com fibras sensíveis à alcalinidade.

4.4.2 Escória de aciaria

Masuro (2001) testou um método de estabilização da escória de aciaria elétrica quanto à expansibilidade com vistas a sua utilização como substituição ao cimento. O método de estabilização da escória consistiu em aquecê-la a uma temperatura de 1450° C e resfriá-la bruscamente em água corrente, o que gerava uma escória granulada. A incorporação da escória de aciaria granulada em argamassas na forma de substituição ao cimento, do ponto de vista mecânico, mostrou-se eficaz. O uso de teores até 50% não alterou o resultado de resistência à compressão.

Gumieri (2002) estudou a viabilidade técnica do uso das escórias de aciaria LD como adição em cimentos, propondo um método de estabilização por meio de granulação por resfriamento brusco destas escórias. O resfriamento brusco proporcionou a eliminação da expansão e o desenvolvimento das propriedades pozolânicas/cimentícias da escória granulada. Como adição em cimentos, do ponto de vista da resistência mecânica, as argamassa compostas com escórias granuladas e clínquer apresentaram níveis de resistência à compressão compatíveis com as especificações referentes ao cimento Portland composto, apesar destes resultados serem inferiores aos obtidos para as argamassas de referência.

Tüfekçi et al. (1997) utilizaram escória de aciaria como adição ao cimento nas proporções de 5 e 10%. O autor conclui que a resistência à compressão do concreto com escória de aciaria aumenta na medida que diminui a quantidade de escória no concreto, contudo, as escórias de aciaria podem substituir parcialmente o cimento, sem que diminua significativamente a resistência à compressão dos concretos.

De acordo com Sun et al. (1993), as escórias de aciaria podem ser consideradas como um clínquer de cimento Portland de baixa qualidade. Os cimentos produzidos com escórias de aciaria possuem um crescimento de resistência à compressão ao longo do tempo superior aos

cimentos convencionais; bem como um menor calor de hidratação; maior resistência à abrasão, pois contém mais ferro e magnésio que o clínquer; resistência à corrosão e ao congelamento; baixa expansibilidade e reduzida permeabilidade.

Monshi et al. (1999) estudaram o uso de escória de aciaria, escória de alto-forno e calcário (pedra calcária e calcário calcinado) na produção de cimento Portland. Foram selecionadas para estudo seis diferentes misturas que contêm em proporção escória de aciaria entre 6 e 27%, escória de alto-forno entre 34 e 54%, calcário calcinado entre 28 e 51% e pedra calcária entre 40 a 64%, sendo que os dois últimos materiais não foram utilizados juntos em nenhuma das misturas. Algumas misturas apresentaram boas propriedades mecânicas, dentre elas estavam as que continham tanto os baixos teores quanto os altos teores de escória de aciaria. Segundo o autor, este trabalho confirma o sucesso da produção do cimento Portland a partir da utilização de escória de aciaria, escória de alto forno e calcário.

Conforme Montgomery e Wang (1991), o cimento de escória de aciaria pode ser também produzido pela mistura com escória de alto-forno, admitindo a cal livre como ativador da escória de alto-forno, participando da formação do C-S-H, responsável pela resistência mecânica e, ao mesmo tempo, reduzindo a sua capacidade expansiva. Os autores constataram que são aceitáveis as propriedades mecânicas e as características físicas de um cimento composto com escória de aciaria, escória de alto-forno e gipsita nas proporções: 45%, 45% e 10%, respectivamente. Esse cimento apresentou baixa expansão: 0,10% aos 10 dias, 0,14% aos 14 dias, além de uma elevada resistência à compressão, quando comparado ao cimento Portland comum, que em um ano aumentou de 152% para 166%, com relação à resistência aos 28 dias (45,8 MPa aos 28 dias).

Segundo Sun et al. (1993), na China, onde comercialmente vem sendo produzido o cimento de escória de aciaria, é possível economizar, para cada tonelada deste cimento, 10 kwh de energia e 25 kg de carvão, quando comparado com a produção de cimento Portland comum.

5 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETOS

A expressão “durabilidade do concreto” é usualmente empregada para caracterizar, em termos gerais, a resistência do concreto ao ataque de agentes agressivos físicos e químicos. A natureza, a intensidade e os mecanismos implicados em cada um desses diversos ataques podem variar consideravelmente, e essa é a razão pela qual a expressão durabilidade do concreto é entendida como muito vaga (AÍTCIN, 2000a).

5.1 DEFINIÇÃO DE DURABILIDADE E VIDA ÚTIL

Segundo ACI Committee 201 (1992), durabilidade de concretos de cimento hidráulico é definida como a capacidade de resistir à ação da água, ataques químicos, abrasão, ou qualquer outro processo de deterioração. Concretos duráveis conservarão suas formas originais, qualidade, e capacidade de utilização quando expostos a estes ambientes.

É essencial que as estruturas de concreto desempenhem as funções que lhe foram atribuídas, que mantenham a resistência e a utilidade que delas se espera, durante um período de vida previsto ou, pelo menos, razoável. Portanto o concreto deve poder suportar o processo de deterioração ao qual se supõe que venha a ser submetido. Nestas condições o concreto é considerado durável (NEVILLE, 1997).

Nenhum material é inerentemente durável; como um resultado de interações ambientais, a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades dos materiais mudam com o passar do tempo. Admite-se que um material atingiu o fim da sua vida útil quando as suas propriedades sob dadas condições de uso deterioram a um tal ponto que a continuação do uso deste material é considerada como insegura, ou antieconômica (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Deve-se entender que a concepção de uma construção durável implica a adoção de um conjunto de decisões e procedimentos que garantam à estrutura e aos materiais que a compõem um desempenho satisfatório ao longo da vida útil da construção. Em termos de durabilidade das estruturas de concreto, e para além das questões ligadas à resistência mecânica propriamente dita, a palavra-chave relacionada ao material concreto é água. Assim,

será a quantidade de água no concreto e a sua relação com a quantidade de material aglomerante, o elemento básico que irá reger características como densidade, compacidade, porosidade, permeabilidade, capilaridade e fissuração, além de sua resistência mecânica. Em resumo, estes são os indicadores de qualidade do material, passo primeiro para a classificação de uma estrutura como durável ou não (SOUZA e RIPPER, 1998).

A durabilidade do concreto depende muito da facilidade com que as substâncias agressivas podem ingressar e se deslocar no seu interior (HELENE, 1993).

É de consenso de que a durabilidade de um concreto ou argamassa está diretamente ligada ao comportamento da rede de poros de seu interior, embora explicitamente entenda-se que outras variantes têm que estar esclarecidas. Sob o ponto de vista da porosidade, o que realmente interessa para que um concreto seja durável é a avaliação da intercomunicabilidade e a distribuição dos diâmetros e tamanhos dos poros (GRIGOLI et al., 2002).

Os problemas de durabilidade são freqüentemente causados por uma conjunção de fatores que incluem a falta de conhecimento do meio ambiente a que ficarão expostas as estruturas, especificações inadequadas e construção executada em desacordo com normas técnicas (PEREIRA, 2001).

Segundo CEB (1992), vida útil é o período de tempo em que a estrutura conserva os requisitos de projeto (segurança, estabilidade, funcionalidade e estética) sem exigir medidas extras de manutenção e reparo, incluindo nestes requisitos aspectos de durabilidade como as ações do meio ambiente entre as possíveis solicitações a que a estrutura estará sendo submetida.

Estimar a vida útil das estruturas de concreto armado é de fundamental importância para que se possa abordar, de forma quantitativa, a questão da durabilidade das estruturas (PEREIRA, 2001).

Um modelo simplificado de previsão da vida útil para as estruturas de concreto armado é proposto por Tuutti (1982), bastante utilizado em trabalhos relacionados à deterioração das estruturas, em função da sua extrema simplicidade descritiva, apesar de ser um modelo somente qualitativo. Este modelo considera que o processo corrosivo é dividido nas etapas de iniciação e propagação (figura 5.1).

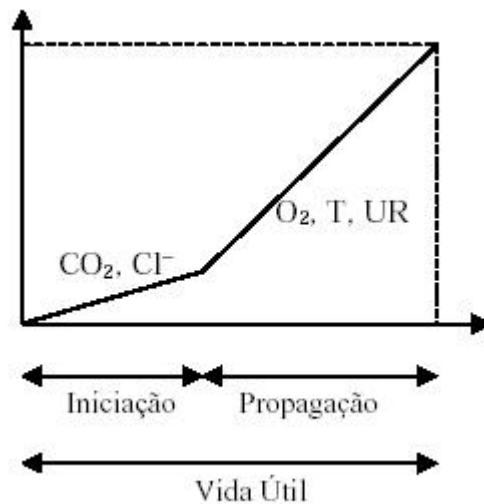


Figura 5.1: modelo de vida útil para estruturas atacadas pela corrosão de armaduras (TUUTTI, 1982)

Segundo este modelo, o período de iniciação corresponde ao intervalo de tempo necessário para que os agentes agressivos (Cl^- , CO_2) penetrem através do cobrimento do concreto até atingirem as armaduras, provocando a despassivação das mesmas, isto é, ocorre a quebra da camada protetora de Fe_2O_3 existente. Após a despassivação, tem início a fase de propagação, onde ocorre a dissolução do ferro (oxidação), gerando os chamados produtos de corrosão.

A duração do período de iniciação é caracterizada por um baixo grau de corrosão, sendo determinada pela velocidade com que a região do cobrimento é modificada pela concentração de agentes agressivos ou redução do pH. De acordo com Helene (1993), é o período de tempo necessário para que a frente de cloretos ou a frente de carbonatação atinja a armadura e a despassive.

A curva de predição da vida útil das estruturas não pode ser considerada de uma maneira tão simplista, em virtude da grande quantidade de fatores intervenientes nos processos de degradação. Considerando estes fatores, Mehta (1994) propõe uma nova forma de consideração da vida útil das estruturas, como pode ser observada na figura 5.2 (MEHTA, 1994, apud ANDRADE, 2001)⁵.

⁵ MEHTA, P. K. **Concrete Technology at the Crossroads - Problems and Opportunities**. In: Concrete Technology: Past, Present and Future, *Proceedings*, ACI SP-144, 1994.

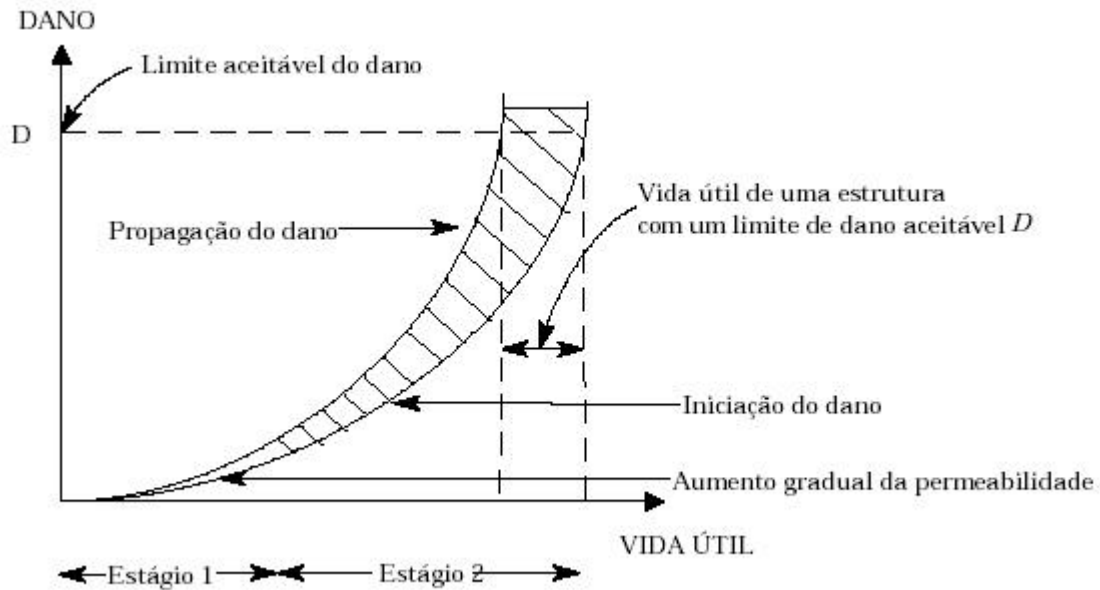


Figura 5.2: vida útil de estruturas de concreto (MEHTA, 1994)

A vida útil de uma estrutura não pode ser descrita como tendo uma forma linear, onde há uma clara tendência de comportamento (MEHTA, 1994).

As medidas necessárias para estimar a vida útil das estruturas são escolhidas levando-se em consideração as características dos materiais, as condições de exposição e os modelos de deterioração. Porém a determinação da durabilidade e da vida útil das estruturas é extremamente difícil de ser realizada devido ao sinergismo existente entre os diversos fatores que regem as várias formas de degradação (PEREIRA, 2001).

Segundo Helene (1993), Mehta (1992) concluiu que os engenheiros podem ainda não ser hábeis para prever a durabilidade, mas têm a possibilidade efetiva de prolongar a vida útil das estruturas de concreto através do uso adequado das informações existentes, muitas vezes esquecidas ou negligenciadas.

Aïtcin (2000a) completa que a abundância de informações e dados sobre a durabilidade do concreto não estão chegando às pessoas certas, pois existe uma falta de comunicação entre as três áreas: o pessoal de materiais, os projetistas e os engenheiros de obra. Essas pessoas freqüentemente não comparecem às mesmas reuniões ou aos mesmos seminários, eles não podem ler as mesmas publicações ou os mesmos trabalhos e, geralmente, eles não participam das mesmas comissões. Contudo, a despeito da abundante literatura sobre a durabilidade do concreto, deve-se admitir que existem poucos trabalhos técnicos ou científicos que possam ser lidos por aquelas três áreas e tratem da questão crucial: como se pode fazer, lançar e curar um

concreto durável que possa ser usado para construir, reparar ou reabilitar estruturas de concreto.

5.2 AGENTES DE DEGRADAÇÃO DO CONCRETO

A deterioração de estruturas de concreto armado pode ser originada por fatores externos ou por causas internas no próprio concreto.

As diferentes formas de deterioração podem ser físicas (efeitos de altas temperaturas ou de diferenças de coeficientes de dilatação térmica do agregado e da pasta de cimento hidratado e ação de congelamento e degelo), químicas (reações álcali-sílica e álcali-carbono; ação de íons cloretos, sulfatos ou dióxido de carbono; líquidos e gases) ou mecânicas (abrasão, erosão ou cavitação) (NEVILLE, 1997).

Considerando os mesmos agentes agressivos, Aïtcin (2000a) os classifica em duas grandes categorias: os agentes externos e os agentes internos. Dentre os agentes externos, podem ser citados os íons cloreto, o dióxido de carbono, os sulfatos, os ciclos de congelamento e degelo, fungos e bactérias e os abrasivos. Dentre os agentes internos podem ser citados os íons cloreto incorporados, quando são usados certos aceleradores, e os álcalis do cimento, quando são usados agregados potencialmente reativos.

Sob outro ponto de vista, Mehta e Gerwick (1982), apud Mehta e Monteiro (1994)⁶, classificaram as causas físicas da deterioração do concreto em duas categorias: desgaste superficial ou perda de massa devido à abrasão, erosão e cavitação; e fissuração devido a gradientes normais de temperatura e umidade, pressões de cristalização de sais nos poros, carregamento estrutural e exposição e extremos de temperatura tais como congelamento ou fogo. Do mesmo modo, os autores classificaram as causas químicas da deterioração em três categorias: (1) hidrólise dos componentes da pasta de cimento por água pura; (2) trocas iônicas entre fluidos agressivos e a pasta de cimento; e (3) reações causadoras de produtos expansíveis, tais como na expansão por sulfatos, reação álcali-agregado e corrosão da armadura no concreto.

⁶ P. K. Mehta e B. C. Gerwick, Jr., *Concr. Int.*, Vol 4, Nº 10, 1982.

A microestrutura do concreto é fortemente afetada por diversos fatores, incluindo composição química do cimento, relação água/cimento, tipo e quantidade de adições minerais e distribuição granulométrica dos materiais cimentícios e agregados, entre outros. Sendo assim, os concretos deveriam ser cuidadosamente dosados, na tentativa de melhorar a sua durabilidade (OH et al., 2002).

A durabilidade dos concretos e argamassas é fortemente influenciada pela penetração da água que, além de dissolver compostos presentes na pasta endurecida, pode ter sua fase hidratada atacada por agentes agressivos presentes na água (MASSAZA et al., 1993, apud MASUERO, 2001)⁷.

A penetração de íons cloreto na estrutura do concreto pode provocar a despassivação da armadura e gerar a formação de pilhas eletroquímicas, deflagrando a corrosão da armadura (RODOLPHO, 1999).

A penetração de íons cloreto é provavelmente o fenômeno mais devastador das estruturas construídas com concreto usual. Quando os íons cloreto penetram nas soluções intersticiais, podem reagir com o C₃A para formar monocloroaluminatos (3CaO Al₂O₃ CaCl₂ 10H₂O), que permitem modificar favoravelmente a microestrutura do concreto, ou, de forma mais devastadora, podem atingir as armaduras, corroendo-as muito rapidamente (AÏTCIN, 2000a).

Os cloretos podem estar presentes no concreto por terem sido incorporados na mistura por agregados contaminados, por água do mar ou água salobra, ou por aditivos com cloretos. Não deve ser permitido o uso de nenhum desses materiais no concreto armado, e as normas, geralmente estabelecem limites rigorosos para o teor total de cloreto no concreto, qualquer que seja a origem (NEVILLE, 1997). A norma brasileira NBR 6118 (1978) limita o teor máximo de cloretos em 500 mg/l em relação à água de amassamento, isto é, na ordem de 0,02% em relação à massa de cimento.

Segundo Kulakowski (1994), o teor de cloretos permitido no concreto é aquele tomado como o necessário para despassivar o aço, porém este limite não está bem estabelecido, uma vez que verifica-se certa divergência em normas de diversos países.

⁷ Massazza, F. et al. Capillary absorption and composition of pastes and mortars made with Portland and Pozzollanic cements. *Durability of Buildings Materials and Components*, 1993.

Segundo Helene (1993), os cloretos potencialmente agressivos encontram-se na natureza na forma dissolvida em água. Como cristal sólido não representa risco elevado para as estruturas pois não penetra na porosidade do concreto que tem dimensões muito mais reduzidas que a dos cristais usuais. No entanto, pode depositar-se por impactação na superfície do concreto e aí permanecer até que uma chuva o dissolva e o transporte para o interior de estrutura.

Andrade (1993) completa que quando o concreto está completamente saturado d'água, os cloretos penetram puramente por difusão, devido às diferenças de concentração, e quando o concreto está parcialmente saturado, os cloretos podem penetrar por absorção e por força de capilaridade (ANDRADE, 1993).

Helene (1993) considera que os cloretos podem penetrar no concreto endurecido através dos mecanismos clássicos de penetração de água e transporte de íons, quais sejam: *absorção capilar*, onde a penetração é função do diâmetro e da intercomunicação dos poros; *difusão*, quando há uma elevada diferença de concentração dos íons cloretos; *permeabilidade*, quando existe um gradiente de pressão e *migração de íons*, por ação de um campo elétrico.

5.3 PROCESSO DE TRANSPORTE DE FLUIDOS

São três os principais fluidos importantes para a durabilidade que podem ingressar no concreto: água pura ou com íons agressivos, dióxido de carbono e oxigênio (NEVILLE, 1997).

Os quatro tipos de mecanismos de penetração e transporte no concreto são: permeabilidade, absorção capilar, difusão e migração iônica, conforme figura 5.3. Os modelos matemáticos para previsão de vida útil das estruturas são baseados nos mecanismos de transporte de água, gases e agentes agressivos através da rede de poros do concreto, como a difusão (HELENE, 1993).

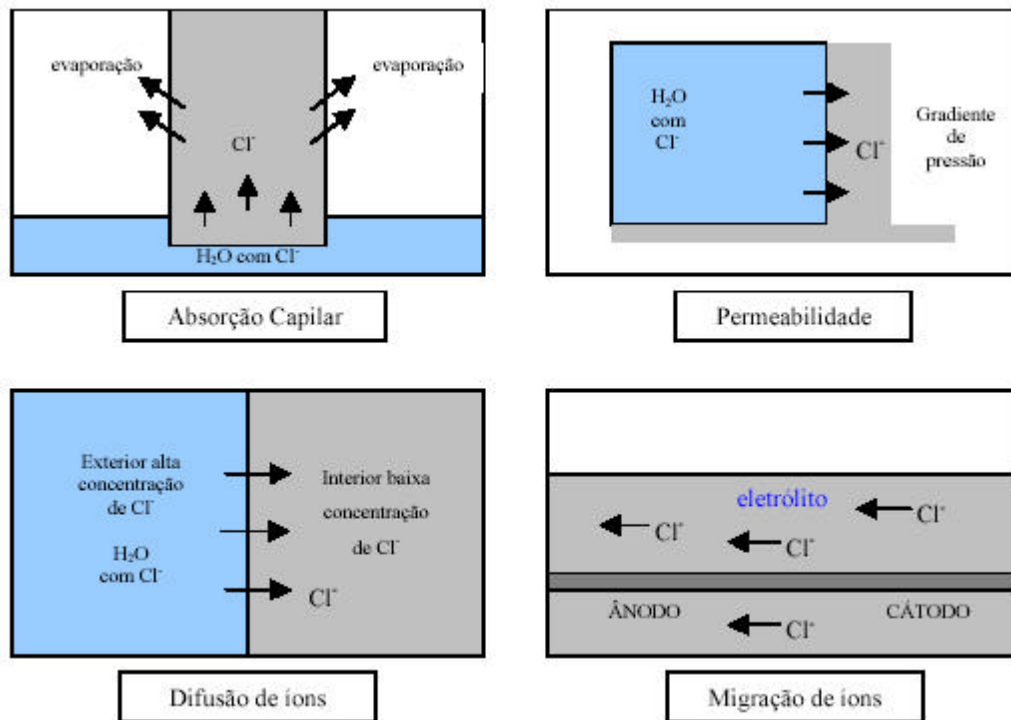


Figura 5.3: representação esquemática dos mecanismos de transporte de íons cloreto no concreto (HELENE, 1993)

Os mecanismos de transporte no concreto dependem ainda das características físicas e químicas e da concentração superficial das substâncias que penetram no material, das condições ambientais, do grau de umidificação do concreto e da temperatura (NEPOMUCENO, 1992).

Os cloretos penetram no concreto pela movimentação da água que os contém, bem como por difusão dos íons na água e por absorção. O ingresso prolongado e repetido pode, com o tempo, resultar em altas concentrações de íons cloreto junto à superfície da armadura (NEVILLE, 1997).

O transporte de cloretos resultante do processo de difusão (que ocorre devido ao gradiente de concentração), quando se considera o período de iniciação do processo de corrosão, segundo Tuutti (1982), depende dos seguintes parâmetros:

- concentração superficial de cloretos entre o ambiente e o concreto;
- distância de transporte, dependente da espessura de cobrimento;
- permeabilidade do concreto quanto a cloretos;

- d) capacidade do concreto de fixar cloretos (conteúdo de álcalis do cimento);
- e) concentração de cloretos na superfície do concreto.

A difusividade de íons cloreto depende da estrutura porosa do concreto, da temperatura, da umidade relativa, das interações eletrostáticas entre íons e as paredes dos poros e, também do consumo e composição química do cimento (HELENE, 1993).

Segundo Aïtcin (2000a), a relação água/aglomerante é o parâmetro principal que influencia a penetração de íons cloreto no concreto, devido ao refinamento da porosidade capilar. Em concretos com baixas relações água/aglomerante os cloretos são obrigados a difundir-se por caminhos mais tortuosos e desconectados.

5.3.1 Absorção de água por sucção capilar

Absorção capilar é o processo físico pelo qual o concreto preenche e retém água nos poros e condutos capilares devido à tensão superficial atuante nestes (PETRUCCI, 1987).

Segundo Neville (1997), existe uma diferença entre a absorção de água, que mede o volume de poros, e a facilidade com que o fluido pode penetrar no concreto. O ensaio de absorção de água por sucção capilar mede a velocidade da absorção capilar do concreto não saturado posto em contato com a água.

A absorção capilar de água pelo concreto tem relação direta com a sua porosidade; esta por sua vez é originada principalmente pela água em excesso utilizada na mistura, que após evaporar gera poros capilares de grande tamanho, e pelo ar aprisionado durante o lançamento do concreto, que gera os macroporos. São esses poros os principais responsáveis pelos mecanismos que regem a durabilidade das estruturas de concreto (ISAIA, 1995).

A temperatura e umidade do meio ambiente, o cimento e agregados utilizados, a dosagem e o processo de cura também influenciam na absorção de água por capilaridade pelo concreto (FRIZZO et al., 2002).

Ho e Lewis (1987) comentam que uma absorção lenta indica a existência de capilares de pequenos diâmetros com maior profundidade alcançada. Ferreira (1999) completa que se estes

poros forem muito pequenos, este fenômeno poderá provocar um acréscimo na profundidade de penetração, gerando o efeito conhecido como ascensão capilar. Já uma absorção rápida, indica a existência de capilares maiores com menor profundidade atingida e maior quantidade de água absorvida. Isto demonstra que, nas estruturas expostas ao ar, a taxa de absorção de água por absorção capilar serve como um indicativo do transporte de água no concreto.

Todavia, Helene (1993) constatou que o mais importante é a intercomunicabilidade dos capilares, sendo menos relevante o diâmetro desses, pois concretos de baixa relação água/cimento têm capilares de menor diâmetro e ao mesmo tempo muito menos intercomunicáveis, resultando em menor absorção de água e, também, menor profundidade de penetração dessa água.

A absorção capilar ocorre principalmente em concretos aparentes e naqueles em contato com solos úmidos e/ou sujeitos a ciclos de umedecimento. Com relação à penetração de íons cloreto, é o principal mecanismo quando a estrutura está submetida a ciclos de molhagem e secagem. No período de molhagem a superfície absorve rapidamente a solução de cloreto e, no período de secagem, a água evapora e o sal se deposita no concreto. Com os ciclos posteriores há um progressivo aumento da concentração de cloretos na solução dos poros do concreto. Dependendo da umidade relativa do ambiente, o sal reduz a evaporação, aumentando a umidade no interior do concreto, devido a sua higroscopicidade (KROPP, 1995).

A cura do concreto também influi na sua porosidade e conseqüentemente na absorção de água; concretos curados a 40°C têm o dobro da absorção capilar de água do que curados a 20°C (CAMARINI, 1999).

A penetração de água por sucção capilar irá depender da massa específica da água e sua tensão superficial, do raio capilar, suas intercomunicações e do grau de saturação do concreto. Deve ser considerado o maior ou menor grau de saturação do concreto, ou seja, não pode haver absorção capilar em concretos saturados, obrigatoriamente o concreto deve estar com os poros secos ou parcialmente secos para que possam absorver água por capilaridade (FERREIRA, 1999).

5.3.2 Permeabilidade

A permeabilidade pode ser definida como a facilidade com que um fluido pode escoar através de um sólido, sob um gradiente de pressão externa, sendo determinada pela continuidade e tamanho dos poros na estrutura do sólido (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Neville (1997), permeabilidade se refere ao escoamento de um fluido através de um meio poroso. No caso do concreto, o deslocamento dos diversos fluidos se efetua não somente por escoamento através do meio poroso, mas também por difusão e absorção.

A permeabilidade do concreto à água depende principalmente da relação água/cimento (que determina o tamanho, volume e continuidade dos espaços capilares) e da dimensão máxima do agregado (que influencia as microfissuras na zona de transição entre o agregado graúdo e a pasta de cimento) (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A permeabilidade do concreto não é uma função simples da porosidade, mas depende também das dimensões, distribuição, forma, tortuosidade e continuidade dos poros (NEVILLE, 1997).

A cura afeta sensivelmente a porosidade, uma vez que se a superfície do concreto secar prematuramente, cria um gradiente de dessecação interna, enquanto as reações não estiverem suficientemente adiantadas. A influência da cura aumenta com a relação a/c e diminui com o teor de cimento (ISAIA, 1995).

É de consenso entre os autores Mehta e Monteiro (1994) e Neville (1997) que a permeabilidade do concreto depende da relação água/cimento e que os agregados exercem influência sobre a permeabilidade do mesmo. Já quanto à comparação entre a permeabilidade de uma pasta de cimento endurecida e a de um concreto contendo uma pasta com igual relação água/cimento, os autores só concordam na teoria que a permeabilidade do sistema diminuiria com a adição de agregados com baixa permeabilidade, visto que as partículas de agregado interceptariam os canais de fluxo dentro da matriz da pasta de cimento, pois na prática, segundo Mehta e Monteiro (1994), a adição de agregados a uma pasta de cimento ou argamassa aumenta consideravelmente a permeabilidade devido as microfissuras que estão presentes na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento. Contrapondo os estudos práticos de Mehta e Monteiro (1994), Neville (1997) afirma que a presença de agregados com baixa permeabilidade reduz a área efetiva de escoamento, além de tornar mais longo o

caminho percorrido pelo líquido ao ter que contornar as partículas de agregado, de modo que pode ser considerável o efeito do agregado na redução da permeabilidade.

Em uma pasta endurecida de cimento, o tamanho e continuidade dos poros a qualquer ponto durante o processo de hidratação irão controlar o coeficiente de permeabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Neville (1997), o escoamento em poros capilares segue a lei de Darcy para fluxo laminar através de meio poroso:

$$\frac{dq}{dt} \frac{1}{A} = \frac{K_1 \rho g}{n} \frac{h}{L} \quad (\text{equação 5.1})$$

Onde:

dq/dt = velocidade de escoamento da água em m^3/s ;

A = área da seção transversal do elemento, m^2 ;

h = diferença de altura da coluna hidráulica através do elemento, m ;

L = espessura do elemento, m ;

n = viscosidade dinâmica do fluido, $N.s/m^2$;

ρ = massa específica do fluido, kg/m^3 ;

g = aceleração da gravidade, m/s^2 .

O coeficiente K' é expresso em metros ao quadrado e representa a *permeabilidade intrínseca* do material, qualquer que seja o fluido. Como, geralmente, o fluido é a água, pode-se escrever:

$$K = \frac{K_1 \rho g}{n} \quad (\text{equação 5.2})$$

O coeficiente K é expresso em metro conhecido como *coeficiente de permeabilidade* do concreto, subentendendo-se que se refere à água a temperatura ambiente. Este último atributo ocorre do fato de que a viscosidade da água varia com a temperatura. A equação do escoamento pode então ser escrita:

$$\frac{dq}{dt} \frac{1}{A} = K \frac{h}{L} \quad (\text{equação 5.3})$$

e, quando se atinge um regime estável de escoamento, K é determinado diretamente.

A água adicionada ao concreto é indiretamente responsável pela permeabilidade da pasta endurecida de cimento porque o seu teor determina primeiramente o espaço total e, após, o espaço vazio, depois que a pasta for consumida pelas reações da hidratação do cimento ou evaporação para o ambiente (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

5.3.3 Difusão de Íons

A difusão pode ser entendida, segundo Silva Filho (1994), como o mecanismo pelo qual o fluido se movimenta em função da existência de um diferencial de potencial químico (o fluxo da substância que difunde tende a igualar as concentrações) ou de um gradiente de temperatura/umidade e, ao contrário dos mecanismos de transporte anteriores, não depende do fluxo de fluidos. Durante o fenômeno, a substância se difunde em uma direção de forma a igualar as concentrações, eliminando o gradiente. Quando o gradiente se mantém através da entrada e saída contínua da substância no sentido do extremo de maior concentração para o de menor, obtém-se um fluxo contínuo, ou também chamado estado estacionário.

Este fenômeno da difusão ocorre tanto para substâncias presentes em meio líquido como para aquelas em meio gasoso.

Além da difusão dos gases, íons de caráter agressivo, particularmente cloretos e sulfatos, se deslocam por difusão na água dos poros. É nessa água que ocorrem as reações com a pasta de cimento hidratado de modo que a *difusão iônica* é importante com relação ao ataque por sulfatos ao concreto e ao ataque por cloretos à armadura. A difusão iônica é mais efetiva

quando os poros da pasta de cimento hidratado estão saturados, mas também podem ocorrer em concretos parcialmente saturados (NEVILLE, 1997).

O transporte de íons cloreto por difusão trata-se do deslocamento dos sais presentes na região superficial do concreto, que são provenientes de águas contendo cloretos, para o seu interior, ou seja, a região de menor concentração (NEVILLE, 1997).

O coeficiente de difusão depende de vários fatores. Alguns já foram citados acima, tais como o tipo de cimento; a incorporação de adições no concreto; e o grau de saturação dos poros. Pode-se citar também a porosidade, a natureza do líquido que difunde, a temperatura, a relação água/cimento e o tipo de cátion presente na solução do poro (HELENE, 1993). De acordo com Neville (1997), o aumento da relação água/cimento pode representar um aumento da difusividade, porém esta influência é bem menor no processo de difusão do que nos outros mecanismos de penetração de cloretos.

Segundo Neville (1997), a função da difusão que se aplica ao vapor de água e ao ar pode ser expressa pela primeira lei de Ficker:

$$J = -D \frac{dc}{dL} \quad (\text{equação 5.4})$$

Onde:

dc/dL = gradiente de concentração kg/m^4 ou moles/m^4 ;

D = coeficiente de difusão, m^2/s ;

J = velocidade de transporte de massa, $\text{kg/m}^2.\text{s}$ ou $\text{moles/m}^2.\text{s}$;

L = espessura do elemento, m ;

Mesmo a difusão se fazendo apenas através dos poros, os valores de D e L se referem à seção transversal do elemento de concreto; assim, D é, na realidade, o *coeficiente de difusão efetivo*.

Para que ocorra a difusão iônica no concreto é necessário um certo teor mínimo de umidade, que permita a movimentação do íon, assim quando o mesmo encontra em seu caminho uma região seca a difusão é interrompida. A difusão iônica é mais efetiva quando os poros da pasta

de cimento hidratado estão saturados, mas também ocorre em concretos parcialmente saturados (NEVILLE, 1997).?

5.3.4 Migração de Íons

O mecanismo de migração é um processo de transporte forçado de íons pela ação de um campo elétrico. Este campo elétrico pode ser oriundo da deflagração de pilhas de corrosão eletroquímicas ou de uma diferença de potencial gerada por uma fonte externa (HELENE, 1993).

A ação de um campo elétrico, como aquele gerado pelas células de corrosão eletroquímica, pode transportar e concentrar íons, por migração (FERREIRA, 1999).

O transporte de massa, neste caso, obedecerá a lei de Faraday (HELENE, 1993), descrita na equação 5.5.

$$m = \frac{a t i}{F n} \quad (\text{equação 5.5})$$

Onde:

m = massa do metal corroído, em g;

i = corrente elétrica em A;

t = tempo em s;

a = massa atômica;

n = valência dos íons do metal;

F = constante de Faraday (96.493C).

Se a absorção de água atingir a saturação dos poros do concreto, substâncias agressivas dissolvidas na água poderão ser transportadas para dentro do concreto, por migração de íons (CEB, 1992).

5.4 DURABILIDADE DE CONCRETOS COM ESCÓRIAS

Cimentos produzidos com escórias de alto-forno apresentam uma durabilidade superior, em termos de resistência aos sulfatos e aos ambientes ácidos, assim como profundidade de penetração de água reduzida, quando comparado ao cimento Portland (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Acredita-se que o aumento da durabilidade dos concretos com escória de alto-forno é resultante de uma estrutura refinada de poros e da reduzida quantidade de hidróxido de cálcio na pasta endurecida de cimento. Subseqüentemente, o volume anteriormente ocupado pelo hidróxido de cálcio é também preenchido pelos produtos de hidratação, resultando um material menos permeável (DOUGLAS, 1987).

Considerando que em termos de durabilidade é mais importante considerar a distribuição do diâmetro dos poros, para uma mesma relação água/cimento, comparativamente ao cimento Portland, o cimento com escória de alto-forno tem um volume total de poros maior. No entanto, se considerada a distribuição do diâmetro dos poros, com a evolução da hidratação, a diminuição do volume de poros maiores e conseqüente aumento do volume de poros menores é muito mais acentuada para o cimento com escória (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Através das técnicas de intrusão de mercúrio, estudos têm demonstrado que a incorporação de escórias de alto-forno granuladas em pastas de cimento ajudam na transformação dos grandes poros da pasta em pequenos poros, reduzindo assim, a permeabilidade da matriz e, conseqüentemente, do concreto (MALHOTRA, 1987).

A incorporação de escórias de alto-forno granuladas de até 75% na substituição de cimento apresenta um desempenho satisfatório quando exposto à água do mar (MALHOTRA, 1987).

De acordo com Neville (1997), a adição de escória de alto-forno ao concreto reduz bastante a permeabilidade do concreto à água, bem como a difusividade, principalmente a íons cloreto. Estes efeitos são atribuídos à microestrutura mais densa da pasta de cimento hidratada, devido ao preenchimento dos poros por C-S-H. Por outro lado, Bauer (1995) concluiu que a adição de escória de alto-forno no concreto aumenta a absorção capilar.

Bauer (1995) em seus estudos, no que se refere ao desempenho da adição de escória de alto-forno ao cimento, no caso do ingresso de cloretos, constatou o efeito benéfico da capacidade

de fixação de cloretos. Já quanto à absorção capilar, os resultados mostraram que os valores encontrados para os cimentos com escórias foram superiores aos encontrados para os cimentos sem escórias, sendo que a absorção aumenta conforme aumenta a relação água/cimento.

Oh et al. (2002) estudaram a resistência à penetração de cloretos de concretos de alto-desempenho contendo escória de alto-forno nas proporções 0, 12,5 e 25% em massa. Os resultados mostraram que a substituição de cimento por escória de alto-forno diminui a permeabilidade aos íons cloreto. O concreto contendo 25% de escória de alto-forno apresentou 1/3 da penetração de cloretos do concreto referência (0%), sendo que a resistência à compressão de ambos concretos foi praticamente a mesma. O autor afirma que isto se deve ao fato de que as reações químicas secundárias da escória de alto-forno contribuem para a densificação da microestrutura do concreto.

Jau et al. (1998) avaliaram o desempenho, em termos de difusão de cloretos, de concretos com escória de alto-forno frente à ação da água do mar. Foram utilizados teores de substituição de cimento por escória de alto-forno de 0, 10, 20, 30 e 50% e relação água/cimento de 0,48 e 0,60. Os concretos foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura. Os concretos com teores de substituição de 10 e 20% apresentaram valores de coeficiente de difusão menores que o concreto referência (0%), sendo que o teor de 20% apresentou o menor coeficiente. O autor justifica que as reações pozolânicas da escória modificam a estrutura de poros do concreto, transformando poros grandes em pequenos, e reduzindo o volume total de poros.

Polder et al. (2002) estudaram a resistividade de concretos com escória de alto-forno, sendo que o cimento utilizado continha 75% escória de alto-forno. A resistividade encontrada para este concreto com escória de alto-forno foi cerca de três vezes maior que a encontrada para o concreto de referência, que utilizou somente cimento Portland comum. A difusão de cloretos para o concreto com escória também foi menor que para o concreto referência. Este experimento concluiu que concretos com escórias de alto-forno apresentam menor penetração de cloretos, menor probabilidade de corrosão e maior resistividade elétrica que concretos com cimento Portland comum.

Türkmen (2003) estudou concretos com a substituição de cimento por escória de alto-forno, nas proporções de 20 e 40%, e sílica ativa, na proporção de 10%. Os concretos receberam

uma cura diferenciada até os 28 dias, sendo curados ao ar nas primeiras 24 horas, imersos em água com cal por 13 dias e curados por 14 dias em ambiente com umidade 75-80% e temperatura 30°C. Após os 28 dias, uns corpos-de-prova foram curados em água com cal até 400 dias e outros em soluções 5%NaCl, 5%MgSO₄ e 5%Na₂SO₄. A durabilidade aos efeitos corrosivos dos concretos com escória de alto-forno (20 e 40%) mais sílica ativa (10%) foi maior do que a dos concretos somente com sílica ativa (10%) e cimento comum. A durabilidade dos concretos diminuiu com o aumento da relação água/cimento e diminuiu com o aumento da proporção de adições minerais. O autor completa que o uso de escória de alto-forno e sílica ativa aumenta a durabilidade e a resistência mecânica dos concretos.

Bakharev et al. (2003) avaliaram a resistência ao ataque ácido de concretos com escória de alto-forno ativada com silicato de sódio ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2$, porcentagem de $\text{Na}_2\text{O} = 14.7$, porcentagem de $\text{SiO}_2 = 29.4$) e hidróxido de sódio. Os concretos foram expostos às soluções ácidas por 2 meses. O desempenho dos concretos com escória foi melhor do que o concreto com cimento comum, tendo uma redução de resistência mecânica de 47% para o concreto de cimento comum e 33% para o concreto com escória.

Masuero (2001) avaliou a durabilidade de argamassas de cimento com a incorporação de escória de aciaria elétrica granulada, através da absorção capilar e do ataque por íons cloreto, entre outros. Quanto ao ensaio de sucção capilar, o teor de substituição não influencia na taxa de absorção, podendo ser empregado até 50% sem prejuízo no desempenho quanto à absorção de água. Quanto ao ataque por cloretos, houve uma diminuição no coeficiente de difusão das argamassas com escória, principalmente para os teores mais elevados de escória.

Assim como as escórias utilizadas como substituição ao cimento melhoram a durabilidade dos concretos, as escórias utilizadas como agregados miúdo e graúdo também apresentam este comportamento.

Moura (2000) realizou ensaios de absorção por sucção capilar ao estudar concretos onde substituiu parte de agregado miúdo por escória de cobre. Ele observou que a utilização de escória de cobre melhorou o desempenho dos concretos. A taxa de absorção diminuiu e a resistência capilar aumentou, em relação aos concretos de referência.

Silva Filho (2001) estudou a absorção de água por sucção capilar de concretos produzidos com agregados de escória de ferro-cromo. O autor conclui que apenas a relação água/cimento

exerce efeito significativo na taxa de absorção dos concretos, sejam eles produzidos com agregado convencional ou agregado de escória.

No caso das escórias de fundição, não foi encontrado pesquisas que avaliassem a durabilidade de concretos produzidos com tais escórias.

6 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O planejamento experimental permite maior eficiência em termos de informação do que qualquer outra seqüência de ensaios não estruturada. Também possibilita a otimização de custos, viabilizando o projeto tanto do ponto de vista econômico quanto técnico, assegurando maior confiabilidade na interpretação final do comportamento do material em estudo. O uso de projeto de experimentos permite que se estruture a seqüência de ensaios, de modo a traduzir da melhor forma possível os objetivos pré-estabelecidos pelo pesquisador (RIBEIRO e CATEN, 2000).

O planejamento estatístico do experimento teve início com a definição de vários aspectos relacionados ao desenvolvimento do experimento, dentre eles a escolha das variáveis de resposta e dos fatores controláveis, da aleatorização da execução do experimento, do número de corpos-de-prova a serem concretados, entre outros. Após a definição destes fatores foi realizado, então, o planejamento dos ensaios de durabilidade dos concretos produzidos.

A execução dos experimentos foi desenvolvida parte no LEME (Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais) e parte no NORIE (Núcleo Orientado para Inovação da Edificação), ambos da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

6.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA

As variáveis de resposta consideradas para avaliar a durabilidade dos corpos-de-prova de concreto com escória granulada de fundição (EGF) são as seguintes:

- a) absorção capilar de água; e
- b) penetração de íons cloreto.

Neste projeto experimental, as variáveis de resposta priorizadas foram algumas das propriedades relacionadas com a durabilidade dos concretos produzidos com escória granulada de fundição (EGF), visto que as propriedades mecânicas dos mesmos concretos produzidos com escória granulada de fundição já foram estudados por Ceccatto (2003) no seu projeto de pesquisa de mestrado.

De um modo geral, os pesquisadores realizam ensaios de resistência mecânica juntamente com os ensaios de durabilidade na tentativa de investigar a existência de uma correlação entre as propriedades mecânicas e de durabilidade. Mesmo que este projeto de pesquisa não tenha realizado ensaios de resistência mecânica, esta investigação é possível pois a produção dos concretos para este projeto foi realizada juntamente com o projeto de Ceccatto (2003), sendo que os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de durabilidade foram retirados da mesma betonada que os corpos-de-prova utilizados nos ensaios mecânicos de Ceccatto (2003).

6.2 ESCOLHA DOS FATORES CONTROLÁVEIS

As variáveis controláveis escolhidas para avaliar a durabilidade dos concretos com EGF foram:

- a) teores de substituição de cimento por EGF (0, 10, 30 e 50%), em volume;
- b) relações água/aglomerante (0,40; 0,55 e 0,70).

A escolha dos valores dos teores de substituição de cimento por EGF foi baseada na faixa de variação de 6 a 34% para teor de escória de alto-forno, que compõe o cimento Portland composto com escória (CP II-E), estipulada pela NBR 11578 (1991). Considerando que não foi encontrado na literatura estudos realizados com EGF em concreto, optou-se por aumentar a faixa de variação, chegando a um teor máximo de 50% de substituição de EGF, para que fosse possível analisar mais amplamente as potencialidades do resíduo em estudo. Cabe ressaltar que este estudo não teve como objetivo concluir a existência de um valor ideal para teor de substituição de EGF e, sim, encontrar uma faixa ideal de substituição que viabilizasse o uso do resíduo como material cimentante.

Segundo Hoppe Filho et al.(2002), diversos estudos atuais sobre concreto estrutural apontam a substituição crescente de cimento Portland por escórias em níveis de até 90% (SASATANI et al., 1995; SATO et al., 1998 e NAKAMOTO et al., 1998), sendo que estes trabalhos mostram o grande potencial que estas adições minerais apresentam quando substituem igual massa de cimento sem efeitos colaterais nocivos para a durabilidade do concreto, desde que as misturas sejam devidamente dosadas.

6.3 METODOLOGIA

A metodologia deste projeto segue as etapas descritas a seguir, desde a amostragem e beneficiamento da escória granulada de fundição até os materiais e métodos utilizados.

6.3.1 Amostragem da Escória Granulada de Fundição (EGF)

Durante dois meses foram coletadas amostras de EGF para realização de análise química, a fim de verificar a variabilidade do processo de geração deste resíduo. As amostras de escória de fundição coletadas são procedentes de uma mesma empresa que opera com um forno tipo cubilô. Conforme a tabela 6.1, a variabilidade da composição química das amostras de EGF é baixa. Sendo assim, partiu-se para a realização da amostragem representativa do resíduo em estudo.

Tabela 6.1: composição química das amostras de EGF

Composição química						
Elementos	Amostras					
	1	2	3	4	5	6
CaO	19,4	20,1	19,5	19,5	20,5	20,0
SiO ₂	49,2	49,2	49,8	50,2	49,0	48,7
Al ₂ O ₃	12,1	10,1	10,3	10,6	9,9	10,1
MnO	3,3	3,7	3,7	3,6	3,8	3,8
FeO	3,7	4,7	4,6	4,0	4,8	5,3
CaF ₂	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
S	0,66	0,70	0,64	0,65	0,66	0,65
Cr ₂ O ₃	0,18	0,16	0,19	0,19	0,19	0,20
P ₂ O ₅	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
MgO	10,6	10,4	10,7	10,6	10,6	10,6
K ₂ O	0,67	0,64	0,68	0,68	0,59	0,58
Na ₂ O	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
TiO ₂	0,92	0,90	0,84	0,89	0,84	0,87

Durante a produção do ferro fundido, a escória é vazada com uma temperatura aproximada de 1500°C em um canal com água corrente, gerando uma escória de estrutura amorfa devido ao seu resfriamento brusco, como mostra a figura 6.1 (a).

O material coletado durante a amostragem foi resultante de aproximadamente 33 cargas do forno cubilô de dois diferentes dias, totalizando aproximadamente 200 kg de amostra de EGF.



(a)



(b)

Figura 6.1: (a) vazamento da escória de fundição e (b) remoção da escória granulada de fundição após resfriamento

Na figura 6.1 (b), a amostragem da escória foi realizada com o auxílio de uma pá diretamente no canal com água corrente, onde a escória adquire temperatura adequada para manuseio.

Após a amostragem representativa da escória, procedeu-se a secagem em estufa deste material e quarteamento do mesmo até obter o volume necessário à realização dos ensaios do programa experimental.

6.3.2 Beneficiamento da Escória Granulada de Fundição (EGF)

A EGF sofreu um processo de beneficiamento (moagem) com o objetivo de diminuir o tamanho do grão da amostra (item 6.3.3.2.1), para que assim estivesse em condições adequadas para sua utilização como substituição ao cimento em concretos.

A moagem foi realizada em moinho de bolas de alumina, marca SERVITECH, modelo ST242, composto por dois jarros, com capacidade de 1000 ml cada. Foi utilizado em cada jarro 750 gramas de bolas para cada 500 gramas de EGF. Para este equipamento foram selecionados cinco diferentes tempos de moagem, 40, 60, 80, 100 e 120 minutos. Para cada

tempo de moagem, foi determinada a granulometria a laser da escória, que encontra-se no Anexo 1, com o objetivo de conhecer suas características físicas, obtendo assim, parâmetros para a escolha da finura mais adequada para utilização neste trabalho.

Considerando que a NBR 12653 (1992), que classifica materiais pozzolânicos, estabelece como exigência física um valor máximo de 34% de material retido na peneira 45 μm , o tempo escolhido para o projeto experimental foi o de 40 minutos, pois satisfaz a norma apresentando uma porcentagem de 31,21%. Através da análise granulométrica também foi determinado o tamanho médio dos grãos de 26,40 μm para o tempo de 40 minutos. Esta análise granulométrica foi determinada com um granulômetro a laser, CILAS, modelo 1064, do Laboratório de Processamento de Minerais (LAPROM), do Centro de Tecnologia da UFRGS.

O aspecto da EGF antes e depois da moagem pode ser observada na figura 6.2 (a) e (b).

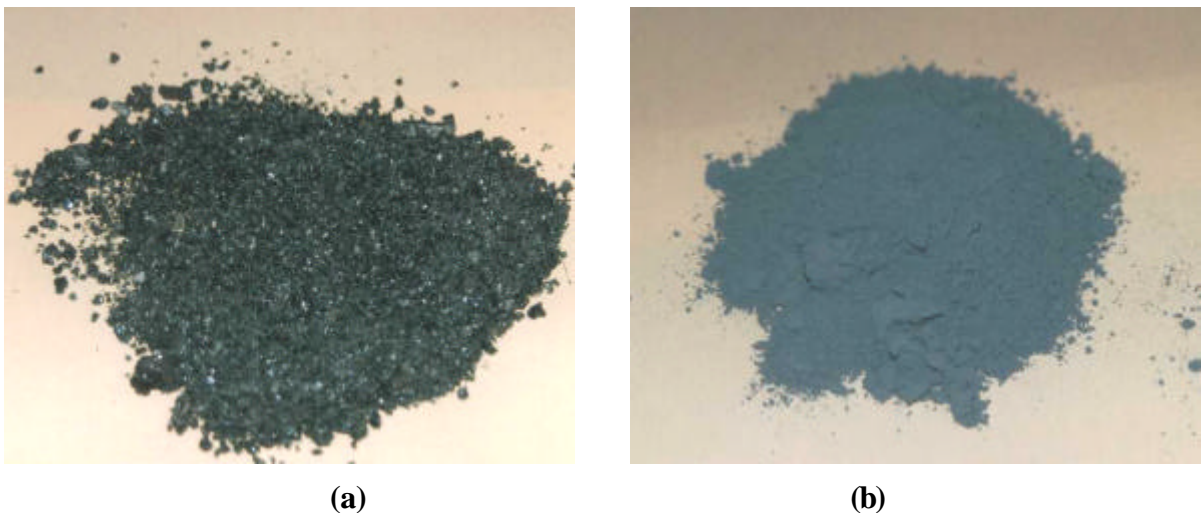


Figura 6.2: (a) amostra de escória granulada de fundição não beneficiada e (b) moída durante 40 minutos

Na tentativa de aumentar a produção de escória beneficiada, já que a capacidade de produção do moinho escolhido para o experimento é baixa (cerca de 500 g a cada 40 minutos), foi verificada a possibilidade de utilização de um moinho de bolas com maior capacidade, aproximadamente 7,5 litros. Após 3 horas de tempo de moagem, utilizando-se uma relação de aproximadamente 8kg de bolas para 2kg de escória, foi verificado que a eficiência do moinho de maior capacidade era muito baixa, pois ainda existiam partículas grosseiras de escória, o

que inviabilizava a utilização de tal equipamento para beneficiamento da escória granulada de fundição.

6.3.3 Materiais utilizados

Neste item estão descritos os materiais utilizados no projeto experimental, bem como suas características físicas e químicas, entre outras.

6.3.3.1 Cimento

O cimento escolhido para este experimento foi o CP II-F (Cimento Portland Composto com Filler), classe 32, que pode conter no máximo 10% de adição de filler, segundo NBR 11578 (1991), em função de ser um cimento praticamente puro, o que é importante na avaliação de novos materiais, já que certas adições presentes em cimentos compostos poderiam mascarar os resultados. A tabela 6.2 apresenta as características físicas e químicas do cimento utilizado CP II-F, conforme dados do fabricante.

Tabela 6.2: características físicas e químicas do cimento CP II-F 32

Características físicas		
Massa específica (g/cm ³)		3,11
Resíduo # 325 (%)		15,49
Expansibilidade a quente (mm)		0,00
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	25,90
	7 dias	31,70
	28 dias	39,70
Tempo de Pega (minutos)	Início	196
	Fim	285
Características químicas		
Principais Compostos		Resultados (%)
CaO		64,40
SiO ₂		19,88
Al ₂ O ₃		4,42
SO ₃		2,80
Fe ₂ O ₃		2,73
MgO		2,01
Na ₂ O		0,01

K ₂ O	0,71
CaO Livre	0,92
Perda ao Fogo	4,85
Resíduos Insolúveis	0,67

Fonte: dados fornecidos pelo fabricante

O cimento empregado CP II-F, classe 32, apresenta área específica de 3650 cm²/g, determinada através do método Blaine (NBR NM 76/1998) pelo laboratório da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland); e tamanho médio dos grãos igual a 16,67 um, determinado com o auxílio de granulômetro a laser, CILAS, modelo 1064, do Laboratório de Processamento de Minerais (LAPROM), do Centro de Tecnologia da UFRGS.

6.3.3.2 Escória Granulada de Fundição (EGF)

A escória granulada de fundição (EGF) em estudo neste trabalho foi caracterizada quanto as suas propriedades físicas, químicas, estrutural e ambiental, bem como avaliada quanto ao seu índice de pozolanicidade.

6.3.3.2.1 Caracterização Física

Inicialmente, a EGF foi caracterizada fisicamente no seu estado não beneficiado quanto a sua composição granulométrica, dimensão máxima característica e módulo de finura, segundo a NBR 7217 (1987), massa específica, segundo NBR 9776 (1987), e massa unitária, segundo NBR 7251 (1982). Na tabela 6.3 está apresentada a caracterização física da EGF não beneficiada.

Tabela 6.3: composição granulométrica e características físicas da EGF não beneficiada

Peneira (mm)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)
4,8	1	1
2,4	23	24
1,2	49	73
0,6	18	91
0,3	5	96
0,15	3	99
< 0,15	1	100
Dimensão máxima característica (mm)		4,80
Módulo de finura		3,84
Massa específica (g/cm ³)		2,769
Massa unitária (g/cm ³)		1,314

A EGF também foi caracterizada fisicamente em seu estado beneficiado (moído) quanto a sua massa específica, segundo a NBR 6474 (1984). A superfície específica da EGF beneficiada foi determinada pelo laboratório da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), segundo NBR NM 76 (1998), bem como o seu tamanho médio dos grãos pelo Laboratório de Processamento de Minerais (LAPROM), do Centro de Tecnologia da UFRGS, através de granulômetro a laser, CILAS, modelo 1064. A tabela 6.4 apresenta as características físicas da EGF beneficiada.

Tabela 6.4: características físicas da EGF beneficiada

Características físicas	Resultado
Massa específica (g/cm ³)	2,830
Superfície específica (cm ² /g)	2280
Tamanho médio dos grãos (um)	26,40

6.3.3.2.2 Caracterização química e estrutural

A composição química da EGF foi obtida através de fluorescência de Raios X utilizando o equipamento marca PHILIPS, modelo Simultâneo 2600. O valor de óxido de cálcio livre (CaO livre) foi determinado segundo a NBR 7227 (1989) pelo Laboratório de Siderurgia (LASID), do Centro de Tecnologia da UFRGS. O ensaio de perda ao fogo foi realizado

segundo a NBR 5743 (1977). Na tabela 6.5 encontram-se os resultados da composição química, do óxido de cálcio livre e de perda ao fogo da EGF.

Tabela 6.5: características químicas da EGF

Características químicas	
Principais Compostos	Resultados (%)
SiO ₂	49,20
CaO	21,78
MgO	11,00
Al ₂ O ₃	10,68
Fe ₂ O ₃	2,97
MnO	2,81
V ₂ O ₅	0,67
TiO ₂	0,67
S	0,64
Cr ₂ O ₃	0,05
P ₂ O ₅	0,02
CaO Livre	0,03
Perda ao Fogo	0,82
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	62,85
(CaO) / (SiO ₂)	0,4427

Pode-se observar que a EGF atende as especificações da NBR 12653 (1992) para classificação de materiais pozolânicos Classe E quanto ao somatório das porcentagens de SiO₂, Al₂O₃ e de Fe₂O₃ e quanto a perda ao fogo, visto que os valores estabelecidos pela norma são de um somatório mínimo de 50 % e de porcentagem máxima de 6 %, respectivamente.

A análise de difração de Raios X da EGF foi realizada no Instituto de Física da UFRGS através de um difratômetro marca SIEMENS, modelo D5000, que pode ser observado na figura 6.3.

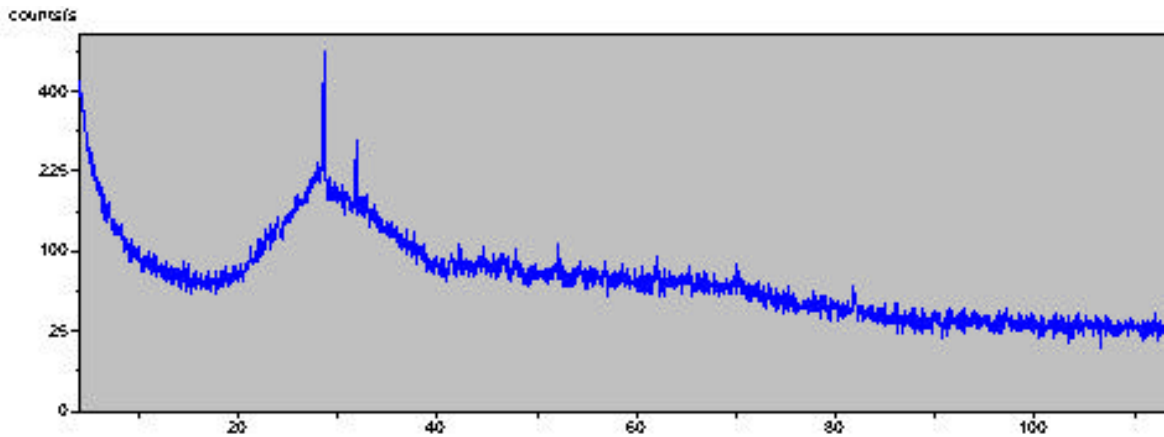


Figura 6.3: difração de Raios X da EGF

Verifica-se que a EGF apresenta uma estrutura predominantemente amorfa, cujos picos cristalinos não foram encontrados. A estrutura amorfa, também chamada de vítrea, é resultante do processo de resfriamento brusco que a EGF sofre quando entra em contato com um fluxo de água durante o seu vazamento. O processo de resfriamento brusco dá origem a uma estrutura amorfa, pois não há tempo suficiente para os átomos se arranjamem de forma ordenada.

O grau de vitrificação da EGF foi realizado pelo Laboratório da ABCP, segundo o método “Mac Master”, com o objetivo de verificar a presença de fase cristalina na EGF, pois quanto menor o seu grau de vitrificação, menor será sua potencialidade hidráulica. O resultado obtido foi de 97%.

A análise microestrutural da EGF foi realizada através de microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários em microscópio eletrônico de marca PHILIPS, modelo XL200, com espectrômetro por dispersão de energia (EDS – Energy Dispersive Spectrometry) acoplado. Esta análise foi realizada no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da Escola de Engenharia da UFRGS. Foram analisadas amostras de EGF em seu estado não beneficiado e beneficiado (moída). A preparação na qual as amostras ensaiadas foram submetidas foi o recobrimento com carbono.

A morfologia da EGF não beneficiada pode ser observada na figura 6.4, onde encontram-se fragmentos com aspecto denso e outros com aspecto mais poroso. As figuras (c) e (d) são ampliações diferentes da mesma área 2 selecionada para análise de EDS na figura (b). Os resultados da análise de EDS das áreas 1 e 2, observadas na mesma (a) e (b), encontram-se na tabela 6.6.

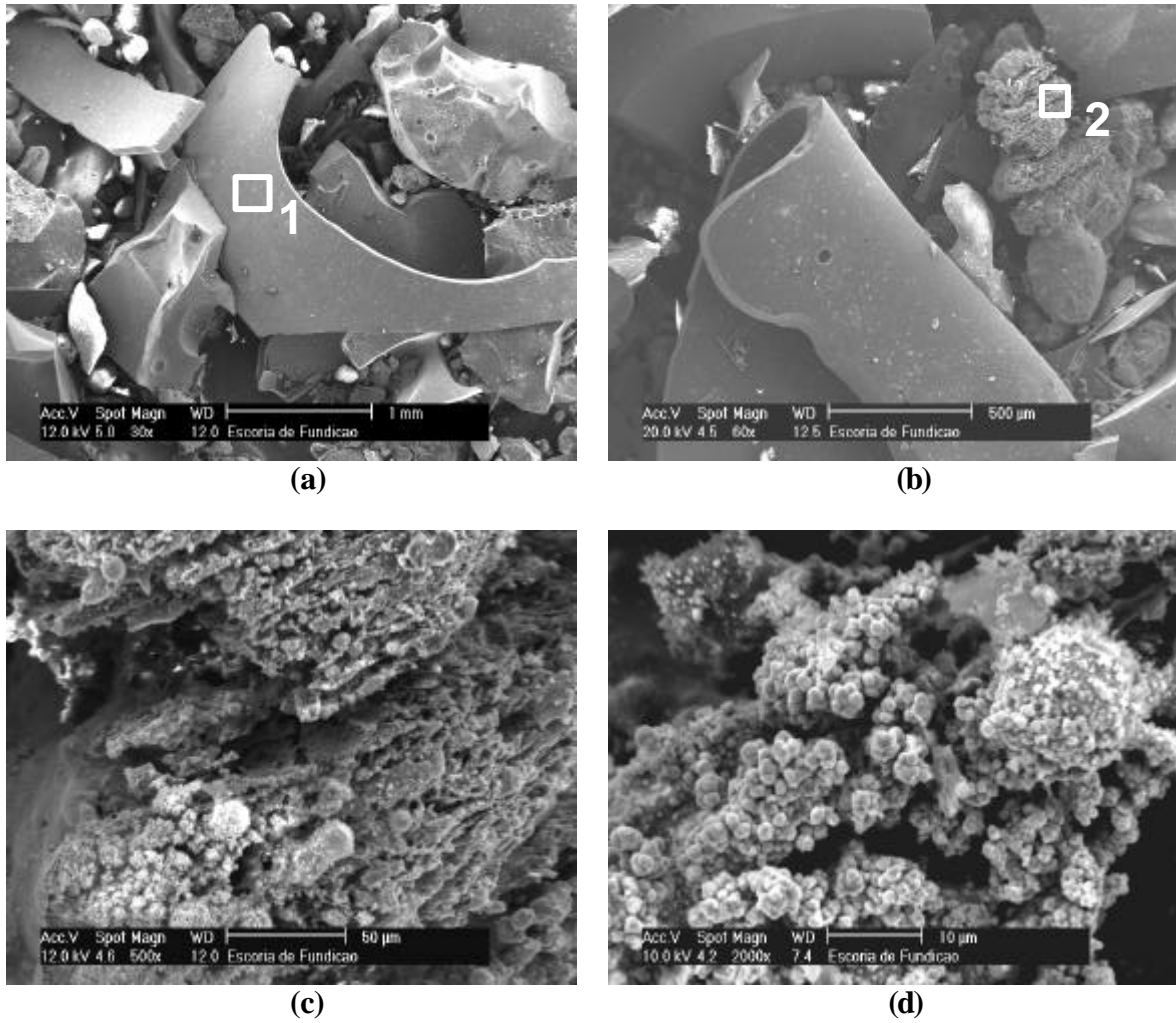


Figura 6.4: micrografia eletrônica de varredura – MEV – elétrons secundários (a) ampliação 30x (b) ampliação 60x (c) ampliação 500x (d) ampliação 2000x. Detalhe das áreas selecionadas para análise de EDS (1 e 2)

Tabela 6.6: resultados obtidos nas análises de EDS da EGF não beneficiada

Elemento	Composição Química (%)	
	Área 1	Área 2
O	45,34	32,33
Mg	8,85	-
Al	7,87	9,52
Si	21,64	23,64
Ca	5,42	1,18
Mn	2,48	-
Fe	8,39	30,91
K	-	2,43
Total	100,00	100,00

Pode ser observado na figura 6.4 que os grãos da EGF apresentam formas e tamanhos bastante diferenciados. Quanto às análises de EDS das áreas selecionadas 1 e 2, tendo a área 1 uma aparência mais densa que a área 2, a composição química das áreas apresentou variação nas porcentagens dos elementos presentes, com destaque para o Fe, O, Mg e Ca.

A microscopia eletrônica de varredura da EGF beneficiada pode ser observada na figura 6.5 e os resultados da análise de EDS das áreas 3 e 4, observadas na mesma figura 6.5, na tabela 6.7.

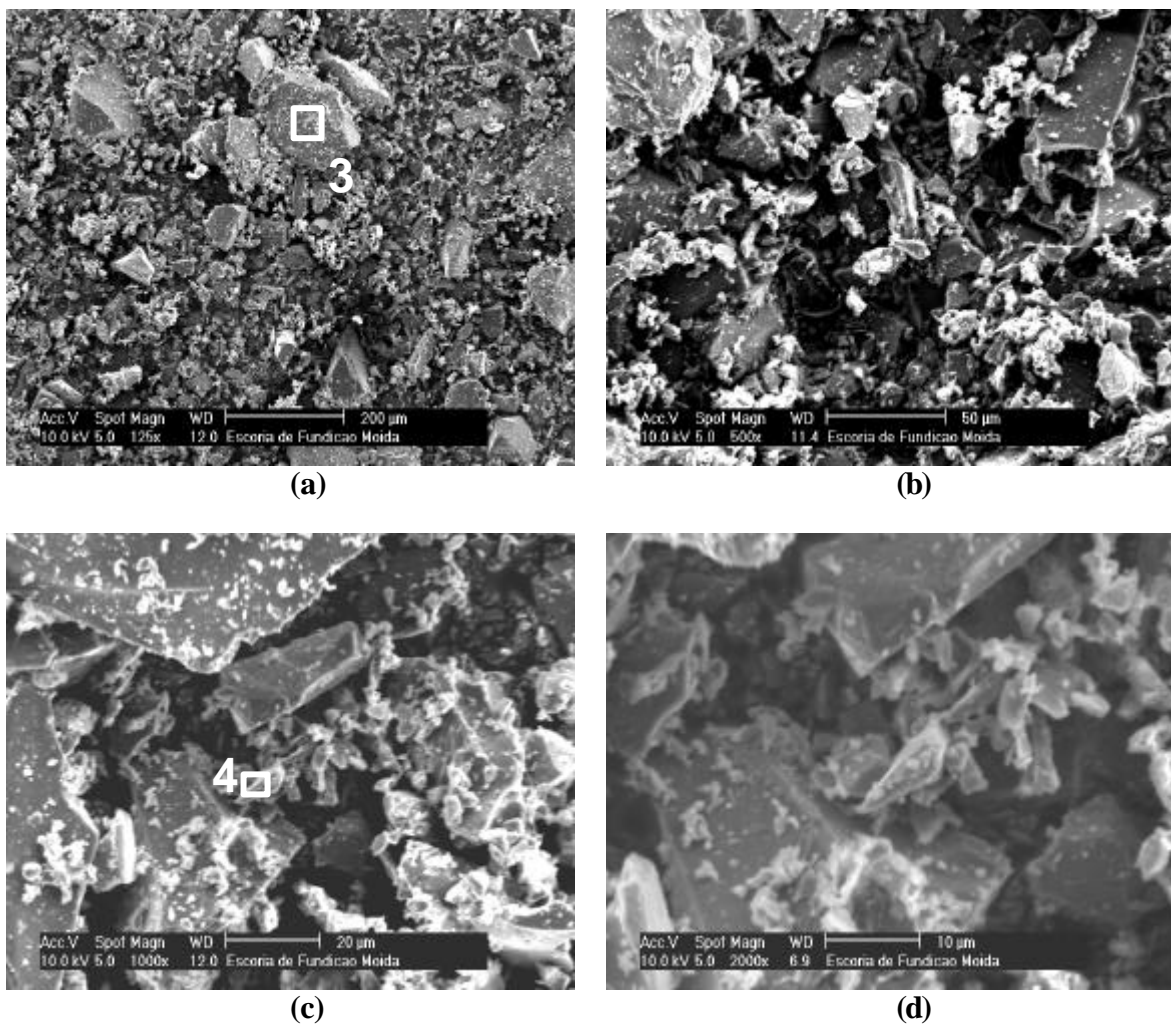


Figura 6.5: micrografia eletrônica de varredura – MEV – elétrons secundários (a) ampliação 125x (b) ampliação 500x (c) ampliação 1000x (d) ampliação 2000x. Detalhe das áreas selecionadas para análise de EDS (3 e 4)

Tabela 6.7: resultados obtidos nas análises de EDS da EGF beneficiada

Elemento	Composição Química (%)	
	Área 3	Área 4
O	32,2	27,68
Mg	8,44	8,71
Al	7,75	9,77
Si	22,59	31,94
Ca	9,20	16,18
Mn	6,17	2,16
Fe	13,64	3,57
Total	100,00	100,00

Comparando os grãos da EGF não beneficiada com os da beneficiada, pode-se observar que os grãos da EGF beneficiada apresentam formas e tamanhos mais homogêneos. Quanto às análises de EDS, a composição química das áreas selecionadas também apresentou variação nas porcentagens dos elementos presentes.

6.3.3.2.3 Caracterização ambiental

A avaliação ambiental da EGF foi realizada segundo a NBR 10005 (1987) e NBR 10006 (1987), que determinam extratos lixiviados e extratos solubilizados, respectivamente, atualmente reconhecidos pelos órgãos ambientais de fiscalização no Brasil como os ensaios determinantes da classificação ambiental do resíduo ou produto.

Segundo o laudo de análises realizado por uma empresa credenciada pela FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental) fornecido pela empresa geradora do resíduo, a escória granulada de fundição foi classificada de acordo com a NBR 10004 como um resíduo CLASSE III-INERTE. O laudo encontra-se no Anexo 4.

Mesmo que a reciclagem dos resíduos seja uma ferramenta importante para o controle dos problemas ambientais causados pela geração dos mesmos, deve-se avaliar não somente as características técnicas do novo produto, mas também o possível impacto ambiental devido ao seu uso.

Sendo assim, Ceccatto (2003) realizou ensaios de caracterização ambiental em amostras de concreto de relação água/aglomerante igual a 0,70 e com 50% de substituição de cimento por EGF, considerada a amostra mais suscetível a permitir a migração de elementos indesejáveis ao meio dentre as demais estudadas.

Os resultados apresentados por Ceccatto (2003) mostram que, tanto para o extrato lixiviado como para o extrato solubilizado do concreto com EGF, os valores são inferiores aos limites máximos estipulados pela NBR 10004 (1987). Sendo assim, de acordo com a NBR 10004 (1987), o concreto com EGF é classificado como material inerte (classe III).

6.3.3.2.4 Índice de atividade pozolânica (físico)

A partir do ensaio de índice de atividade pozolânica, segundo a NBR 5752 (1992), pode-se verificar a potencialidade da reação da EGF com o cimento Portland, objetivando sua utilização como substituição de parte do cimento em argamassas ou concretos.

O ensaio consiste basicamente na moldagem de corpos-de-prova cilíndricos (50mm x 100mm) de dois traços de argamassa, sendo um deles referência, somente com cimento Portland comum (CP I), e outro com 35% do volume absoluto de cimento substituído por EGF. O índice é obtido pela relação em porcentagem das resistências médias, aos 28 dias de idade, de corpos-de-prova de argamassa com EGF e da argamassa referência. Na tabela 6.8 encontram-se os resultados dos índices de atividade pozolânica.

Tabela 6.8: resultado do ensaio de índice de atividade pozolânica

Amostra	Resistência média aos 28 dias (MPa)	Índice de Atividade Pozolânica (%)	Água requerida (%)	Especificações NBR 12653 (1992)
Argamassa com CP I + EGF (35% em volume)	38,10	88,8	99,3	> 75 %
Argamassa referência	42,91	100	100	100 %

Como pode ser visualizado na tabela 6.8, a EGF pode ser considerada um material pozolânico, pois satisfaz a exigência física determinada pela NBR 12653 (1992), que estabelece como índice de atividade pozolânica mínimo 75%.

6.3.3.3 Agregados

Para a confecção dos corpos-de-prova utilizou-se agregados provenientes da região de Porto Alegre, sendo o agregado graúdo de origem basáltica, classificado como brita 1, segundo a NBR 7211 (1983); e o agregado miúdo de origem quartzosa, classificado como areia de graduação média (Zona 3), segundo a mesma norma. Nas tabelas 6.9 e 6.10 estão apresentadas as composições granulométricas e características físicas dos agregados.

Tabela 6.9: composição granulométrica e características físicas do agregado miúdo

Peneira (mm)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)
4,8	0	0
2,4	5	5
1,2	16	21
0,6	31	52
0,3	40	92
0,15	8	100
< 0,15	0	100
Dimensão máxima característica (mm)		2,4
Módulo de finura		2,96
Massa específica (g/cm ³)		2,63

Tabela 6.10: composição granulométrica e características físicas do agregado graúdo

Peneira (mm)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)
19,0	0	0
12,5	61	61
9,5	28	89
6,3	9	98
4,8	1	99
2,4	1	100
1,2	-	100
0,6	-	100
0,3	-	100
0,15	-	100
< 0,15	-	100
Dimensão máxima característica (mm)		19,0
Módulo de finura		6,88
Massa específica (g/cm ³)		2,81

Em função das dimensões dos corpos-de-prova (10 x 10 x 6)cm para o ensaio de absorção de água por sucção capilar, optou-se por peneirar a brita, utilizando somente o material passante na peneira de abertura 19 mm.

6.3.4 Curva de Dosagem

Neste projeto de pesquisa, o método de dosagem empregado foi o IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992). Conforme especificado pelo método, o teor ideal de argamassa foi determinado experimentalmente.

Segundo Recena (2002), a obtenção da trabalhabilidade desejada parte do estabelecimento correto do teor de argamassa para que os vazios deixados pela(s) brita(s) sejam todos preenchidos, devendo haver ainda, uma quantidade adicional de argamassa para permitir o movimento relativo entre os grãos e garantir o bom acabamento das peças concretadas. Neste último aspecto, deve ser levado em consideração o chamado efeito parede, que consiste na maior exigência de argamassa para acabamento das peças com maior superfície de forma em contato com o concreto, ou seja, peças com maior relação superfície de forma/volume de concreto.

O teor de argamassa encontrado experimentalmente para este projeto foi de 53%. A consistência do concreto foi fixada em 80+-10mm, sendo medida através do ensaio de abatimento do tronco de cone (NBR 7223/1992). Os valores de resistência à compressão médio, resultante de 3 corpos-de-prova, obtidos no desenvolvimento do método encontram-se na tabela 6.11 e o diagrama de dosagem na figura 6.6.

Tabela 6.11: resultados do ajuste da curva de dosagem

Traço unitário(1:m) (kg/kg)	Relação água/cimento (a/c)	fc₂₈ médio (MPa)	Consumo cimento (kg/m³)
1:3,5	0,39	35,69	495,5
1:5,0	0,51	27,58	371,9
1:6,5	0,69	24,55	291,8

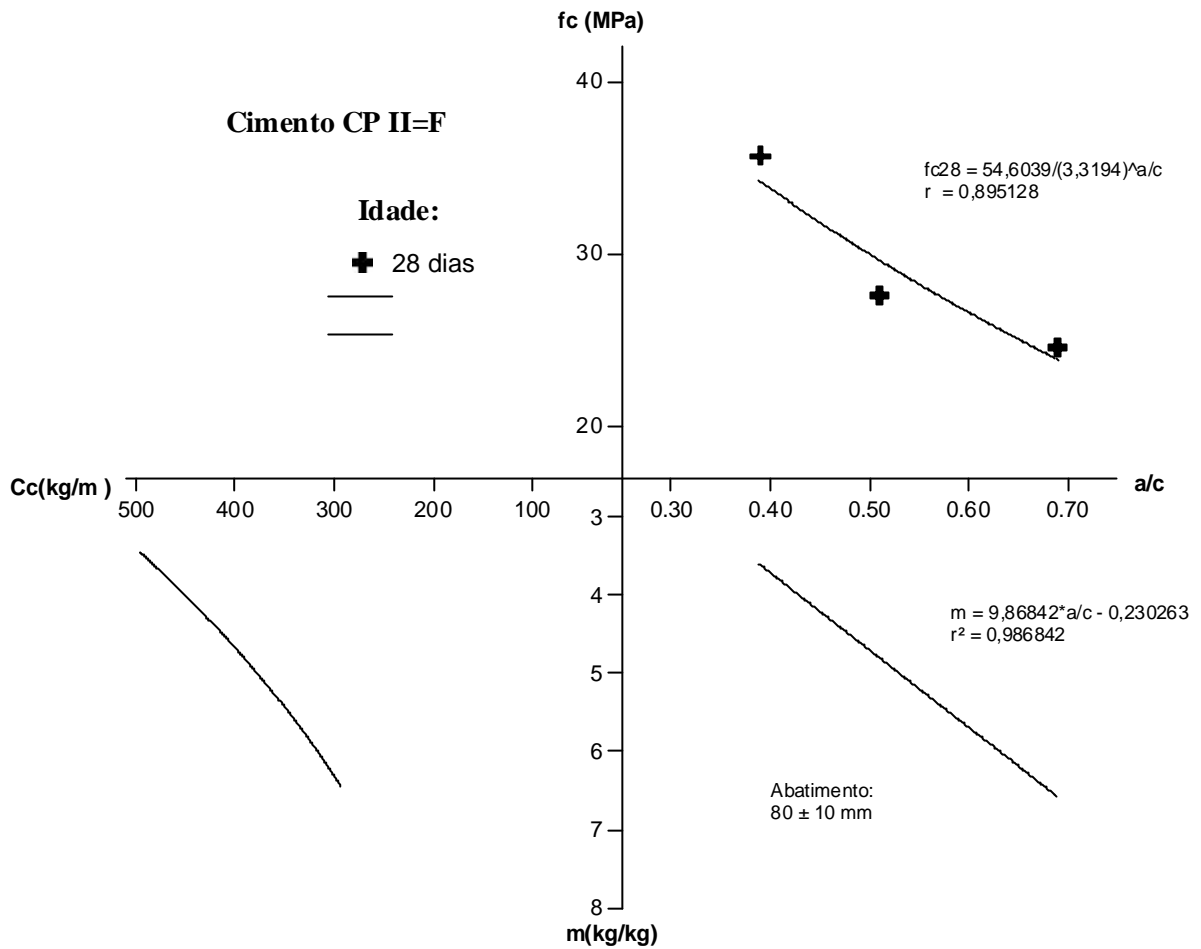


Figura 6.6: diagrama de dosagem

6.3.5 Proporcionamento dos Materiais

Através do diagrama de dosagem foi determinado o proporcionamento dos materiais dos 12 concretos produzidos neste projeto experimental. A tabela 6.12 apresenta os 12 traços concretados.

Tabela 6.12: proporcionamento dos materiais, em massa

Concreto	Relação a/agl	Cimento	EGF	Areia	Brita
0% Referência	0,40	1	-	1,50	2,22
	0,55			2,28	2,91
	0,70			3,07	3,61
10%	0,40	0,91	0,09	1,50	2,22
	0,55			2,28	2,91
	0,70			3,07	3,61
30%	0,40	0,73	0,27	1,50	2,22
	0,55			2,28	2,91
	0,70			3,07	3,61
50%	0,40	0,54	0,46	1,50	2,22
	0,55			2,28	2,91
	0,70			3,07	3,61

Durante a execução dos traços de concreto, foi observado aumento da trabalhabilidade de alguns traços colocando-se toda a quantidade de água calculada. Sendo assim, a quantidade de água foi reduzida para que o abatimento de 80?10mm fosse mantido. Este fato pode ter sido originado por diversos fatores, dentre eles, diferenças climáticas entre os dias do ajuste da curva de dosagem e da produção dos concretos, para o caso do concreto referência; e, para os concretos com escória de fundição, segundo Neville (1997), pode estar associado à superfície lisa das partículas de escória granulada que absorvem pouca água durante a mistura, o que poderia proporcionar um aumento na trabalhabilidade.

Na tabela 6.13 estão apresentados os consumos de material aglomerante, de escória granulada de fundição (EGF) e de cimento em kg/m^3 , bem como as relações água/aglomerante finais, obtidas após a redução da água de amassamento.

Tabela 6.13: consumo de material aglomerante, EGF e cimento

Concreto	Relação a/agl	Consumo de material aglomerante (kg/m ³)	Consumo de EGF (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)
0% Referência	0,40	476	-	476
	0,50	364	-	364
	0,65	290	-	290
10%	0,38	479	43	436
	0,51	363	33	330
	0,66	289	26	263
30%	0,40	476	130	346
	0,52	362	99	263
	0,68	287	78	209
50%	0,38	479	218	261
	0,55	357	162	195
	0,70	286	130	156

A substituição de cimento por escória granulada de fundição (EGF) foi realizada em volume, visto que o cimento e a escória granulada de fundição não apresentam a mesma massa específica. Desta forma, efetuou-se o cálculo da massa equivalente à porcentagem de substituição de EGF sobre o volume de cimento, conforme a equação 6.1:

$$m_{EGF} = y_{EGF} \cdot TE \cdot \frac{m_c}{y_c} \quad (\text{equação 6.1})$$

Onde:

m_{EGF} = massa de escória granulada de fundição (EGF), correspondente à porcentagem de substituição sobre o volume de cimento (kg);

y_{EGF} = massa específica da escória granulada de fundição (kg/dm³);

TE = porcentagem de substituição (teor) de escória granulada de fundição (EGF), em relação ao volume de cimento;

m_c = massa de cimento (kg);

y_c = massa específica do cimento (kg/dm³).

6.3.6 Moldagem, Adensamento e Cura

A mistura dos materiais constituintes de cada traço de concreto foi realizada em betoneira de eixo vertical, com capacidade de até 30 litros, previamente imprimada com argamassa. Os materiais foram colocados com a betoneira em movimento, na seguinte ordem:

- a) 100% da brita + parte da água;
- b) 100% do cimento + parte da água;
- c) 100% da escória + parte da água;
- d) 100% da areia.

Após o processo de mistura dos materiais foi determinada a trabalhabilidade do concreto fresco através de ensaio de abatimento por tronco de cone, *slump test*, conforme especificado na NBR 7223 (1992).

O adensamento do concreto foi efetuado utilizando um vibrador de imersão, seguindo os procedimentos prescritos pela NBR 5738 (1994).

Para realização dos ensaios foram confeccionados corpos-de-prova prismáticos (10x10x6)cm e cilíndricos (9,5x19)cm, sendo que para cada combinação de variáveis, dois exemplares foram confeccionados. Os corpos-de-prova permaneceram cobertos nas primeiras 24 horas, em ambiente de laboratório, sendo posteriormente desmoldados e mantidos em cura em câmara úmida (T 23°C +-2, UR>95%) até completarem 28 dias de idade.

6.3.7 Ensaios

Os ensaios realizados neste projeto de pesquisa foram absorção de água por sucção capilar, através do método KELHAM (1988), e penetração de íons cloreto, através do método ASTM C 1202 (1992). O método KELHAM (1988), apesar de não normalizado, foi escolhido para avaliação da absorção capilar dos concretos neste projeto por ser um método muito utilizado no NORIE/UFRGS. Já o método ASTM C 1202 (1992) foi escolhido para avaliação da penetração de cloretos dos concretos por ser um ensaio acelerado que fornece respostas rápidas e de fácil execução.

6.3.7.1 Absorção de Água por Sucção Capilar

Utilizou-se o ensaio preconizado por KELHAM (1988), no qual avalia-se a penetração de água por sucção capilar ao longo do tempo.

Este ensaio consiste em monitorar através de uma balança hidrostática com precisão de centésimo de grama, ao longo do tempo, o acréscimo da massa aparente de uma fatia de concreto submerso em água, devidamente condicionado, até atingir constância de massa. A espessura da fatia de concreto utilizada no ensaio foi de 25 mm, seguindo a sugestão de Gopalan (1988), que objetiva diminuir o tempo de ensaio.

Os procedimentos do ensaio obedeceram a seguinte seqüência:

- a) aos 28 dias de idade os corpos-de-prova foram serrados horizontalmente, com o auxílio de uma serra de corte diamantada, a uma altura de 25 mm da base do corpo-de-prova, formando uma pastilha de 10x10x2,5 cm, de modo que a face a ser ensaiada seja a face que esteve em contato com o fundo da fôrma concretada;
- b) após o corte dos corpos-de-prova, estes foram colocados em estufa a 110 +- 10°C, até atingirem constância de massa (0,1% da massa, em períodos de pesagem de aproximadamente 24 horas);
- c) para a determinação da taxa de absorção e resistência capilar, foram medidas a área a ser ensaiada e a espessura do corpo-de-prova antes do início dos demais procedimentos do ensaio;
- d) foi realizada a impermeabilização das laterais dos corpos-de-prova através de uma resina à base de epóxi. Para evitar que o material impermeabilizante cobrisse as faces superior e inferior do corpo-de-prova, estas foram cobertas com fita crepe, conforme figura 6.7;
- e) na face superior, oposta à face a ser ensaiada, foi acoplada uma placa de PVC com um cano plástico transparente com o auxílio de um material selante à base de poliuretano, que possibilita que esta face coberta esteja em contato com o ar, conforme figura 6.8;



Figura 6.7: aspecto das laterais do corpo-de-prova de absorção seladas com resina epóxi

- f) ensaio tem início no momento em que o corpo-de-prova é colocado em água, sendo as leituras realizadas após decorrido 2, 5, 10, 15 e 30 minutos e 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48, 72 e 96 horas, até a estabilização da absorção, conforme figura 6.9.



Figura 6.8: aspecto da face superior do corpo-de-prova coberta com a tampa de PVC

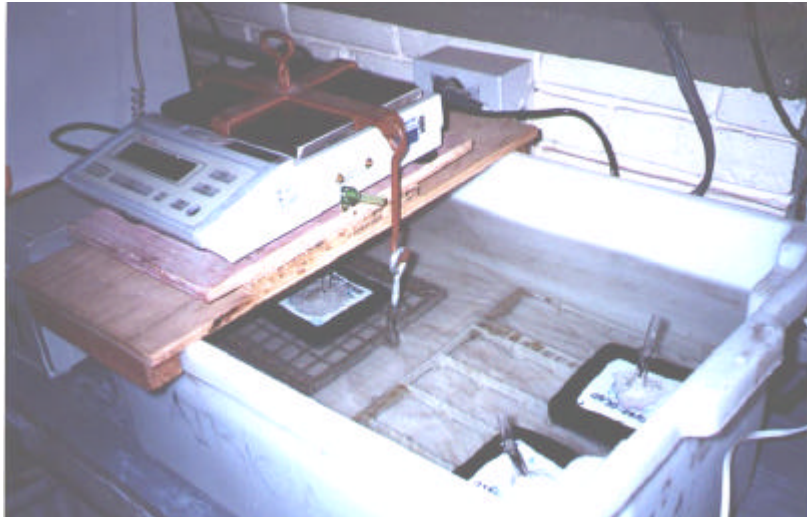


Figura 6.9: ensaio de absorção de água por sucção capilar

Ao graficar o ganho de massa dos corpos-de-prova em função da raiz quadrada do tempo de ensaio, observa-se duas fases distintas, sendo que para cada fase é possível interpolar uma reta. A primeira fase é considerada fase de absorção e a segunda de saturação. A interseção das duas retas é um ponto denominado ponto de saturação ou “nick point”, a partir do qual inicia-se a saturação do corpo-de-prova. A taxa de absorção, em $\text{g}/\text{cm}^2\text{h}^{1/2}$, é calculada pelo quociente da inclinação da reta referente à fase de absorção pela área efetiva do corpo-de-prova (MASUERO, 2001).

Segundo Gjorv (1994), a resistência capilar é determinada pela razão entre o ponto de saturação e a espessura do corpo-de-prova, como apresentado na equação 6.2.

$$R = (t_{\text{cap}} / e)^2 \quad (\text{equação 6.2})$$

Onde:

R = resistência química (h/m^2)

t_{cap} = abcissa do ponto de saturação ($\text{h}^{1/2}$)

e = espessura do corpo-de-prova (m)

6.3.7.2 Penetração de Íons Cloretos

Este ensaio foi realizado segundo “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete Ability to Resist Chloride Ion Penetration” (ASTM C 1202-92), que indica a resistência dos concretos à penetração de íons cloretos.

O ensaio especificado pela ASTM 1202/92 consiste em acoplar um corpo-de-prova cilíndrico, de 95 mm de diâmetro e 50 mm de espessura, entre duas meia células de acrílico, uma delas contendo uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), com concentração de 0,3N, e a outra com solução de cloreto de sódio (NaCl), com 3% de concentração (em massa). Entre as meias células é gerada uma diferença de potencial de $60 \pm 0,1$ V, dando origem a uma corrente elétrica que induz o ânion cloreto a se difundir através do concreto sob a ação de um campo elétrico. Através de um amperímetro a corrente elétrica passante é registrada em intervalos de trinta minutos. A duração do ensaio é de seis horas. O produto da corrente pelo tempo, expresso em coulombs, indica a carga total que atravessa o corpo-de-prova e revela a maior ou menor resistência do concreto à penetração do íon cloreto.

Nesta pesquisa, foram ensaiadas simultaneamente quatro corpos-de-prova por dia. Os procedimentos do ensaio obedeceram à seguinte seqüência:

- a) aos 28 dias de idade, as fatias de 51 ± 3 mm de espessura de concreto utilizadas no ensaio foram retiradas da parte central dos corpos-de-prova cilíndricos de concreto de dimensões de 95 mm de diâmetro e 190 mm de comprimento através de uma serra diamantada;
- b) após o corte dos corpos-de-prova, estes foram colocados em estufa a $110 \pm 10^\circ\text{C}$, até atingirem constância de massa (0,1% da massa, em períodos de pesagem de aproximadamente 24 horas);
- c) obtida a constância de massa, as faces laterais foram impermeabilizadas com resina à base de epóxi, conforme figura 6.10;



Figura 6.10: aspecto das laterais do corpo-de-prova seladas com resina epóxi

- d) após a secagem da resina ao ar livre, os corpos-de-prova foram colocados em um dessecador ligado a uma bomba de vácuo por 4 horas, sendo que a última hora, os corpos-de-prova receberam água deionizada e deaerada através de um funil acoplado no dessecador até cobertura de todas as fatias, tomando o cuidado para que não entrasse ar pelo funil. Após as 4 horas no dessecador ligado à bomba de vácuo, os corpos-de-prova permaneceram submersos no dessecador por mais 18 +- 2 horas, conforme figura 6.11;



Figura 6.11: aspecto dos corpos-de-prova submetidos ao vácuo em um dessecador

- e) após decorrido o tempo de saturação dos corpos-de-prova, estes foram secos superficialmente para posteriormente serem acopladas às meias células de acrílico. A montagem segue a seguinte ordem: cada meia célula recebe uma tela metálica entre dois anéis, que constitui o eletrodo do ensaio; os corpos-de-prova são acoplados através de um material selante à base de poliuretano entre as duas meias células, ficando em contato com as telas metálicas, para ser submetida à diferença de potencial;
- f) no dia de realização do ensaio foi montado um circuito fechado, em câmara climatizada com temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $70 \pm 5\%$, que recebe uma diferença de potencial de $60 \pm 0,1 \text{ V}$ e cada meia célula recebe solução de concentração diferente, uma contendo solução de hidróxido de sódio (NaOH), e a outra uma solução de cloreto de sódio (NaCl);
- g) durante as 6 horas de ensaio são registradas as cargas passantes a cada 30 minutos, conforme figura 6.12.



Figura 6.12: ensaio de penetração de íons cloretos

A temperatura da solução de cloreto de sódio é controlada durante todo o ensaio, pois se esta ultrapassar 90°C , este resultado deverá ser descartado.

A carga total passante nos corpos-de-prova é calculada pela equação 6.3.

$$Q = 900 * (I_0 + 2 I_{30} + 2 I_{60} + \dots + 2 I_{300} + 2 I_{330} + I_{360}) \quad (\text{equação 6.3})$$

Onde:

Q = carga total passante, em Coulombs;

I₀ = corrente imediatamente após a aplicação da diferença de potencial, em Ampères;

I_t = corrente em t minutos depois da diferença de potencial ser aplicada, em Ampères.

A ASTM C 1202/92 estabelece uma classificação dos concretos quanto à resistência à penetração de cloretos, de acordo com a intensidade de corrente, em Coulombs, medida durante o ensaio, conforme apresentado na Tabela 6.14.

Segundo Pereira (2001), cabe ressaltar que esta classificação é apenas qualitativa e serve como um referencial da penetração de cloretos.

Tabela 6.14: ingresso de íons cloreto baseado na carga passante (ASTM C 1202)

Carga Passante (Coulombs)	Penetração de Íons cloreto
> 4000	Alta
2000 – 4000	Moderada
1000 – 2000	Baixa
100 – 1000	Muito baixa
< 100	Desprezível

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussão referentes aos ensaios realizados no programa experimental descritos no capítulo 6. A apresentação dos resultados para cada ensaio é feita através de tabelas e gráficos.

A análise estatística dos resultados obtidos neste experimento permitiu obter um modelo matemático do comportamento do concreto com escória granulada de fundição (EGF) e do concreto referência, quanto às propriedades relacionadas com a durabilidade (absorção de água por sucção capilar e penetração de íons cloreto). Desta forma, foi possível estudar o efeito da utilização de EGF como substituição de parte do cimento em concretos, em termos de durabilidade.

Primeiramente, foi utilizado o programa Stagraphics para análise de regressão múltipla linear, entretanto, em função das características particulares do experimento, não foi possível obter modelos matemáticos confiáveis que representassem o comportamento dos concretos com e sem EGF quanto a sua durabilidade.

Sendo assim, os modelos do comportamento dos concretos frente aos ensaios de absorção de água por sucção capilar e penetração de íons cloreto foram obtidos através de *análise de regressão múltipla não linear*, com auxílio do programa estatístico SPSS 8.0. O programa SPSS 8.0 fornece equações ajustadas de cada modelo testado, bem como os parâmetros da análise de variância e os valores de R^2 (ou coeficiente de determinação) de cada análise.

O coeficiente de determinação, R^2 , representa o quanto (em porcentagem) da variabilidade nos resultados da variável de resposta é devido aos fatores controláveis, ou seja, o quanto da variação de ensaio é explicado pela equação ajustada para cada variável de resposta (RIBEIRO e CATEN, 2000). Sendo assim, quanto maior o valor de R^2 , maior é a representatividade do modelo matemático do comportamento dos resultados obtidos.

7.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR SUCCÃO CAPILAR

O modelo de comportamento da absorção de água por sucção capilar do concreto com EGF e do concreto referência, obtido através de análise de regressão não linear (Programa Estatístico SPSS 8.0), está representado na equação 7.1:

$$TA = B0 * \{(1+TE)^{B1}\} * a/agl^{B2} \quad (\text{equação 7.1})$$

Onde:

TA = taxa de absorção capilar ($\text{g/cm}^2 * \text{h}^{1/2}$);

TE = teor de substituição de EGF;

a/agl = relação água/material aglomerante;

B0, B1 e B2 = parâmetros determinados pelo SPSS.

Para análise dos resultados de absorção de água por sucção capilar, foram descartados os valores expúrios através da comparação dos resultados obtidos e dos resultados previstos pelo modelo matemático.

Na tabela 7.1 estão apresentados os valores dos parâmetros B0, B1 e B2, bem como o valor do coeficiente de determinação R^2 obtidos no Programa Estatístico SPSS 8.0.

Tabela 7.1: valores dos parâmetros B0, B1 e B2 e do R^2 obtidos no SPSS

Parâmetro	Estimativa	Erro	Intervalo de confiança	
			Mínimo	Máximo
B0	0,184326	0,017099	0,148248	0,220403
B1	0,541809	0,178468	0,165274	0,918343
B2	0,946114	0,136368	0,658403	1,233826
R^2	0,80988			

Os valores obtidos no programa experimental e os valores obtidos através do modelo matemático podem ser visualizados na tabela 7.2.

Tabela 7.2: valores obtidos e previstos para taxa de absorção

TE (%)	a/agl	Taxa de Absorção (g/cm ² * h ^{1/2})	
		Valores Obtidos	Valores Previstos
0	0,40	0,0771	0,0775
		0,0586	
	0,50	0,1040	0,0957
		0,0684	
	0,65	0,1312	0,1226
		0,1200	
10	0,38	0,0637	0,0777
		0,1024	
	0,51	0,1145	0,1026
		0,1322	
	0,66	0,1489	0,1310
		0,1320	
30	0,40	0,0846	0,0893
		0,0592	
	0,52	0,1364	0,1144
		0,1093	
	0,68	0,1535	0,1475
		0,1425	
50	0,38	0,1046	0,0919
		0,0886	
	0,55	0,1513	0,1304
		0,0919	
	0,70	0,1438	0,1638
		0,1518	

Em função da grande variabilidade dos resultados obtidos no ensaio de absorção de água por sucção capilar, foram selecionados os concretos que apresentaram maior discrepância nos resultados e estes foram concretados novamente, a fim de obter novos corpos-de-prova para a repetição do respectivo ensaio. Entretanto, os resultados novamente apresentaram alta variabilidade, fato este também encontrado por outros autores que avaliaram a absorção de água por sucção capilar através do mesmo método utilizado neste projeto, tais como, Masuero (2001), Freitas (2001), Moura (2000), Gonçalves (2000) e Ferreira (1999). Cabe ressaltar que a variabilidade ocorrida é referente ao método de ensaio e não ao material ensaiado.

A partir destes valores foram traçadas as curvas que representam a tendência de comportamento de cada concreto para a taxa de absorção de água por sucção capilar, onde as linhas representam o comportamento dos concretos segundo o modelo matemático e os pontos indicam os valores obtidos experimentalmente, conforme figura 7.1.

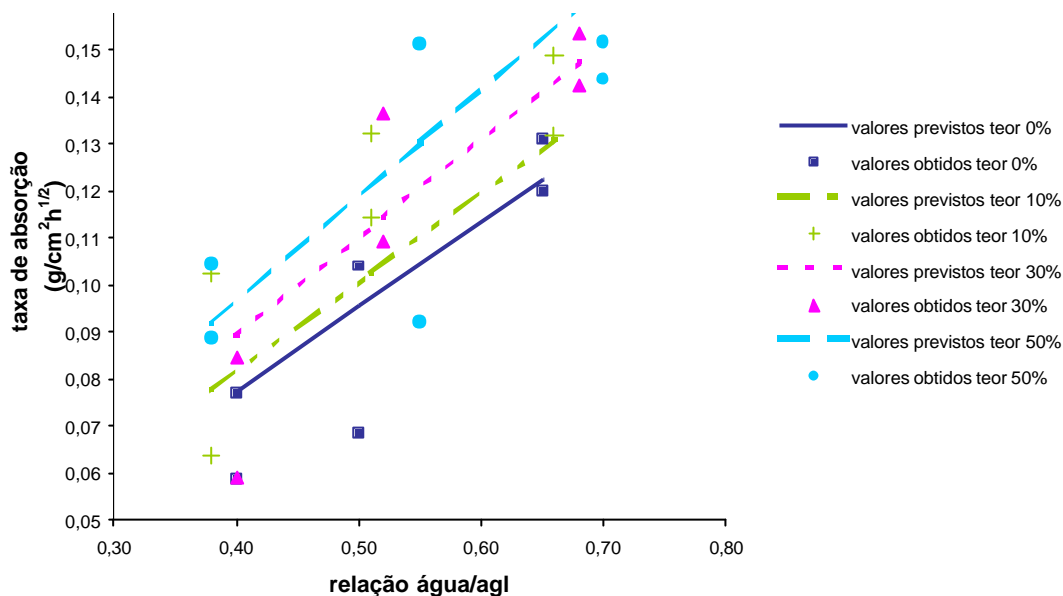


Figura 7.1: curvas previstas pelo modelo matemático para taxa de absorção

Observa-se que para todos os concretos, quanto maior a relação água/aglomerante e maior o teor de substituição de cimento por EGF, maior a taxa de absorção dos concretos.

Na tabela 7.3 está apresentada a análise de variância do modelo da taxa de absorção e na tabela 7.4 os parâmetros calculados para os fatores analisados.

Tabela 7.3: resultados da análise de variância da taxa de absorção

Fonte	SQ	GDL	MQ	Fcal	F0,05	Efeito*
Modelo	0,27658	3	0,09219	429,0102	3,2	Significativo
Resíduos	0,0036532	17	0,0002149			
Total	0,28023	20				
Total corrigido	0,01922	19				

SQ= soma quadrada; GDL= grau de liberdade; MQ= média quadrada

*Fcal>F0,05: Significativo

Tabela 7.4: parâmetros dos fatores analisados para taxa de absorção

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Significância - p
Constante	B0	0,18432	0,01709	10,78525	4,37254E-10
TE	B1	0,5418	0,17846	3,035974	0,003262381
a/agl	B2	0,94611	0,13636	6,938325	4,88422E-07

A análise de variância do modelo mostra através dos valores de p que tanto o fator teor de substituição (TE) de cimento por EGF quanto o fator água/aglomerante (a/agl) apresentam influência significativa na variável de resposta taxa de absorção.

7.1.1 Efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a taxa de absorção

Através do modelo matemático do comportamento dos concretos com e sem EGF para a absorção de água por sucção capilar, pode-se determinar o efeito isolado do fator controlável água/aglomerante sobre a variável de resposta taxa de absorção.

O gráfico construído para análise do efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a taxa de absorção considerou o ponto médio (30%) do intervalo definido no programa experimental para o teor de substituição (TE) de cimento por EGF. A tabela 7.5 apresenta os resultados da taxa de absorção para as relações água /aglomerante definidas no programa experimental. A figura 7.2 apresenta o efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a taxa de absorção do concreto.

Tabela 7.5: resultados da taxa de absorção em função do efeito isolado da relação água/aglomerante

TE (%)	a/agl	Taxa de Absorção ($\text{g/cm}^2 * \text{h}^{1/2}$)
30	0,40	0,0893
	0,55	0,1207
	0,70	0,1516

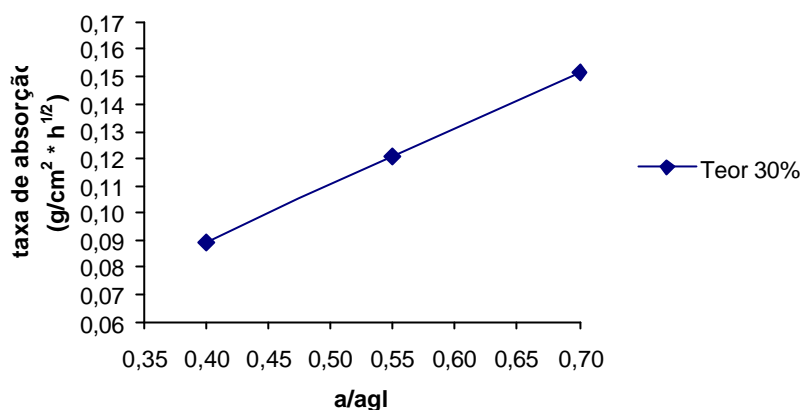


Figura 7.2: efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a taxa de absorção para TE (30%)

Neste gráfico observa-se que a taxa de absorção do concreto vai aumentando à medida que a relação água/aglomerante aumenta. Este comportamento é esperado, devido à existência de uma relação direta entre a absorção de água e a relação água/aglomerante. Isto pode ser explicado pelo fato de que quanto maior a quantidade de água no concreto maior é a formação de capilares no seu interior e, conseqüentemente, maior é a sua absorção de água.

7.1.2 Efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a taxa de absorção

O gráfico construído para análise do efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a taxa de absorção considerou o ponto médio (0,55) do intervalo definido no programa experimental para as relações água/aglomerante. A tabela 7.6 apresenta os resultados da taxa de absorção para os teores de substituição de cimento por EGF definidos no programa experimental. A figura 7.3 apresenta o efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a taxa de absorção do concreto.

Tabela 7.6: resultados da taxa de absorção em função do efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF

a/agl	TE (%)	Taxa de Absorção ($\text{g/cm}^2 * \text{h}^{1/2}$)
0,55	0	0,1047
	10	0,1102
	30	0,1207
	50	0,1304

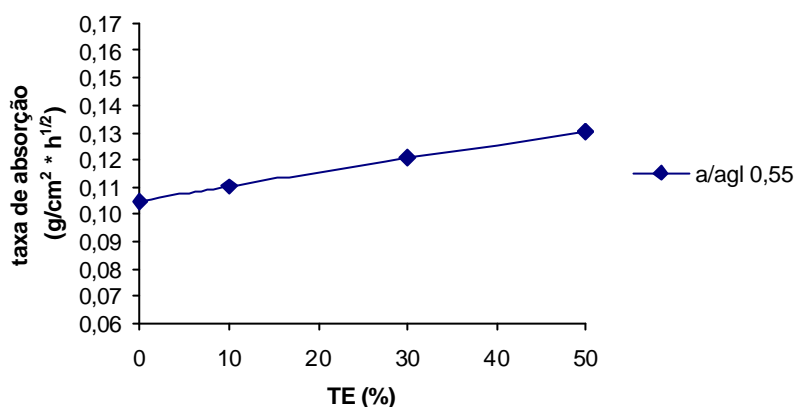


Figura 7.3: efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a taxa de absorção

Observa-se no gráfico do efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a taxa de absorção que esta cresce à medida que o teor (TE) de EGF aumenta, sendo este aumento significativo conforme a análise de variância apresentada na tabela 7.4. Entretanto, percebe-se que o aumento de 24,5% da taxa de absorção do TE (0%) para o TE (50%) não foi tão alto quanto o aumento de 69,7% da taxa de absorção da a/agl (0,40) para a/agl (0,70), verificado no gráfico de efeito isolado da relação água/aglomerante (figura 7.2).

O aumento da taxa de absorção com o teor de substituição de EGF pode estar associado ao tamanho dos grãos da EGF que é maior do que os grãos de cimento, pois grãos maiores, além de serem menos reativos, podem não estar conferindo uma melhor distribuição granulométrica da mistura, onde grãos menores ocupam os vazios formados pelos grãos maiores.

Além disso, o aumento da taxa de absorção também pode ser atribuído às reações pozolânicas lentas da EGF, que podem ser confirmadas através dos resultados obtidos por Ceccatto (2003), que estudou a resistência mecânica de concretos com e sem EGF utilizando os mesmos fatores controláveis (relação água/aglomerante e teor de substituição) que este programa experimental, visto que os concretos com TE (50%) e TE (30%), aos 91 dias de idade, atingiram 135,6% e 120,6%, respectivamente, da resistência à compressão aos 28 dias de idade. Sendo assim, este comportamento sugere que a utilização de EGF em teores elevados de substituição ao cimento ao longo do tempo não acarrete em perdas consideráveis de durabilidade.

Desta forma, provavelmente, aos 28 dias, o efeito da EGF no concreto é preponderantemente físico, pois como as reações pozolânicas das escórias, em geral, ocorrem lentamente, dificilmente estas reações, que regem o efeito químico, estariam completas aos 28 dias de idade quando os concretos foram ensaiados. Caso haja um efeito químico, este, provavelmente, é muito pequeno.

Bauer (1995) constatou o mesmo comportamento para concretos produzidos com cimento com 24% de escória de alto-forno. Os resultados mostraram que os valores encontrados para absorção capilar dos cimentos com adição de escória aumentam com a relação água/cimento em comparação aos cimentos sem escória. Entretanto, os valores apresentados para taxa de absorção dos concretos com escória de alto-forno foram superiores aos encontrados neste projeto para os concretos com EGF. Enquanto que os concretos com 24% de escória de alto-forno apresentaram taxa de absorção para as relações a/agl 0,4 e 0,7 de 0,1084 e 0,1884 $g/cm^2h^{1/2}$, respectivamente, os concretos com 30% de EGF apresentaram taxa de absorção para as mesmas a/agl 0,4 e 0,7 de 0,0893 e 0,1475 $g/cm^2h^{1/2}$, respectivamente.

Ao contrário do comportamento demonstrado pelos concretos com EGF, Frizzo et al. (2002) afirmam que o emprego de pozolana, neste caso cinza volante (teor de 50%) e cinza de casca de arroz (teor de 25%), diminui significativamente a absorção capilar do concreto.

Hoppe Filho et al. (2002) considera que substituições de cimento Portland por cinza volante, cinza de casca de arroz e escória de alto-forno promovem alterações na estrutura dos poros, sejam elas na forma e/ou na distribuição, resultando em um refinamento dos poros, o que produz efeitos diretos sobre o tamanho e a interconectividade dos mesmos, além de alterar a composição da solução aquosa, o que só traz benefícios para o concreto.

7.1.3 Efeito da interação da relação água/aglomerante e do teor de substituição de cimento por EGF sobre a taxa de absorção

O efeito da interação da relação água/aglomerante e do teor de substituição de cimento por EGF sobre a taxa de absorção pode ser visualizado na tabela 7.7 e na figura 7.4, bem como a figura 7.5 mostra um comparativo entre estes efeitos.

Tabela 7.7: resultados da taxa de absorção em função do efeito da relação água/aglomerante e do teor de substituição de cimento por EGF

TE (%)	a/agl	Taxa de Absorção ($\text{g}/\text{cm}^2 * \text{h}^{1/2}$)
0	0,40	0,0775
	0,55	0,1047
	0,70	0,1315
10	0,40	0,0816
	0,55	0,1102
	0,70	0,1385
30	0,40	0,0893
	0,55	0,1207
	0,70	0,1516
50	0,40	0,0965
	0,55	0,1304
	0,70	0,1638

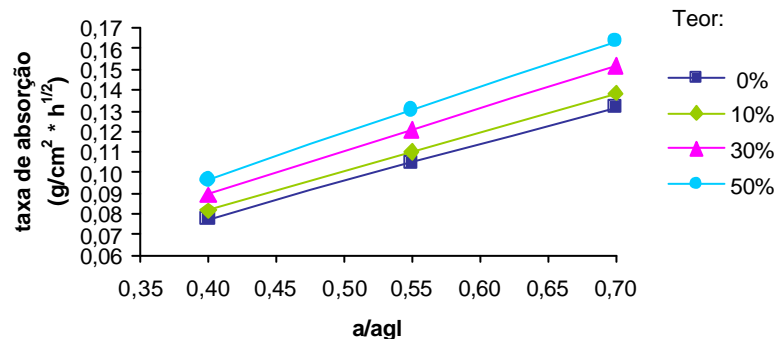


Figura 7.4: efeito da interação da relação água/aglomerante e do teor de substituição de cimento por EGF sobre a taxa de absorção

Na figura 7.4 pode ser observado que a medida que aumenta a relação água/aglomerante e o teor de substituição de cimento por EGF, aumenta a taxa de absorção.

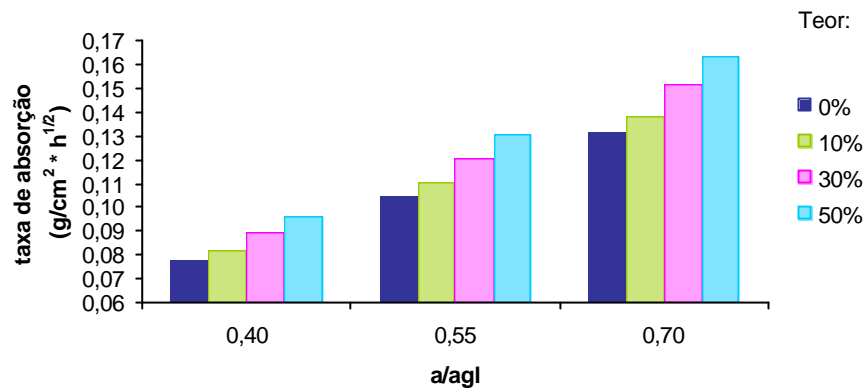


Figura 7.5: comparação entre os efeitos das interações água/aglomerante e teor de substituição de cimento por EGF sobre a taxa de absorção

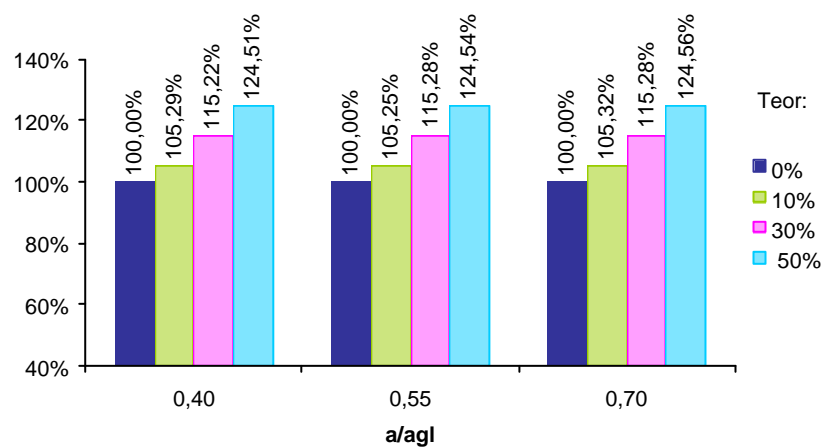


Figura 7.6: comparação entre os efeitos das interações água/aglomerante e teor de substituição de cimento por EGF sobre a taxa de absorção em porcentagem

Através da figura 7.6, pode-se observar que o aumento da taxa de absorção para um mesmo teor de substituição de cimento por EGF é praticamente o mesmo quando aumenta a relação água/aglomerante. O aumento da taxa de absorção do TE (30%) foi de 15%, e do TE (50%) de 24%, em relação ao TE (0%), para todas as relações a/agl. Já o TE (10%) apresentou um comportamento semelhante ao TE (0%), aumentando a taxa de absorção somente em 5%.

Com o objetivo de verificar uma possível correlação entre a taxa de absorção e a resistência à compressão dos concretos com e sem EGF foi construído um gráfico comparativo entre os resultados obtidos neste experimento e os resultados obtidos por Ceccatto (2003). Esta correlação está apresentada na figura 7.7.

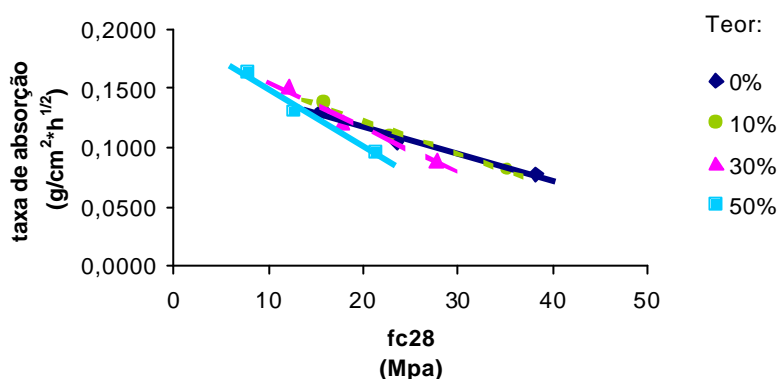


Figura 7.7: relação entre taxa de absorção e resistência à compressão para os concretos com e sem EGF, aos 28 dias

Analisando o gráfico, figura 7.7, nota-se uma boa correlação entre a taxa de absorção e a resistência à compressão dos concretos estudados.

A redução da resistência à compressão do concreto não acontece nas mesmas proporções que o aumento da taxa de absorção de água. Enquanto que a taxa de absorção para o TE (30%) aumenta em torno de 15% em relação ao TE (0%), a resistência à compressão para o mesmo TE (30%) diminui em torno de 24%. Este comportamento é mais evidente para o TE (50%), que teve um aumento da taxa de absorção de somente 24% em relação ao TE (0%), enquanto que para a resistência à compressão a redução foi de 45%. Porém, o comportamento para o TE (10%) foi semelhante ao TE (0%), tanto para a taxa de absorção quanto para a resistência à compressão, pois o aumento e a redução ficaram em torno de 5% e 3%, respectivamente.

Este comportamento pode ser explicado quando considera-se que a resistência à compressão depende diretamente do volume total de poros, ao contrário da taxa de absorção que também depende da intercomunicabilidade dos poros, bem como sua distribuição e diâmetro.

A fim de verificar a taxa de absorção dos concretos com EGF para iguais níveis de resistência à compressão, foi construído um gráfico apresentado na figura 7.8, a partir dos resultados obtidos por Ceccatto (2003), através da equação 7.2.

$$f_c = -215,576 - 25,3684 \cdot \frac{1}{(a/agl)^{1,2}} + 224,691 \cdot \frac{1}{(TE)^{0,1}} - 0,820909 \cdot \frac{1}{(idade)^3} + \quad (\text{equação 7.2})$$

$$30,1479 \cdot \frac{1}{(a/agl + TE)} + 40,5266 \cdot \frac{(idade)^{0,1}}{(a/agl)} - 17,1615 \cdot \frac{(idade)^{0,1}}{(TE)}$$

Na tabela 7.8 estão apresentados os valores da taxa de absorção para as resistências 20, 25, 30 e 35 MPa, calculados pelo modelo expresso na equação 7.1.

Tabela 7.8: resultados da taxa de absorção para os valores de resistência à compressão 20, 25, 30 e 35 MPa aos 28 dias

TE (%)	fc (MPa)	a/agl	Taxa de absorção (g/cm ² * h ^{1/2})
0	35	0,42	0,0809
	30	0,47	0,0900
	25	0,53	0,1009
	20	0,61	0,1152
10	35	0,40	0,0814
	30	0,44	0,0891
	25	0,51	0,1024
	20	0,60	0,1194
30	35	*	*
	30	*	*
	25	0,43	0,0954
	20	0,51	0,1121
50	35	*	*
	30	*	*
	25	*	*
	20	0,42	0,1008

*não foi calculada a taxa de absorção para estes valores de resistência, pois as relações água/aglomerante extrapolam o intervalo definido neste experimento.

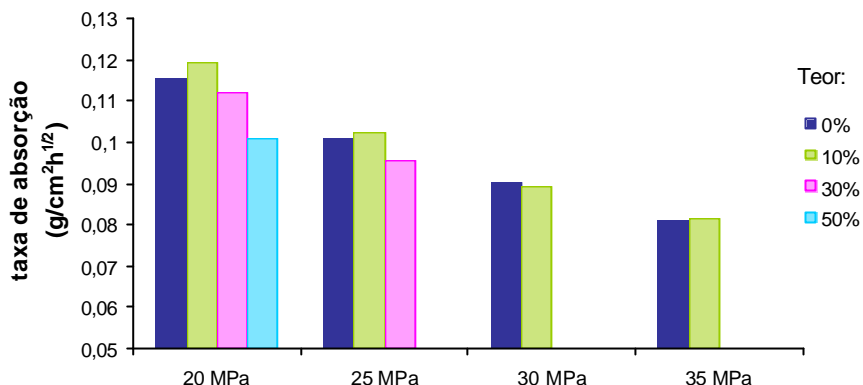


Figura 7.8: taxa de absorção para os valores de resistência à compressão 20, 25, 30 e 35 MPa

Pode-se observar na figura 7.8 que para a mesma resistência à compressão a incorporação de EGF diminui a taxa de absorção do concreto, exceto para o TE (10%) nas resistências 20 e 25 MPa que houve um pequeno aumento de 3,5% e 1,5%, respectivamente. Este acréscimo está provavelmente associado à pequena redução da relação a/agl para a substituição de 10% de EGF de 0,53 para 0,51, para a resistência de 20 MPa, e de 0,61 para 0,60, para a resistência de 25 MPa. Este fato também pode estar associado à variabilidade dos resultados obtidos nos ensaios.

Sendo assim, para uma mesma resistência mecânica é viável tecnicamente a incorporação de EGF, pois diminui a taxa de absorção e diminui o consumo de cimento do concreto.

Segundo Ceccatto (2003), o consumo de cimento para a resistência de 20 MPa para os teores de 10%, 30% e 50% diminui 08%, 8,8% e 15,7%, respectivamente, em relação ao concreto referência. Para a resistência de 25 MPa para os teores de 10%, 30% e 50% diminui 2,5%, 7,7% e 15,1%, respectivamente, em relação ao referência.

Considerando a resistência de 20 MPa, a substituição de 50% de cimento por EGF, além de diminuir em 12,5% a taxa de absorção, reduz o consumo de cimento em 15,7%.

Na tentativa de verificar qual o concreto mais econômico, em termos de economia de cimento, para iguais níveis de taxa de absorção foi calculado os consumos de cimento dos

concretos com e sem EGF, através dos estudos realizados por Ceccatto (2003), apresentados na figura 7.9.

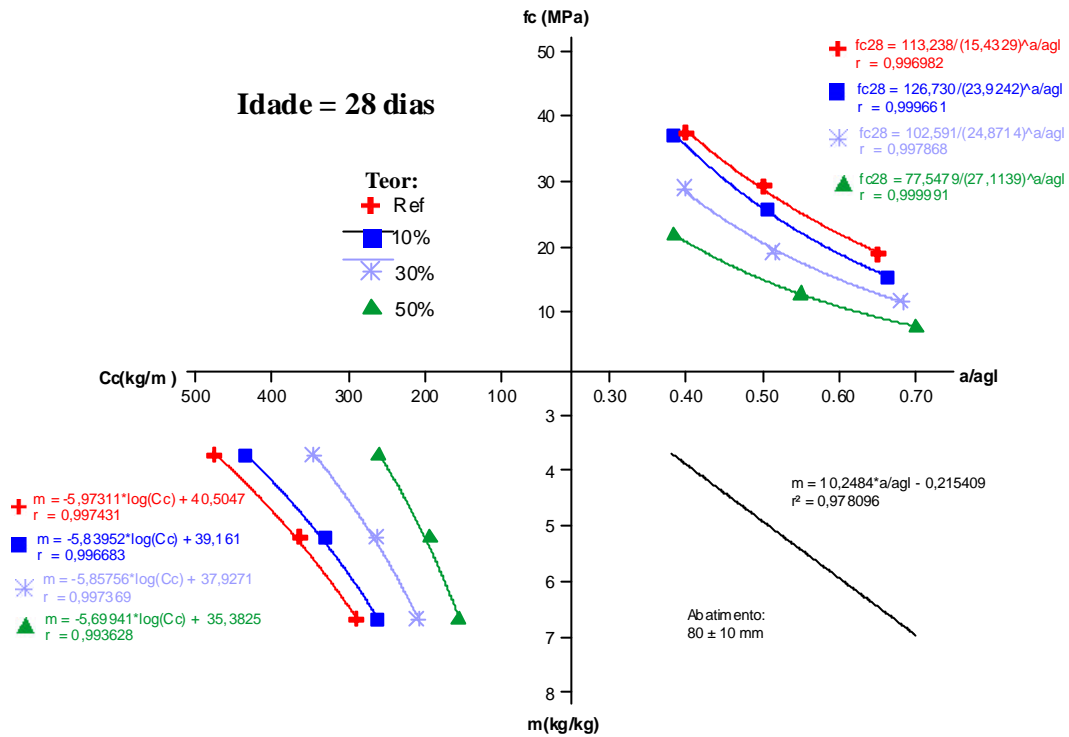


Figura 7.9: diagrama de dosagem dos concretos referência e com EGF, para idade de 28 dias (CECCATTO, 2003)

Na tabela 7.9 estão apresentados os consumos de cimento dos concretos com e sem EGF para um mesmo nível de taxa de absorção, calculados a partir da figura 7.9.

Tabela 7.9: resultados dos consumos de cimento para níveis iguais de taxa de absorção dos concretos com e sem EGF

TE (%)	Taxa de absorção ($\text{g/cm}^2 * \text{h}^{1/2}$)	a/agl	Cc (kg/m^3)
0	0,08	0,41	452
10		0,39	428
30		0,36	358
50		0,33	285
0	0,12	0,64	305
10		0,60	296
30		0,55	257
50		0,50	210
0	0,16	0,86	209
10		0,82	201
30		0,74	184
50		0,68	152

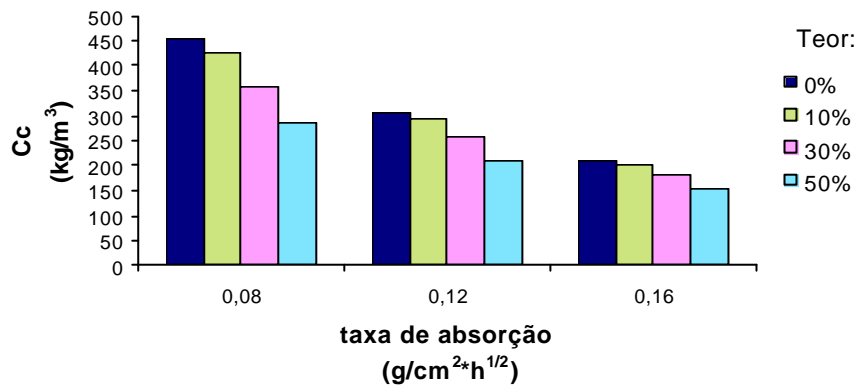


Figura 7.10: consumo de cimento dos concretos referência e com EGF para níveis iguais de taxa de absorção

Como pode ser observado na figura 7.10, à medida que aumenta o teor de EGF no concreto, diminui o consumo de cimento. Sendo assim, para um mesmo nível de taxa de absorção, o concreto mais econômico, em termos de economia de cimento, é o que contém EGF.

7.2 PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

O modelo de comportamento da penetração de íons cloreto do concreto com EGF e do concreto referência, obtido através de análise de regressão não linear (Programa Estatístico SPSS 8.0) está expresso na equação 7.3:

$$CI = B0 * \{(1+TE)^{B1}\} * a/agl^{B2} \quad (\text{equação 7.3})$$

Onde:

CI = penetração de íons cloreto (coulombs);

TE = teor de substituição de EGF;

a/agl = relação água/material aglomerante;

B0, B1 e B2 = parâmetros determinados pelo SPSS.

Para análise dos resultados de penetração de íons cloreto, foram descartados os valores expúrios através da comparação dos resultados obtidos e dos resultados previstos pelo modelo matemático.

Na tabela 7.10 estão apresentados os valores dos parâmetros B0, B1 e B2, bem como o valor do coeficiente de determinação R^2 obtidos no Programa Estatístico SPSS 8.0.

Tabela 7.10: valores dos parâmetros B0, B1 e B2 e do R^2 obtidos no SPSS

Parâmetro	Estimativa	Erro	Intervalo de confiança	
			Mínimo	Máximo
B0	17222,369228	1821,704000	13409,498936	21035,239520
B1	0,265587	0,202854	-0,158992	0,690166
B2	1,404495	0,150322	1,089866	1,719124
R^2	0,85540			

Os valores obtidos no programa experimental e os valores obtidos através do modelo matemático podem ser visualizados na tabela 7.11.

Tabela 7.11: valores obtidos e previstos para penetração de cloretos

TE (%)	a/agl	Penetração de cloretos (coulombs)	
		Valores Obtidos	Valores Previstos
0	0,40	5180	4756
		5072	
	0,50	6755	6506
		4907	
	0,65	9099	9405
		12609	
10	0,38	4257	4539
		3285	
	0,51	6440	6861
		8777	
	0,66	9584	9855
		10573	
30	0,40	4378	5099
		6547	
	0,52	7254	7371
		7848	
	0,68	10766	10743
		10714	
50	0,38	5273	4928
		5615	
	0,55	6264	8283
		3603	
	0,70	13461	11623
		10278	

A partir destes valores foram traçadas as curvas que representam a tendência de comportamento de cada concreto para a penetração de cloretos, onde as linhas representam o comportamento dos concretos segundo o modelo matemático e os pontos representam os valores obtidos experimentalmente, conforme figura 7.11.

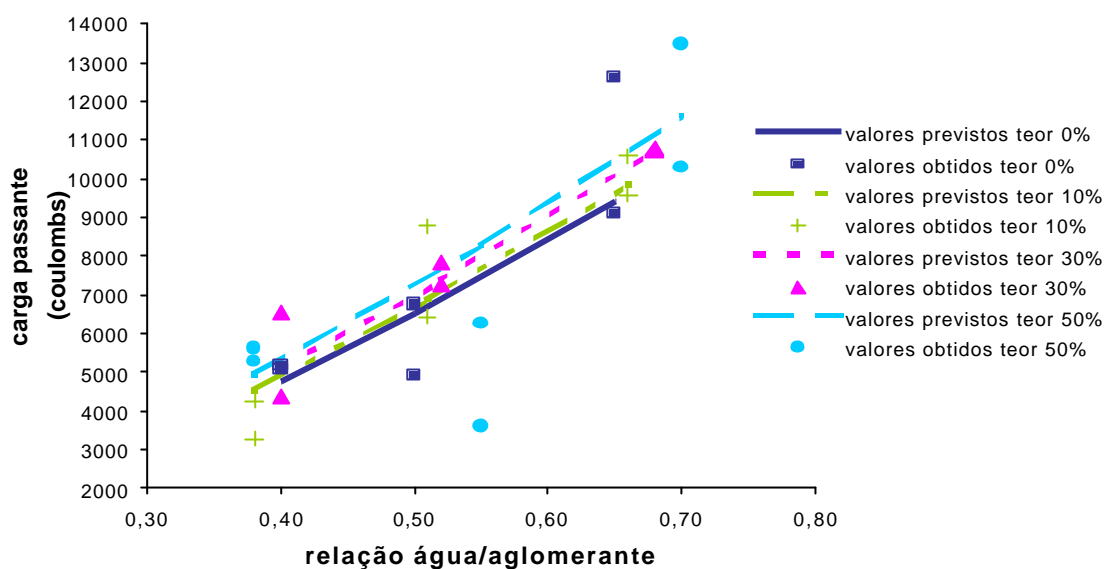


Figura 7.11: curvas previstas pelo modelo matemático para penetração de cloretos

Através da figura 7.11, verifica-se que quanto maior a relação água/aglomerante maior a penetração de cloretos dos concretos.

Na tabela 7.12 está apresentada a análise de variância do modelo para penetração de cloretos e na tabela 7.13 os parâmetros calculados para os fatores analisados.

Tabela 7.12: resultados da análise de variância da penetração de cloretos

Fonte	SQ	GDL	MQ	Fcal	F0,05	Efeito*
Modelo	1326669822	3	442223274	385,4815	3,13	Significativo
Resíduos	21796745,1	19	1147197,1			
Total	1348466567	22				
Total corrigido	150736798	21				

SQ= soma quadrada; GDL= grau de liberdade; MQ= média quadrada

*Fcal>F0,05: Significativo

Tabela 7.13: parâmetros dos fatores analisados para penetração de cloretos

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Significância - p
Constante	B0	17222,3692	1821,704	9,453989	1,6598E-09
TE	B1	0,2655	0,2028	1,309172	0,101992958
a/agl	B2	1,4044	0,1503	9,343979	2,0441E-09

A análise de variância do modelo mostra que apenas o fator água/aglomerante (a/agl) apresenta influência significativa na variável de resposta penetração de cloretos, enquanto que o fator teor de substituição (TE) de cimento por EGF, por apresentar valor de p (significância) superior a 0,05, não exerce influência significativa na penetração de cloretos.

7.2.1 Efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a penetração de cloretos

Através do modelo matemático do comportamento dos concretos com e sem EGF para a penetração de cloretos, pode-se determinar o efeito isolado do fator controlável água/aglomerante sobre a variável de resposta penetração de cloretos.

O gráfico construído para análise do efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a penetração de cloretos considerou o ponto médio (30%) do intervalo definido no programa experimental para o teor de substituição de cimento por EGF. A tabela 7.14 apresenta os resultados da penetração de cloretos para as relações água/aglomerante definidas no programa experimental. A figura 7.12 apresenta o efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a penetração de cloretos do concreto.

Tabela 7.14: resultados da penetração de cloretos em função do efeito isolado da relação água/aglomerante

TE (%)	a/agl	Penetração de Cloretos (coulombs)
30	0,40	5099
	0,55	7975
	0,70	11189

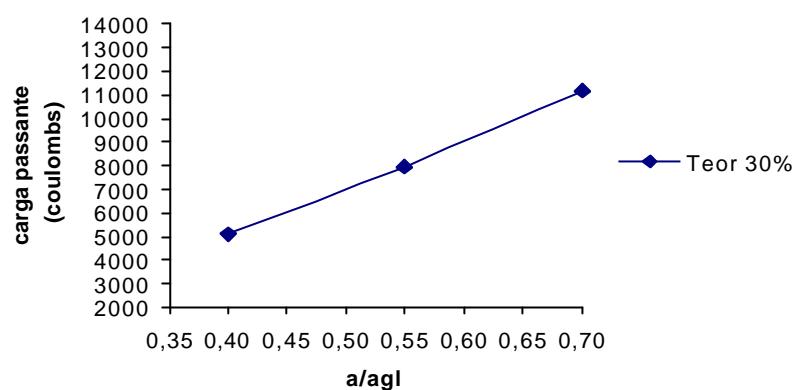


Figura 7.12: efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a penetração de cloretos

Pode ser visualizado na figura 7.12 que a penetração de cloretos aumenta à medida que a relação água/aglomerante aumenta. Segundo Aïtcin (2000a), a relação água/aglomerante é o parâmetro principal que influencia a penetração de íons cloreto no concreto, devido à redução da porosidade capilar. Em concretos com baixas relações água/aglomerante os cloretos são obrigados a difundir-se por caminhos mais tortuosos e desconectados.

7.2.2 Efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a penetração de cloretos

O gráfico construído para análise do efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a penetração de cloretos considerou o ponto médio (0,55) do intervalo definido no programa experimental para as relações água/aglomerante. A tabela 7.15 apresenta os resultados da penetração de cloretos para os teores de substituição de cimento por EGF definidos no programa experimental. A figura 7.13 apresenta o efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a penetração de cloretos do concreto.

Tabela 7.15: resultados da penetração de cloretos em função do efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF

a/agl	TE (%)	Penetração de Cloretos (coulombs)
0,55	0	7438
	10	7629
	30	7975
	50	8283

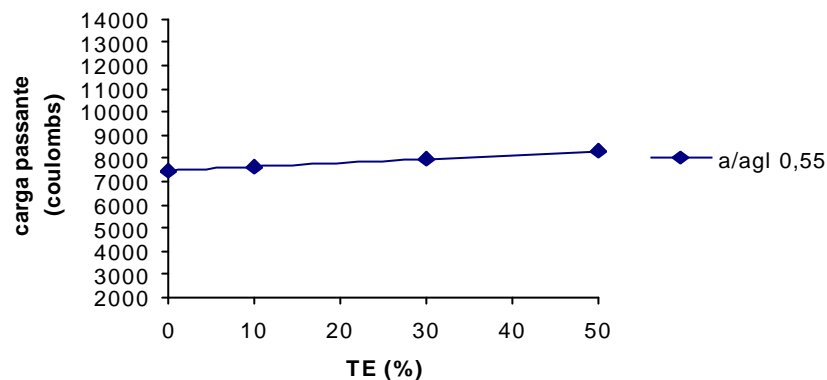


Figura 7.13: efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a penetração de cloretos

Ao contrário do observado para a taxa de absorção, o gráfico do efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a penetração de cloretos mostra que o teor (TE) não apresenta influência estatisticamente significativa na penetração de cloretos, conforme verificado na análise de variância apresentada na tabela 7.13. Enquanto que o aumento da penetração de cloretos do TE (0%) para o TE (50%) foi de 11,3%, no gráfico do efeito isolado do teor de substituição, o aumento da penetração de cloretos da a/agl (0,40) para a/agl (0,70) foi de 119,4%, no gráfico do efeito isolado da relação água/aglomerante (figura 7.12).

A penetração de cloretos praticamente constante com o aumento do teor de EGF, também pode estar associado a menor mobilidade dos íons cloretos no interior dos concretos com EGF, que possuem menor quantidade de hidróxido de cálcio decorrente da substituição de cimento por EGF.

7.2.3 Efeito da interação da relação água/aglomerante e do teor de substituição de cimento por EGF sobre a penetração de cloretos

O efeito da interação da relação água/aglomerante e do teor de substituição de cimento por EGF sobre a penetração de cloretos pode ser visualizado na tabela 7.16 e na figura 7.14, bem como a figura 7.15 mostra um comparativo entre estes efeitos.

Tabela 7.16: resultados da penetração de cloretos em função do efeito da relação água/aglomerante e do teor de substituição de cimento por EGF

TE (%)	a/agl	Penetração de Cloretos (coulombs)
0	0,40	4756
	0,55	7438
	0,70	10436
10	0,40	4878
	0,55	7629
	0,70	10704
30	0,40	5099
	0,55	7975
	0,70	11189
50	0,40	5296
	0,55	8283
	0,70	11623

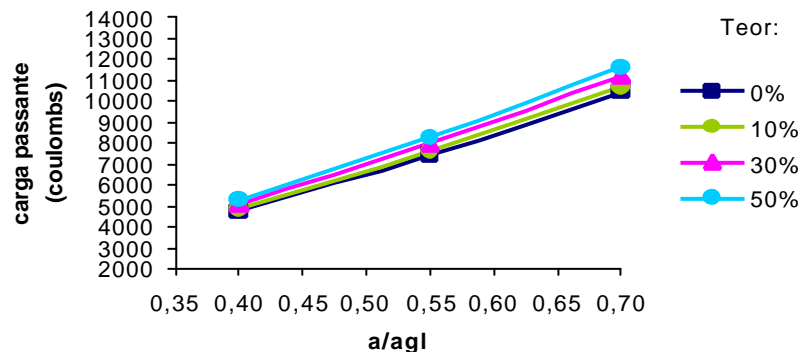


Figura 7.14: efeito da interação da relação água/aglomerante e do teor de substituição de cimento por EGF sobre a penetração de cloretos

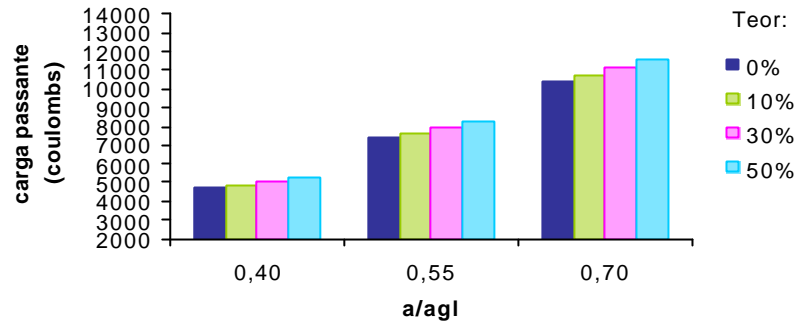


Figura 7.15: comparação entre os efeitos das interações água/aglomerante e teor de substituição de cimento por EGF sobre a penetração de cloretos

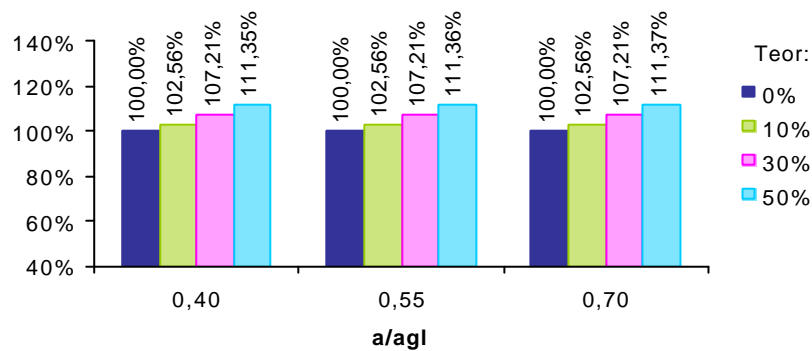


Figura 7.16: comparação entre os efeitos das interações água/aglomerante e teor de substituição de cimento por EGF sobre a penetração de cloretos em porcentagem

Pode ser observado na figura 7.16 que, para os mesmos TE, o acréscimo da penetração de cloretos no momento que aumenta as relações água/aglomerante é praticamente o mesmo. O aumento da penetração de cloretos do TE (30%) foi de 7%, e do TE (50%) de 11%, em relação ao TE (0%), para todas as relações a/agl. Já o comportamento apresentado pelo TE (10%) foi semelhante ao TE (0%), aumentando a penetração de cloretos somente em 2%.

Da mesma forma como foi feito para a taxa de absorção, foi construído um gráfico comparativo entre os resultados obtidos neste experimento e os resultados obtidos por Ceccatto (2003), objetivando verificar uma possível correlação entre a penetração de cloretos e a resistência à compressão dos concretos com e sem EGF. Esta correlação está apresentada na figura 7.17.

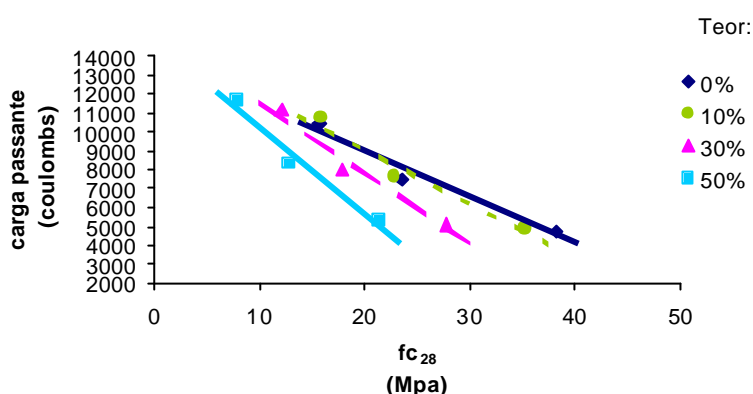


Figura 7.17: relação entre penetração de cloretos e resistência à compressão para os concretos com e sem EGF, aos 28 dias

Fica claro através dos gráficos apresentados nas figuras 7.7 e 7.17, que comparam os resultados da taxa de absorção e da penetração de cloretos com os resultados obtidos por Ceccatto (2003), que o aumento da resistência à compressão do concreto não está diretamente relacionado com a melhoria das propriedades que avaliam a durabilidade. Este fato já foi observado por Ferreira (1999) e Kirchheim (2003).

Observa-se na figura 7.17 que a redução da resistência à compressão do concreto não acontece nas mesmas proporções que o aumento da penetração de cloretos. Enquanto que a penetração de cloretos para o TE (30%) aumenta em torno de 7% em relação ao TE (0%), a resistência à compressão para o mesmo TE (30%) diminui em torno de 24%. Este comportamento é mais evidente para o TE (50%), que teve um aumento da penetração de cloretos de somente 11% em relação ao TE(0%), confirmando a análise estatística de que o teor de substituição não é um fator significativo na penetração de cloretos, enquanto que para a resistência à compressão a redução foi de 45%.

Todavia, o comportamento para o TE (10%) foi semelhante ao TE (0%), tanto para a penetração de cloretos quanto para a resistência à compressão, pois o aumento e a redução ficaram em torno de 2% e 3%, respectivamente.

Ao contrário do comportamento verificado para a EGF, Oh et al. (2002) afirmam que a carga passante em concretos contendo 25% de escória de alto-forno é de 1/3 da carga passante em concretos referência, sendo que a resistência à compressão dos dois concretos foi praticamente a mesma.

Da mesma forma que foi feito para a taxa de absorção, foi construído um gráfico, apresentado na figura 7.18, que apresenta a penetração de cloretos dos concretos com EGF para iguais níveis de resistência à compressão, através dos resultados obtidos por Ceccatto (2003). Na tabela 7.17 estão apresentados os valores da penetração de cloretos para as resistências 20, 25, 30 e 35 MPa, calculados pelo modelo expresso na equação 7.3.

Tabela 7.17: resultados da penetração de cloretos para os valores de resistência à compressão 20, 25, 30 e 35 MPa aos 28 dias

TE (%)	fc (MPa)	a/agl	Penetração de cloretos (coulombs)
0%	35	0,42	5093
	30	0,47	5964
	25	0,53	7060
	20	0,61	8602
10%	35	0,40	4877
	30	0,44	5576
	25	0,51	6861
	20	0,60	8620
30%	35	*	*
	30	*	*
	25	0,43	5644
	20	0,51	7172
50%	35	*	*
	30	*	*
	25	*	*
	20	0,42	5672

*não foi calculada a penetração de cloretos para estes valores de resistência, pois as relações água/aglomerante extrapolam o intervalo definido neste experimento.

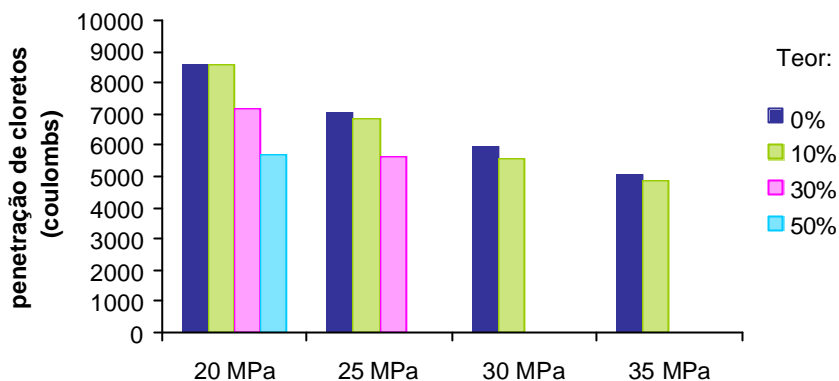


Figura 7.18: penetração de cloretos para os valores de resistência à compressão 20, 25, 30 e 35 MPa aos 28 dias

Verifica-se na figura 7.18 que para a mesma resistência à compressão a incorporação de EGF diminui a penetração de cloretos do concreto à medida que aumenta o teor de EGF. Assim como para a taxa de absorção, pode-se considerar que para a mesma resistência à compressão a incorporação de EGF no concreto é viável tecnicamente, pois diminui a penetração de cloretos e o consumo de cimento do concreto.

Considerando a resistência de 20 MPa para o teor de 10%, a penetração de cloretos permaneceu a mesma, enquanto que para o teor de 30% diminuiu 16,6% e para o teor de 50% diminuiu 34,0%, em relação ao referência.

A partir dos resultados de Ceccatto (2003) para o consumo de cimento, pode-se considerar que a substituição de 50% de cimento por EGF para a resistência de 20 MPa, diminui a penetração de cloretos em 34,0%, além de diminuir o consumo de cimento em 15,7%, em relação ao referência.

Assim como foi realizado para a taxa de absorção, verificou-se qual o concreto mais econômico, em termos de economia de cimento, para níveis iguais de penetração de cloretos. Foram calculados os consumos de cimento dos concretos com e sem EGF, através dos estudos realizados por Ceccatto (2003).

A tabela 7.18 apresenta os resultados dos consumos de cimentos calculados a partir da figura 7.9.

Tabela 7.18: resultados dos consumos de cimento para níveis iguais de penetração de cloretos dos concretos com e sem EGF

TE (%)	Penetração de cloretos (coulombs)	a/agl	Cc (kg/m ³)
0	6000	0,47	408
10		0,46	378
30		0,45	306
50		0,44	234
0	8000	0,58	338
10		0,57	312
30		0,55	257
50		0,54	195
0	10000	0,68	284
10		0,67	262
30		0,65	216
50		0,63	166

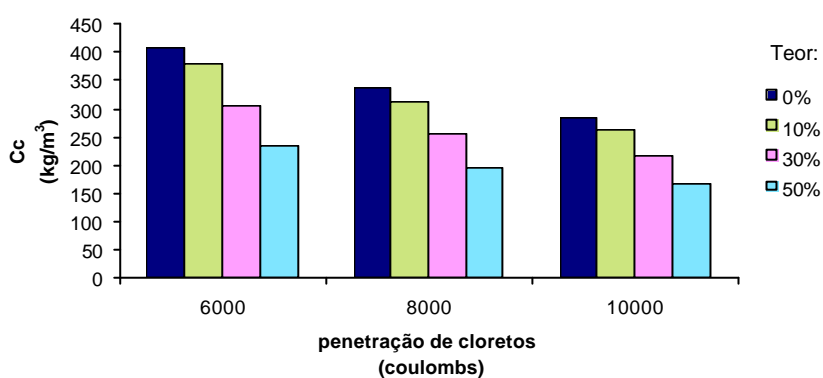


Figura 7.19: consumo de cimento dos concretos referência e com EGF para níveis iguais de penetração de cloretos

A partir da figura 7.19, verifica-se que o concreto mais econômico, em termos de economia de cimento, para níveis iguais de penetração de cloretos, é o concreto com EGF.

8 CONCLUSÕES

Considerando que, atualmente, o concreto é um material estrutural dominante, os engenheiros, no futuro, deveriam selecionar os materiais de construção pensando não somente nos aspectos técnicos e econômicos, mas também nos aspectos ambientalmente corretos destes materiais.

Em função dos resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir que a incorporação da EGF em concretos de mesma relação água/aglomerante, para todos os teores de substituição estudados, aumenta significativamente a taxa da absorção de água por sucção capilar dos concretos. Quanto à penetração de íons cloreto, esta propriedade não foi alterada com a incorporação de EGF.

Entretanto, considerando os mesmos valores de resistência à compressão, a incorporação de EGF não acarreta em perdas de durabilidade, pois a EGF diminui a taxa de absorção e a penetração de cloretos.

Sendo assim, para um mesmo valor de mesma resistência à compressão, a incorporação de EGF é viável tecnicamente, pois diminui a taxa de absorção, a penetração de cloretos, além de diminuir o consumo de cimento dos concretos.

Visto que este trabalho limitou-se a estudar a escória granulada de fundição proveniente de uma só empresa, a análise dos resultados obtidos nesta pesquisa refere-se restritamente à esta escória de fundição. Cabe ressaltar que as conclusões apresentadas estão relacionadas às condições determinadas nesta pesquisa, especialmente quanto aos materiais e métodos utilizados no programa experimental.

8.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR SUCÇÃO CAPILAR DOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM EGF

A taxa de absorção dos concretos com EGF depende significativamente, tanto do teor de substituição de EGF, quanto da relação água/aglomerante.

De uma maneira geral, pode-se considerar que, em termos de taxa de absorção, o teor (TE) de 10% de substituição de cimento por EGF apresentou um desempenho semelhante ao concreto

referência, enquanto que o TE (30%) e o TE (50%) aumentaram a taxa de absorção em 15% e 24%, respectivamente, em relação ao TE (0%).

Já, considerando um mesmo nível de resistência à compressão, a incorporação de EGF diminui a taxa de absorção do concreto. Sendo assim, para uma mesma resistência à compressão, a incorporação de EGF é viável tecnicamente, pois diminui a taxa de absorção e diminui o consumo de cimento do concreto.

Considerando um mesmo nível de taxa de absorção, a incorporação de EGF é viável em termos de economia de cimento, pois o concreto com EGF apresenta um consumo menor de cimento.

8.2 PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO DOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM EGF

Em função da análise dos resultados obtidos para a penetração de íons cloreto, pode-se considerar que a penetração de cloretos dos concretos com EGF depende, significativamente, apenas da relação água/aglomerante. Quanto ao teor de substituição de cimento por EGF, este fator não é estatisticamente significativo, apesar dos resultados mostrarem um aumento da penetração de cloretos com o aumento do teor de EGF.

Assim como para taxa de absorção, para um mesmo valor de resistência à compressão, a incorporação de EGF diminui a penetração de cloretos do concreto à medida que aumenta o teor de EGF. Sendo assim, pode-se considerar que para a mesma resistência à compressão a incorporação de EGF no concreto é viável tecnicamente, pois diminui a penetração de cloretos, além de diminuir o consumo de cimento do concreto.

Considerando um mesmo nível de penetração de cloretos, a incorporação de EGF também é viável em termos de economia de cimento, pois o concreto com EGF apresenta um consumo menor de cimento.

9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste item seguem algumas sugestões para pesquisas utilizando a escória granulada de fundição (EGF), baseadas nas características apresentadas pela EGF neste estudo, bem como nos resultados obtidos neste programa experimental:

- o estudo da finura ideal da EGF que conferisse uma melhor relação custo x desempenho em termos de resistência mecânica e de durabilidade;
- a avaliação da durabilidade dos concretos com EGF em idades mais avançadas, visto que as reações pozolânicas da EGF, que conferem um maior refinamento dos poros do concreto, principalmente para as relações água/aglomerante mais altas, acontecem mais lentamente;
- avaliação da durabilidade de concretos com EGF utilizando outros métodos de ensaio para o estudo da absorção capilar, penetração de íons cloreto, bem como da carbonatação;
- análise do volume de poros da EGF e dos concretos produzidos com EGF através de porosimetria e microscopia, que ajudaria na explicação do comportamento dos concretos com EGF quanto à durabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AITCINa, P. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: PINI, 2000. 667 p.
- AITCINb, P. **Cements of yesterday and today – Concrete of tomorrow**. In: CEMENT AND CONCRETE RESEARCH. Canadá, 2000.
- AKINMUSURU, J. O. **Potential beneficial uses of steel slag wastes for civil engineering purposes**. In: RESOURCES, CONSERVATION AND RECYCLING. Elsevier Science Publishers B. V. 1991.
- ALI, N. A.; CHAN, J. S. S.; PAPAGIANNAKIS, T.; THERIAULT, E. G.; BERGAN, A. T. **The use of steel slag in asphaltic concrete**. In: TRANSPORTATION RESEARCH RECORD. 1999.
- ALMUSALLAM, A. A.; KHAN, F. M.; DULAIJAN, S. U. and AL-AMOUDI, O. S. B. **Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability**. In: CEMENT & CONCRETE COMPOSITES. Elsevier Science Ltd. 2003.
- ANDRADE, C. **Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements**. In: CEMENT AND CONCRETE RESEARCH, Vol. 23, pp. 724-742, 1993.
- ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. Porto Alegre, 2001. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 201. **Guide to Durable Concrete**. ACI Materials Journal. 1992.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration: ASTM C 1202**, In: Annual book of ASTM standards. Philadelphia, 1992.
- ARANZABAL, J; URBINA, G.O.; SÁNCHEZ, J.A.; GÓMEZ, M.L. **Used sand management in foundries**. In: GLOBAL SYMPOSIUM AND RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY. Espanha, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 76 – Cimento Portland: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine)**. Rio de Janeiro, 1998.
- _____. **NBR 5735 – Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991.

____ **NBR 5736 – Cimento Portland pozolânico.** Rio de Janeiro, 1991.

____ **NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.** Rio de Janeiro, 1994.

____ **NBR 5743 – Análise química de cimento Portland: determinação de perda ao fogo.** Rio de Janeiro, 1977.

____ **NBR 5752 – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento.** Rio de Janeiro, 1992.

____. **NBR 6118 – Projeto e execução de obras de concreto armado.** Rio de Janeiro, 1978.

____ **NBR 6474 – Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 1984.

____ **NBR 7211 – Agregado para concreto.** Rio de Janeiro, 1983.

____ **NBR 7217 – Agregados: determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 1987.

____ **NBR 7223 – Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1992.

____ **NBR 7227 – Cimento Portland: determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol.** Rio de Janeiro, 1989.

____ **NBR 7251 – Agregado em estado solto: determinação da massa unitária.** Rio de Janeiro, 1982.

____ **NBR 9776 – Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.** Rio de Janeiro, 1987.

____ **NBR 11578 – Cimento Portland Composto.** Rio de Janeiro, 1991.

____ **NBR 12653 – Materiais pozolânicos.** Rio de Janeiro, 1992.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. **Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack.** In: CEMENT AND CONCRETE RESEARCH. Elsevier Science Ltd 2003.

BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas.** São Paulo, 1995. Tese (Doutorado). Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.

BINA, P.; CASTRO, P. R. F. e YOSHIMURA, H. N. **Metodologia de análise e aprovação de utilização de rejeitos industriais na construção civil: estudo de casos de uso de areia de fundição de descarte na construção civil.** In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO – 44º CONGRESSO BRASILEIRO, 2002.

BILODEAU, A., MALHOTRA V. A. **High-Volume Fly Ash System: Concrete Solution for Sustainable Development.** In: ACI MATERIALS JOURNAL. USA, 2000.

BOURDEAU, L. **The agenda 21 on sustainable construction.** In: CONSTRUCTION & ENVIROMENT. CIB. São Paulo, 2000.

CALLEJA, J. **Escorias y cementos siderúrgicos.** In: MATERIALES DE CONSTRUCCION. Madrid, 1982.

CAMARINI, G. **Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41. São Paulo: IBRACON, 1999.

CASPERS, K. H. **Fusão de ferro fundido sintético em forno cubilô.** In: FUNDIÇÃO E SERVIÇOS. Aranda Editora Técnica: Março, 1999.

CEB - COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON. Durable Concrete Structures. Design Guide. **Bulletin D'information**, no.183. Paris, 1992.

CECCATTO, D. M. **Avaliação da utilização de escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento em concreto – propriedades mecânicas.** Porto Alegre, 2003. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

COOMARASAMY, A.; WALZAK, T. L. **Effects of moirture on surface chemistry of steel slags and steel slag-asphalt paving mixes.** In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Washington, 1995.

DOUGLAS, E. **Blast-furnace slag cement mortar and concrete: durability aspects.** In: Supplementary Cementing Materials for Concrete – CANMET (Canada Centre For Mineral And Energy Technology), 1987.

EHRENBERG, A.; GEISELER, J. **Carbon dioxide emissions with cement production.** In: IRON AND STEEL SLAGS – PROPERTIES AND UTILIZATION. Duisburg: 2000. Artigo apresentado no International Symposium on the Utilization of Metallurgical Slag – ISUS '99, 1999, Beijing, China.

EPA **Puzzled about recycling's value?** Look Beyond the Bin. EPA, January 1998. Disponível na Internet através de www.epa.gov/osw

FERREIRA, A. A. **Concreto de Alto Desempenho com Adição de Cinza de Casca de Arroz: Avaliação de Propriedades Relacionadas com a Durabilidade.** Porto Alegre, 1999.

Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FREITAS DA SILVA FILHO, A. **Contribuição ao estudo do desempenho de concreto produzido com agregado graúdo de escória de ferro-cromo.** Porto Alegre, 2001. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FRIZZO, B. F.; ISAIA, G. C. e GASTALDINI, A. L. G. **Influência da quantidade e da finura de pozolanas na absorção capilar do concreto, em igualdade de resistência à compressão.** In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO – 44º CONGRESSO BRASILEIRO, 2002.

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

GJORV, O. **Important test methods for evaluation of reinforced concrete durability.** In: V. M. MALHOTRA SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT AND FUTURE, 1993, Berkeley, Califórnia. Detroit: American Concrete Institute, 1994.

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

GRIGOLI, A. S. e HELENE, P. **Porosidade do concreto – melhora pela introdução de adições inertes.** In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, Brasília, 2002.

HABASHI, F. **Environmental issues in the metallurgical industry progress and problems.** In: GLOBAL SYMPOSIUM AND RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, 1999, Espanha. **Anais...**Espanha, 1999. p. 721-734.

HELENE, P. ; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: Pini, 1992.

HELENE, P. R. L., **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** São Paulo, 1993. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Civil.

HO, D. W. S.; LEWIS, R. K. **The water sorptivity of concrete: the influence of constituents under continuous during.** In: DURABILITY OF BUILDING MATERIALS, Amsterdam, 1987.

HOFFMANN, A. T. e DAL MOLIN, D. C. C. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos e**

na vida útil de concretos. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, Brasília, 2002.

HOPPE FILHO, J.; ISAIA, G. C. e GASTALDINI, A. L. G. **Durabilidade frente a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar da água de concreto com altos teores de adições minerais e incorporação de cal hidratada.** In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO – 44º CONGRESSO BRASILEIRO, 2002.

ISAIA, G. C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concretos de elevado desempenho: um estudo com vistas à corrosão da armadura.** 1995. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

JAU, W. C.; TSAY, D. S. **A study of the basic engineering properties of slag cement concrete and its resistance to seawater corrosion.** In: CEMENT AND CONCRETE RESEARCH. 1998.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio.** 112 p. São Paulo, 1995. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São de São Paulo.

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

KELHAM, S. A. **Water absorption test for concrete.** In: MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH, v. 40, n. 10. Jun, 1988. p. 106-110.

KHAN, M. I.; AL-ABDUL WAHHAB, H. I. **Improving slurry seal performance in Eastern Saudi Arabia using steel slag.** In: CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS. 1998.

KIPERSTOK, A.; GERBER, W.; TORRES, E. D.; PONTES, L. A. **Curso de Extensão em Tecnologias Limpas e Minimização de Resíduos.** UFBA/ Departamento de Hidráulica, Salvador, 1999.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de Cimento Portland Branco Estrutural: Avaliação da Carbonatação e Absorção Capilar.** 2003, 154p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre.

KROPP, J. **Chlorides in concrete.** In: PERFORMANCE CRITERIA FOR CONCRETE DURABILITY, RILEM REPORT 12, 1995.

KRÜGER, P. **Panorama mundial do aproveitamento de resíduos na siderurgia.** In: CIÊNCIA & TECNOLOGIA. METALURGIA & MATERIAIS, 1995.

KULAKOWSKI, M. P. **Argamassa com adição de microssílica para reparos estruturais: estudo da penetração de cloretos.** 1994, 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre.

LONG, A. E.; HENDERSON, G. D. and MONTGOMERY, F. R. **Why assess the properties of near-surface concrete?** In: CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS. Elsevier Science Ltd. 2001.

LOUZADA, D. M. **Contribuição ao estudo da aplicação das escórias siderúrgicas na fabricação de blocos de concreto.** Rio de Janeiro, 1991. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro.

MASUERO, A.B. **Estabilização das Escória de Aciaria Elétrica com Vistas a sua Utilização como Substituição ao Cimento.** Porto Alegre, 2001. 264 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MASUERO, A. B. et al. **Utilização de escórias de aciaria e de cobre como adições para concretos.** In: INTERNATIONAL CONGRESS OF CONCRETE TECHNOLOGY. **Anais.** Buenos Aires, 1998.

MALHOTRA, V. M. **Properties of fresh and hardened concrete incorporating ground, granulated, blast-furnace slag.** In: Supplementary Cementing Materials for Concrete – CANMET (Canada Centre For Mineral And Energy Technology), 1987.

MARIOTTO, C. L. **Regeneração de areias: uma tentativa de discussão sistemática.** In: FUNDIÇÃO & MATÉRIAS-PRIMAS, 2000.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: Pini, 1994.

MIRANDA, E. R.; KÜHL, E.; RIBEIRO, A.M.; SCHMAUCH, D.; WARMLING, T. **Estudo da adição de escória de metais ferrosos como matéria-prima para a indústria cerâmica.** In: Jornadas SAM'98 – IBEROMET V. Joinville, 1998.

MONSHI, A., ASGARANI, M. K. **Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone.** In: CEMENT AND CONCRETE RESEARCH. 1999.

MONTGOMERY, D. G. WANG, G. **Preliminary laboratory study of steel slag for blended cement manufacture.** In: MATERIAL FORUM. 1991.

MORAES, C. A. M. **Ferros e aços fundidos.** Apostila de aula. Porto Alegre: PPEM/UFRGS, 2000.

MORAES, C. A. M. **Reciclagem de resíduos sólidos de fundição: uma análise crítica.** In: 57º CONGRESSO ANUAL DA ABM-INTERNACIONAL. São Paulo, 2002.

MORINO, K., IWATSUKI, E. **Utilization of electric arc furnace oxidizing slag as concrete aggregate**. In: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLIN WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY. Spain, 1999.

MOURA, W. A. **Utilização de Escória de Cobre como Adição e como Agregado Miúdo para Concreto**. Porto Alegre, 2000. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MROUEH, U., ESKOLA, P., LAINE-YLIJOKI, J. **Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction**. In: WASTE MANAGEMENT. Elsevier Science Ltd. 2001.

NATIONAL SLAG ASSOCIATION. Folder: NSA News – Annual Meeting. 2000.

NEPOMUCENO, A.A. **Comportamiento de los morteros de reparacion frente a la carbonatacion y a la penetracion de cloruros en estructuras de hormignon armado dañadas por corrosion de armaduras, estudio mediante la tecnica e resistencia de polarizacion**. Madrid, 1992. Tese (Doutorado). Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Caminos y Puertos, Universidad Politecnica de Madrid.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2ed. São Paulo: PINI, 1997. 828p.

OH, B. H.; CHA, S. W.; JANG, B. S. and JANG, S. Y. **Development of high-performance concrete having high resistance to chloride penetration**. In: NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN. Elsevier Science B. V. 2002.

PEREIRA, E. A. C. **Aspectos técnicos da gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas a coque**. In: 25º SEMINÁRIO DE REDUÇÃO E MATÉRIAS-PRIMAS EM SIDERURGIA. Rio de Janeiro, 1994.

PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura**. Porto Alegre, 2001. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de cimento Portland**. 11 ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987. 307p.

PIESKE, A.; CHAVES FILHO, L. M.; REIMER, J. F. **Ferros fundidos cinzentos de alta qualidade**. Joinville: SOCIEDADE EDUCACIONAL TUPY, 1980.

POLDER, R. B.; PEELLEN, W. H. A. **Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity**. In: CEMENT & CONCRETE COMPOSITES. Elsevier Science Ltd, 2002.

POWELL, J.; SMITH, J. **Uma revisão da fusão em forno cubilô**. In: FUNDIÇÃO E SERVIÇOS, 1999.

RAI, A.; PRABAKAR, J.; RAJU, C. B. and MORCHALLE, R. K. **Metallurgical slag as a component in blended cement**. In: CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS. Elsevier Science B. V. 2002.

RECENA, F. A. P. **Dosagem empírica e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2002. 166p.

REGAN, R.W.; TIKALSKY, P.J.; VOIGT, R.C. **Beneficial use of fine foundry aggregate: three promising options**. In: AFS Transactions. Pennsylvania, 1998.

RHODE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – estudo laboratorial**. Porto Alegre, 2002. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. Apostila de aula. Porto Alegre: PPGEP/UFRGS, 2000.

RODOLPHO, P.M., ISA, M.M. **A Influência da Resistência à Penetração de Cloretos e da Carbonatação na Durabilidade das Construções de Microconcreto**. In: CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD, 7. Anais: Montevideo, 1999.

SIEGEL, M. **Fundição**. São Paulo: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS, 1982.

SILVA FILHO, L.C.P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssilica**. Porto Alegre, 1994. 143p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998.

SUN, S.; JIANHUA, W.; GUILIN, Z.; YONGJUN, L. **Steel slag cement**. In: MACMASTER SYMPOSIUM PRETREATMENT AND RECLAMATION OF DUST, SLUDGES SCALES IN STEELPLANTS. Canadá, 1993.

TAYEB, A. M. **Use of some industrial wastes as energy storage media**. In: ENERGY CONVERS. MGMT. Elsevier Science Ltd, 1995.

TEIXEIRA, E. N. **Resíduos sólidos: minimização e reaproveitamento energético**. In: RESÍDUOS INDUSTRIAIS – SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM. São Paulo, 2000.

TORII, K.; SASATANI, T.; KAWAMURA, M. **Effects of fly ash, blast furnace slag and silica fume on resistance of mortar to calcium chloride attack**. In: MALHOTRA, V. M.(Ed.), Proceedings of 5th CANMET/ACI International Conference on Fly ash, Silica fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. 1995.

TÜFEKÇI, M.; DEMIRBAS, A.; GENÇ, H. **Evaluation of steel furnace slags as cement additives.** In: CEMENT AND CONCRETE RESEARCH. 1997.

TÜRKMEN, I. **Influence of different curing conditions on the physical and mechanical properties of concretes with admixtures of silica fume and blast furnace slag.** In: MATERIALS LETTERS. Elsevier Science B. V. 2003.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete.** In: SWEDISH CEMENT AND CONCRETE RESEARCH INSTITUTE. Stockholm, 1982.

UEHARA, K.; SAKURAI, M. **Application of foundry slag for metal cutting – performance as a diffusion inhibitor.** In: JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY. Japan, 1996.

VALLINA, J. J. **Forno cubilô à coque.** Escola SENAI: Centro Nacional de Tecnologia em Metalurgia. 1998.

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

ANEXOS

**ANEXO 1: distribuição granulométrica da escória granulada de fundição
moída nos tempos de 40, 60, 80, 100 e 120 minutos**



PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref : MOINHO PEQ 40 MIN Type produit : ESCORIA Client : NORIE Comments : ESCORIA GRAN FUNDICAO Liquid : Dispersing agent : Hexametafosfato sódio Operator : UFRGS/CT/LAPROM/LOREN Company : Location : Date : 21/01/2002 Time : 15:31:59 Index meas. : 703	Ultrasounds : 60 s (+during) Concentration : 32 Diameter at 10% : 2.15 mu Diameter at 50% : 26.40 mu Diameter at 90% : 77.72 mu Fraunhofer Density/Factor : ----- Specific surface : ----- Auto. dilution/top up : No / No Nb Measur./Rins. : 20 / 4
---	---

	Standards classes										in volume / undersize										
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.01	0.20	0.43	1.14	1.76	2.35	2.90	3.41	3.88	4.32	Q3	4.74	5.16	5.59	6.02	6.45	6.88	7.74	8.58	9.39	10.19
q3	0.00	0.02	0.04	0.07	0.11	0.14	0.17	0.19	0.21	0.23	q3	0.25	0.27	0.31	0.34	0.37	0.40	0.44	0.49	0.53	0.58
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30	x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	10.96	11.69	12.39	13.06	13.69	14.29	14.87	15.43	15.97	16.76	Q3	17.50	18.44	19.12	19.76	20.57	21.51	22.40	23.26	24.11	24.95
q3	0.61	0.63	0.65	0.67	0.67	0.68	0.70	0.71	0.72	0.75	q3	0.76	0.78	0.80	0.80	0.81	0.81	0.83	0.86	0.91	0.95
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	25.79	27.46	29.12	30.74	32.31	33.81	35.24	36.60	37.91	39.20	Q3	40.47	41.73	42.99	44.26	45.54	48.15	51.99	54.43	56.71	58.86
q3	1.01	1.09	1.20	1.28	1.35	1.39	1.43	1.45	1.49	1.55	q3	1.62	1.69	1.78	1.88	1.98	2.16	2.33	2.44	2.43	2.44
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00	x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	60.89	62.79	64.60	67.16	68.79	72.66	74.87	77.03	79.84	81.84	Q3	83.75	86.66	88.74	91.02	92.98	94.63	95.98	97.08	98.83	99.66
q3	2.45	2.42	2.43	2.44	2.47	2.53	2.61	2.70	2.80	2.82	q3	2.83	2.74	2.61	2.43	2.23	1.99	1.72	1.48	1.06	0.52
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0	x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	99.83	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	Q3	99.83	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.30	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	q3	0.30	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0	x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diameter / mu Q3 : cumulative value / % q3 : population density / %



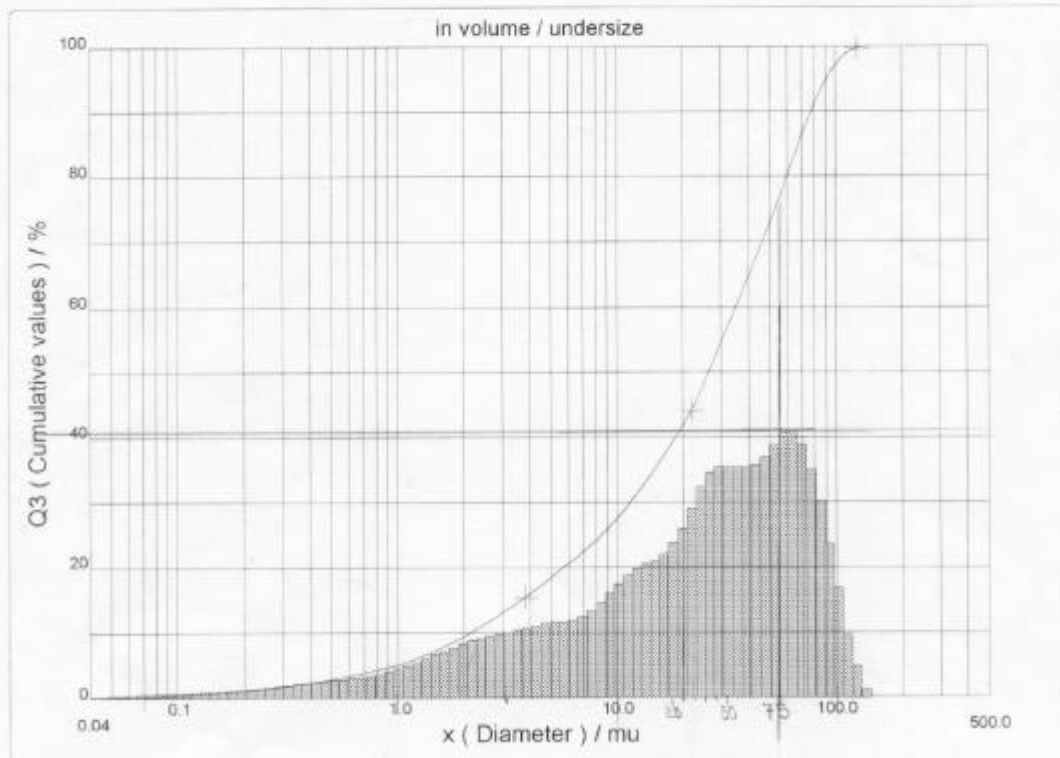
PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref	: MOINHO PEQ 40 MIN
Type produit	: ESCORIA
Client	: NORIE
Comments	: ESCORIA GRAN FUNDICAO
Liquid	:
Dispersing agent	: Hexametáfosfato sódio
Operator	: UFRGS/CT/LAPROM/LOREN
Company	:
Location	:
Date : 21/01/2002	Time : 15:31:59
Index meas.	: 703

Ultrasounds	: 60	s (+during)
Concentration	: 32	
Diameter at 10%	: 2.15	mu
Diameter at 50%	: 26.40	mu
Diameter at 90%	: 77.72	mu
Fraunhofer	:	
Density/Factor	-----	
Specific surface	-----	
Auto. dilution/top up	: No / No	
Nb Measur./Rins.	: 20 / 4	



Serial nb : |

Ref : 2.r44.m3.66M1818/3.36/703/m1.20.5.10.IFl.20.5.10.IIb/Q.0.0.0.0/300.0.15.p60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.0/V.2.12



PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref : MOINHO PEQ 60 MIN
 Type produit : ESCORIA
 Client : NORIE
 Comments : ESCORIA GRAN FUNDICAO
 Liquid : AGUA
 Dispersing agent : Hexametáfosfato sódico
 Operator : UFRGS/CT/LAPROM/LOREN
 Company :
 Location :
 Date : 21/01/2002 Time : 15:49:15
 Index meas. : 704

Ultrasounds : 60 s (+during)
 Concentration : 62
 Diameter at 10% : 1.02 mu
 Diameter at 50% : 14.80 mu
 Diameter at 90% : 49.91 mu
 Fraunhofer
 Density/Factor : -----
 Specific surface : -----
 Auto. dilution/top up : No / No
 Nb Measur./Rins. : 20 / 4

Standards classes in volume / undersize

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.40	1.16	1.62	3.36	5.58	6.92	7.49	7.88	8.28	8.78
q3	0.10	0.10	0.09	0.18	0.40	0.34	0.19	0.16	0.19	0.27
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	9.32	9.87	10.43	11.00	11.57	12.15	13.32	14.50	15.67	16.82
q3	0.34	0.38	0.43	0.48	0.52	0.57	0.64	0.73	0.81	0.88
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	17.93	18.99	19.99	20.94	21.83	22.68	23.48	24.26	25.00	26.08
q3	0.94	0.97	0.99	1.01	1.01	1.03	1.03	1.06	1.06	1.09
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	27.11	28.41	29.35	30.25	31.39	32.72	33.99	35.19	36.35	37.48
q3	1.12	1.14	1.18	1.20	1.21	1.22	1.26	1.27	1.32	1.37
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	38.58	40.73	42.81	44.82	46.74	48.59	50.35	52.04	53.66	55.24
q3	1.41	1.50	1.60	1.69	1.76	1.83	1.87	1.92	1.96	2.03
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	56.77	58.27	59.74	61.20	62.64	65.49	69.56	72.08	74.43	76.62
q3	2.07	2.14	2.21	2.30	2.37	2.51	2.63	2.68	2.67	2.65
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	78.67	80.59	82.40	84.93	86.49	90.06	91.92	93.56	95.39	96.52
q3	2.63	2.60	2.59	2.56	2.52	2.48	2.34	2.18	1.94	1.70
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	97.45	98.59	99.16	99.62	99.87	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	1.47	1.14	0.76	0.52	0.30	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diameter / mu Q3 : cumulative value / % q3 : population density / %



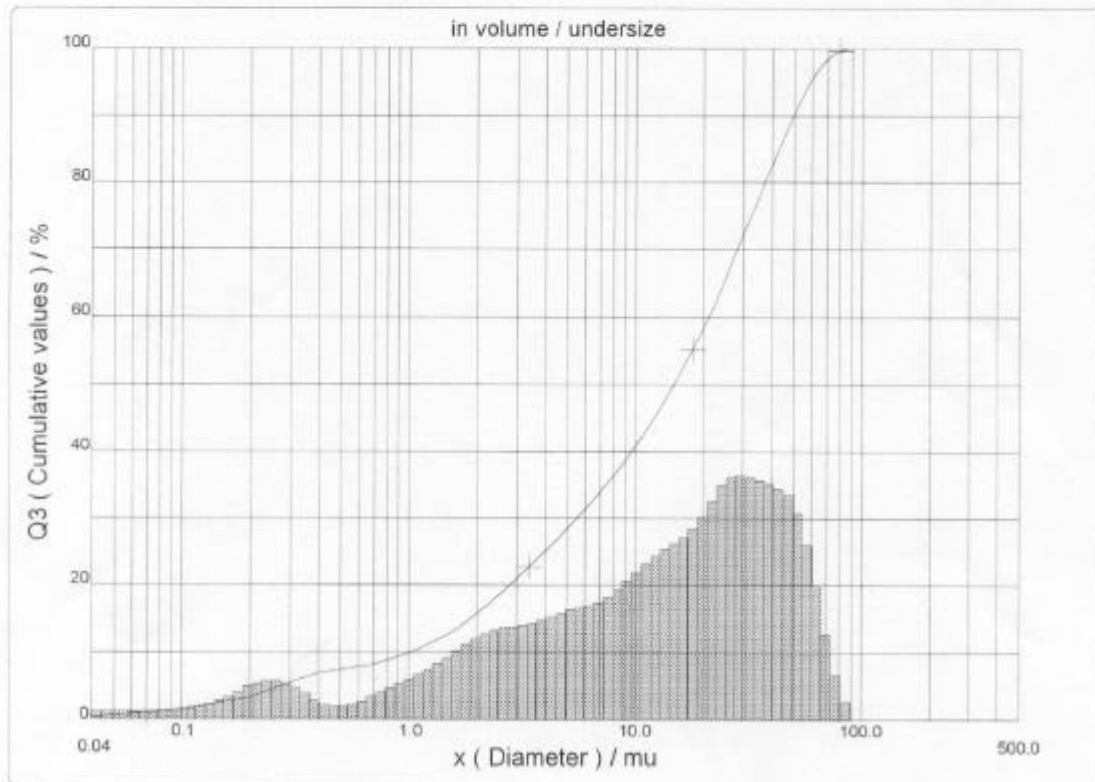
PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 μ m - 500.00 μ m / 100 Classes

Sample Ref	: MOINHO PEQ 60 MIN
Type produit	: ESCORIA
Client	: NORIE
Comments	: ESCORIA GRAN FUNDICAO
Liquid	: AGUA
Dispersing agent	: Hexametáfosfato sódio
Operator	: UFRGS/CT/LAPROM/LOREN
Company	:
Location	:
Date : 21/01/2002	Time : 15:49:15
Index meas.	: 704

Ultrasounds	: 60	s (+during)
Concentration	: 62	
Diameter at 10%	: 1.02	μ m
Diameter at 50%	: 14.80	μ m
Diameter at 90%	: 49.91	μ m
Fraunhofer	:	
Density/Factor	: -----	
Specific surface	: -----	
Auto. dilution/top up	: No / No	
Nb Measur./Rins.	: 20 / 4	





PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref : MOINHO PEQ 80 MIN
 Type produit : ESCORIA
 Client : NORIE
 Comments : ESCORIA GRAN FUNDICAO
 Liquid : AGUA
 Dispersing agent : Hexametafosfato sódio
 Operator : UFRGS/CT/LAPROM/LOREN
 Company :
 Location :
 Date : 21/01/2002 Time : 15:56:49
 Index meas. : 705

Ultrasounds : 60 s (+during)
 Concentration : 39
 Diameter at 10% : 1.02 mu
 Diameter at 50% : 8.47 mu
 Diameter at 90% : 37.60 mu
 Fraunhofer
 Density/Factor : -----
 Specific surface : -----
 Auto. dilution/top up : No / No
 Nb Measur./Rins. : 20 / 4

Standards classes

in volume / undersize

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.16	0.50	0.74	1.53	2.46	3.18	3.82	4.64	5.68	6.99
q3	0.04	0.05	0.05	0.09	0.17	0.19	0.21	0.34	0.51	0.73
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	8.37	9.74	11.07	12.34	13.57	14.74	16.93	18.93	20.77	22.44
q3	0.88	0.97	1.04	1.09	1.15	1.18	1.23	1.27	1.31	1.31
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	23.99	25.44	26.80	28.09	29.33	30.51	31.66	32.77	33.85	35.41
q3	1.33	1.36	1.37	1.40	1.44	1.46	1.51	1.54	1.58	1.62
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	36.90	38.77	40.07	41.29	42.78	44.43	45.93	47.34	48.71	50.07
q3	1.65	1.68	1.67	1.66	1.62	1.54	1.52	1.53	1.59	1.68
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	51.42	54.11	56.77	59.33	61.75	63.99	66.03	67.87	69.54	71.07
q3	1.77	1.91	2.09	2.20	2.26	2.26	2.21	2.13	2.06	2.00
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	72.47	73.77	75.00	76.18	77.31	79.49	82.51	84.35	86.03	87.58
q3	1.94	1.90	1.89	1.90	1.90	1.96	2.00	2.00	1.95	1.91
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	88.98	90.25	91.40	92.92	93.82	95.72	96.64	97.41	98.22	98.69
q3	1.83	1.76	1.68	1.57	1.48	1.35	1.18	1.05	0.88	0.72
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	99.06	99.50	99.71	99.87	99.96	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.60	0.45	0.29	0.19	0.11	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diameter / mu Q3 : cumulative value / % q3 : population density / %



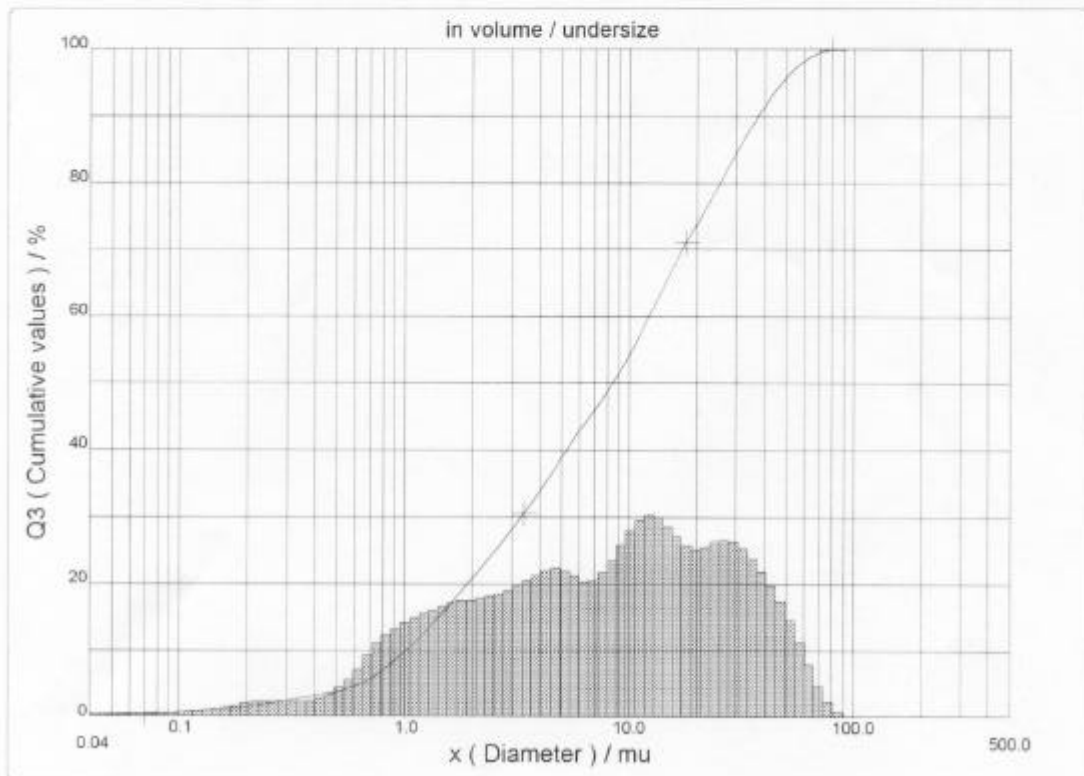
PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 μ m - 500.00 μ m / 100 Classes

Sample Ref : MOINHO PEQ 80 MIN
 Type produit : ESCORIA
 Client : NORIE
 Comments : ESCORIA GRAN FUNDICAO
 Liquid : AGUA
 Dispersing agent : Hexametáfosfato sódio
 Operator : UFRGS/CT/LAPROM/LOREN
 Company :
 Location :
 Date : 21/01/2002 Time : 15:56:49
 Index meas. : 705

Ultrasounds : 60 s (+during)
 Concentration : 39
 Diameter at 10% : 1.02 μ m
 Diameter at 50% : 8.47 μ m
 Diameter at 90% : 37.60 μ m
 Fraunhofer
 Density/Factor : -----
 Specific surface : -----
 Auto. dilution/top up : No / No
 Nb Measur./Rins. : 20 / 4



Serial nb : 1

Ref : 1_r44.m3.45M1818/3_36/705/m1,20,5,10,1Fh,20,5,10,1Rb/Q-0,0,0,0/300,0,15_g60,2,9,10,1,10_P6500,1,10,N,0/V,2,13



PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref : MOINHO PEQ 100 MIN Type produit : ESCORIA Client : NORIE Comments : ESCORIA GRAN FUNDICAO Liquid : AGUA Dispersing agent : Hexametafosfato sódio Operator : UFRGS/CT/LAPROM/LOREN Company : Location : Date : 21/01/2002 Time : 16:03:01 Index meas. : 706	Ultrasounds : 60 s (+during) Concentration : 54 Diameter at 10% : 0.86 mu Diameter at 50% : 5.65 mu Diameter at 90% : 28.18 mu Fraunhofer Density/Factor : ----- Specific surface : ----- Auto. dilution/top up : No / No Nb Measur./Rins. : 20 / 4
---	--

	Standards classes					in volume / undersize				
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.20	0.65	0.96	2.00	3.19	4.14	5.01	6.07	7.38	8.99
q3	0.05	0.06	0.07	0.12	0.23	0.26	0.30	0.45	0.66	0.93
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	10.67	12.33	13.94	15.48	16.97	18.39	21.07	23.54	25.81	27.90
q3	1.11	1.22	1.31	1.37	1.44	1.49	1.56	1.63	1.67	1.70
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	29.83	31.62	33.29	34.86	36.33	37.74	39.07	40.35	41.58	43.34
q3	1.72	1.73	1.75	1.76	1.77	1.80	1.80	1.84	1.86	1.89
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	44.99	47.04	48.46	49.78	51.39	53.17	54.79	56.32	57.79	59.25
q3	1.90	1.91	1.89	1.86	1.81	1.72	1.69	1.72	1.77	1.87
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	60.68	63.48	66.16	68.68	71.00	73.13	75.05	76.79	78.36	79.82
q3	1.94	2.06	2.18	2.24	2.25	2.23	2.16	2.09	2.01	1.98
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	81.16	82.41	83.58	84.67	85.69	87.54	89.88	91.18	92.29	93.24
q3	1.92	1.89	1.86	1.82	1.78	1.72	1.60	1.46	1.33	1.21
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	94.05	94.73	95.32	96.07	96.50	97.42	97.88	98.29	98.76	99.05
q3	1.10	0.97	0.89	0.80	0.73	0.68	0.61	0.58	0.53	0.46
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	99.30	99.60	99.76	99.89	99.96	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.42	0.32	0.23	0.16	0.09	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diameter / mu Q3 : cumulative value / % q3 : population density / %

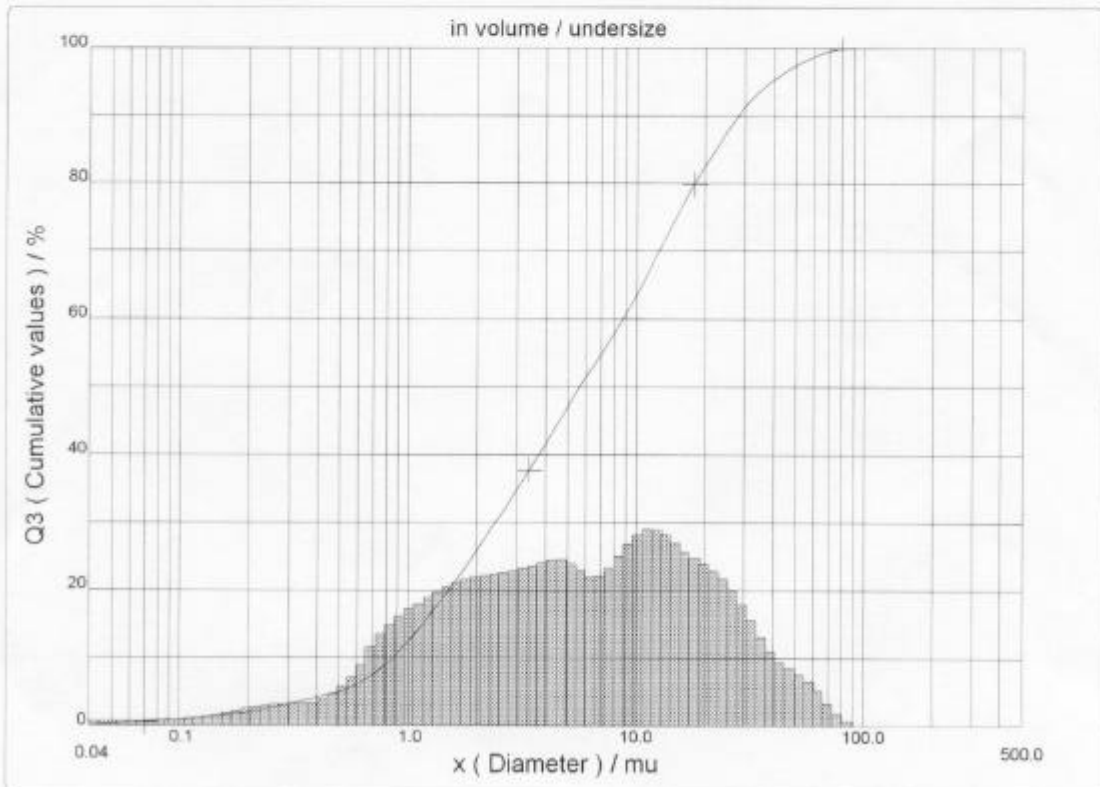


PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 μ m - 500.00 μ m / 100 Classes

Sample Ref	: MOINHO PEQ 100 MIN	Ultrasounds	: 60	s (+during)
Type produit	: ESCORIA	Concentration	: 54	
Client	: NORIE	Diameter at 10%	: 0.86	μ m
Comments	: ESCORIA GRAN FUNDICAO	Diameter at 50%	: 5.65	μ m
Liquid	: AGUA	Diameter at 90%	: 28.18	μ m
Dispersing agent	: Hexametáfosfato sódio	Fraunhofer		
Operator	: UFRGS/CT/LAPROM/LOREN	Density/Factor	-----	
Company	:	Specific surface	-----	
Location	:	Auto. dilution/top up	: No / No	
Date : 21/01/2002	Time : 16:03:01	Nb Measur./Rins.	: 20 / 4	
Index meas.	: 706			



Serial nb : 1

Ref : 1.r44.m3.45M1818/3.36/706/ml.20.5.10.1Flh.20.5.10.1Bh/Q-.0.0.0.0/300.0.15.p60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.0/V.2.13



PARTICLE SIZE DISTRIBUTION CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref : MOINHO PEQUENO 120 MIN Type produit : ESCORIA Client : NORIE/AGUIDA Comments : ESCORIA GRAN FUNDICAO Liquid : AGUA Dispersing agent : Hexametafosfato sódio Operator : UFRGS/CT/LAPROM/PATRICIA Company : Location : Date : 15/01/2002 Time : 13:07:04 Index meas. : 692	Ultrasounds : 60 s (+during) Concentration : 134 Diameter at 10% : 0.76 mu Diameter at 50% : 4.38 mu Diameter at 90% : 22.98 mu Fraunhofer Density/Factor : ----- Specific surface : ----- Auto. dilution/top up : No / No Nb Measur./Rins. : 20 / 4
---	---

Standards classes in volume / undersize

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.26	0.82	1.20	2.46	3.89	4.99	5.96	7.20	8.77	10.75
q3	0.07	0.08	0.09	0.15	0.28	0.31	0.35	0.54	0.81	1.18
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	12.82	14.87	16.84	18.72	20.51	22.21	25.35	28.18	30.73	33.02
q3	1.40	1.55	1.65	1.72	1.78	1.83	1.88	1.92	1.93	1.92
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	35.12	37.04	38.83	40.50	42.08	43.58	45.00	46.36	47.66	49.52
q3	1.93	1.91	1.93	1.93	1.95	1.97	1.98	2.01	2.02	2.05
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	51.26	53.41	54.90	56.29	58.00	59.91	61.64	63.24	64.75	66.19
q3	2.06	2.06	2.04	2.01	1.98	1.90	1.86	1.85	1.87	1.90
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	67.57	70.17	72.59	74.82	76.89	78.79	80.53	82.12	83.57	84.90
q3	1.93	1.97	2.03	2.05	2.06	2.05	2.01	1.97	1.91	1.86
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	86.11	87.22	88.23	89.16	90.02	91.54	93.41	94.43	95.31	96.05
q3	1.79	1.73	1.65	1.60	1.54	1.45	1.32	1.18	1.09	0.97
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	96.70	97.25	97.73	98.32	98.65	99.26	99.51	99.69	99.85	99.92
q3	0.91	0.81	0.75	0.65	0.58	0.46	0.34	0.26	0.19	0.11
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	99.97	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.09	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

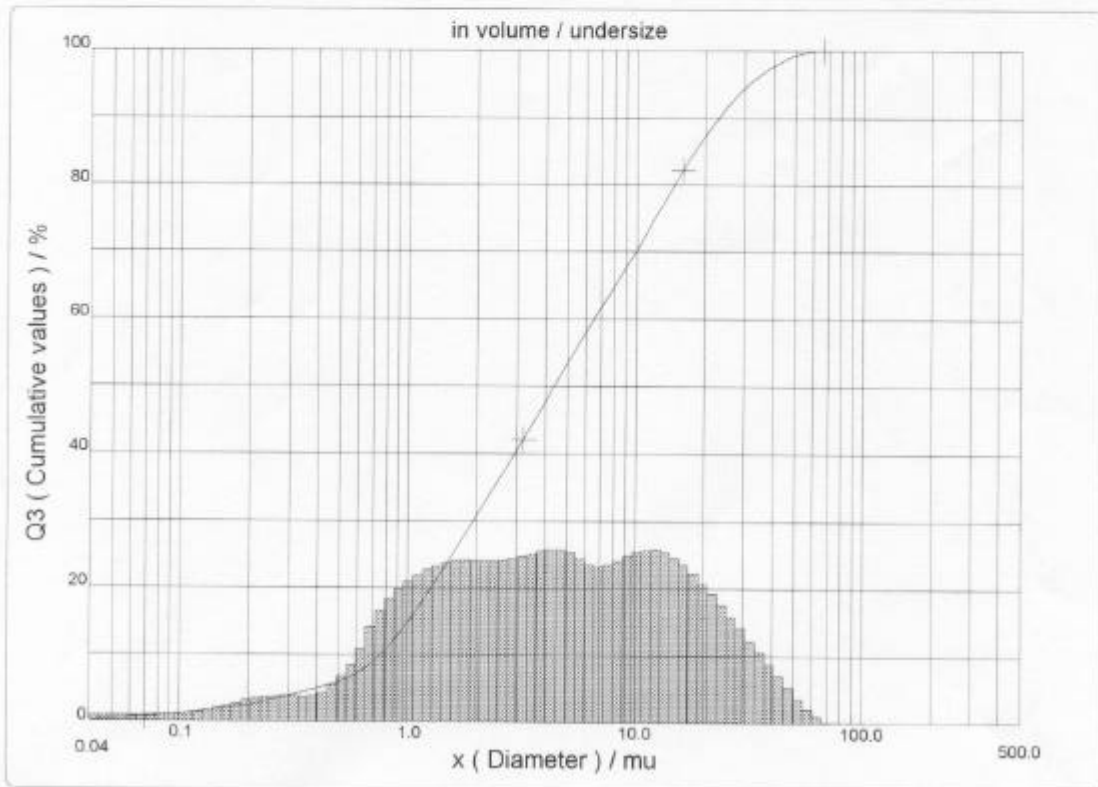
x : diameter / mu Q3 : cumulative value / % q3 : population density / %



PARTICLE SIZE DISTRIBUTION CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref : MOINHO PEQUENO 120 MIN Type produit : ESCORIA Client : NORIE/AGUIDA Comments : ESCORIA GRAN FUNDICAO Liquid : AGUA Dispersing agent : Hexametafosfato sódio Operator : UFRGS/CT/LAPROM/PATRICIA Company : Location : Date : 15/01/2002 Time : 13:07:04 Index meas. : 692	Ultrasounds : 60 s (+during) Concentration : 134 Diameter at 10% : 0.76 mu Diameter at 50% : 4.38 mu Diameter at 90% : 22.98 mu Fraunhofer Density/Factor : ----- Specific surface : ----- Auto. dilution/top up : No / No Nb Measur./Rins. : 20 / 4
---	---



ANEXO 2: distribuição granulométrica do cimento CP II-F 32



PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref : CPII-F	Ultrasounds : 60 s (+during)
Type produit : CIMENTO	Concentration : 206
Client : NORIE/DIANA/JULIANA	Diameter at 10% : 0.98 mu
Comments :	Diameter at 50% : 16.67 mu
Liquid :	Diameter at 90% : 58.98 mu
Dispensing agent : NAO	Fraunhofer
Operator : UFRGS/CT/LAPROM/PATRICIA	Density/Factor : -----
Company :	Specific surface : -----
Location :	Auto. dilution/top up : No / No
Date : 09/04/2002 Time : 13:44:52	Nb Measur./Rins. : 20 / 4
Index meas. : 822	

Standards classes

in volume / undersize

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.41	1.20	1.68	3.53	5.90	7.34	7.96	8.36	8.73	9.17
q3	0.10	0.10	0.10	0.19	0.43	0.36	0.20	0.16	0.17	0.24
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	9.62	10.08	10.52	10.96	11.40	11.85	12.76	13.69	14.63	15.56
q3	0.28	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.50	0.57	0.65	0.71
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	16.49	17.39	18.26	19.11	19.93	20.72	21.49	22.23	22.94	23.97
q3	0.78	0.82	0.85	0.90	0.93	0.95	0.98	1.00	1.01	1.04
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	24.95	26.20	27.09	27.95	29.06	30.37	31.61	32.81	33.96	35.08
q3	1.06	1.09	1.11	1.14	1.17	1.19	1.22	1.27	1.30	1.35
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	36.17	38.25	40.23	42.11	43.91	45.64	47.31	48.93	50.52	52.07
q3	1.39	1.44	1.51	1.57	1.64	1.70	1.76	1.83	1.91	1.97
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	53.60	55.10	56.59	58.05	59.50	62.33	66.33	68.78	71.05	73.15
q3	2.06	2.13	2.22	2.29	2.38	2.47	2.57	2.59	2.56	2.52
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	75.09	76.90	78.58	80.89	82.31	85.49	87.16	88.67	90.44	91.62
q3	2.47	2.44	2.38	2.33	2.27	2.20	2.09	2.00	1.87	1.76
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	92.67	94.20	95.24	96.33	97.22	97.93	98.49	98.93	99.59	99.88
q3	1.64	1.53	1.38	1.23	1.07	0.90	0.75	0.62	0.42	0.19
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	99.94	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.11	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diameter / mu Q3 : cumulative value / % q3 : population density / %

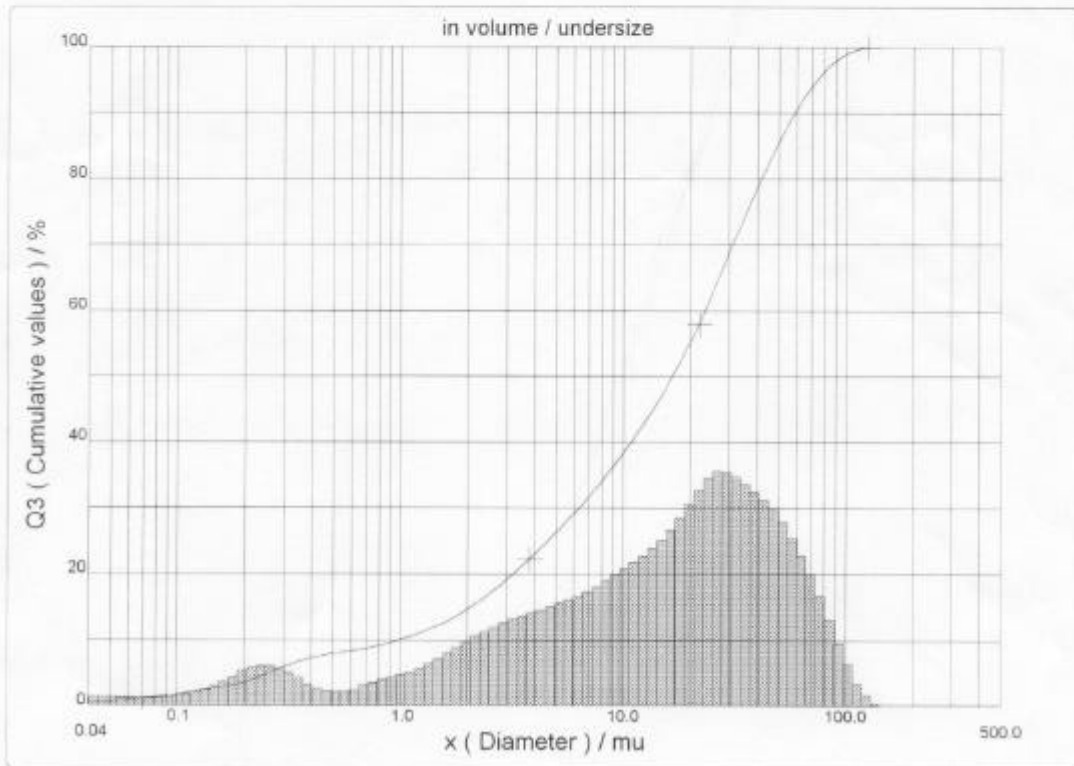


PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref	: CPIX-F	Ultrasounds	: 60	s (+during)
Type produit	: CIMENTO	Concentration	: 206	
Client	: NORIE/DIANA/JULIANA	Diameter at 10%	: 0.98	mu
Comments	:	Diameter at 50%	: 16.67	mu
Liquid	:	Diameter at 90%	: 58.98	mu
Dispersing agent	: NAO	Fraunhofer		
Operator	: UFRGS/CT/LAPROM/PATRICIA	Density/Factor	-----	
Company	:	Specific surface	-----	
Location	:	Auto. dilution/top up	: No / No	
Date : 09/04/2002	Time : 13:44:52	Nb Measur./Rins.	: 20 / 4	
Index meas.	: 822			



**ANEXO 3: relatório de ensaio do grau de vitrificação da EGF realizado
pela ABCP**


ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND

 Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347-902 - São Paulo/SP
 Fone: (11) 3760-5300 - Fax: (11) 3760-5340 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br
 Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio - Laboratório Credenciado pelo INMETRO nº CLF-0024

1/1

ÁREA DE TECNOLOGIA - LABORATÓRIO
RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 20116
Amostra nº: 62496

Data de entrada: 27.02.2002

Interessado: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Referência: Termo de aceite 5983

Material declarado: Escória granulada de fundição

Objetivo: Análise do grau de vitrificação e índice de refração de escória

GRAU DE VITRIFICAÇÃO E ÍNDICE DE REFRAÇÃO (BASICIDADE)

O grau de vitrificação é determinado segundo o método *Mac Master* (PO-GT 5004) e o índice de refração é definido seguindo o PO-GT 5016. Os resultados estão apresentados na *Tabela*.

TABELA - Grau de vitrificação e índice de refração

Identificação da amostra		Grau de Vitrificação (%)	Índice de Refração (n)
ABCP	Interessado		
62496	Escória granulada de fundição	97	1,61 (ácida)

(*) Para a porção vítrea da escória

São Paulo, 13 de março de 2002

 Geól. Wagner Maringolo
 Assessor Técnico

 Geól. Arnaldo Forti Battagin
 Chefe do Laboratório

ANEXO 4: classificação ambiental da EGF



Cromatografia Gasosa com Head Space
Cromatografia Líquida (HPLC)
Absorção Atômica com Chama e Forno de Grafite

LAUDO DE ANÁLISES

Nº DO LAUDO: 0535/01
 CLIENTE: FUNDIÇÃO BECKER
 ENDEREÇO: Rua Acelino Francisco de Medeiros, 430
 DESCRIÇÃO DA AMOSTRA: Escória de Fundição.

DATA: 05/07/01
 DATA DA COLETA: 03/04/01
 CEP: 94010-590
 CIDADE: Gravataí

Objetivos

Analisar e classificar o resíduo de acordo com a NBR 10.004.

Composição do Resíduo	
Parâmetros	Amostra
Arsênio (mg/Kg)	n.d.
Chumbo (mg/Kg)	37,0
Cianeto (mg/Kg)	0,04
Cromo(mg/Kg)	93,0
Fenol (mg/Kg)	3,80
Mercúrio (mg/Kg)	n.d.
pH	8,86
Selênio (mg/Kg)	n.d.
Vanádio (mg/Kg)	54,0
Hidrocarbonetos (mg/kg)	n.d.
Compostos Aromáticos (mg/kg)	n.d.
Cinzas (%)	99,38
Umidade (%)	0,10

Ensaio de Lixiviação – NBR 10.005	
Parâmetros	Amostra
Arsênio (mg/l)	n.d.
Bário (mg/l)	0,030
Cádmio (mg/l)	0,160
Chumbo (mg/l)	0,033
Cromo (mg/l)	0,048
Fluoreto (mg/l)	n.d.
Mercúrio (mg/l)	n.d.
pH Inicial	7,67
Prata (mg/l)	0,006
Selênio (mg/l)	n.d.



Cromatografia Gasosa com Head Space
Cromatografia Líquida (HPLC)
Absorção Atômica com Chama e Forno de Grafite

Continuação Laudo 0535.

Ensaio de Solubilização – NBR 10.006	
Parâmetros	Amostra
Alumínio (mg/l)	0,182
Arsênio (mg/l)	n.d.
Bário (mg/l)	n.d.
Cádmio (mg/l)	n.d.
Chumbo (mg/l)	n.d.
Cianeto (mg/l)	0,003
Cloreto (mg/l)	9,0
Cobre (mg/l)	0,010
Cromo (mg/l)	0,020
Dureza (mg/l)	60,0
Fenol (mg/l)	n.d.
Ferro (mg/l)	0,106
Fluoreto (mg/l)	0,08
Manganês (mg/l)	0,033
Mercurio (mg/l)	n.d.
Nitrato (mg/l)	0,068
pH Final	8,82
Prata (mg/l)	n.d.
Selênio (mg/l)	n.d.
Sódio (mg/l)	6,07
Sulfato (mg/l)	25,4
Surfactantes (mg/l)	n.d.
Zinco (mg/l)	0,016

Reatividade

Não reage de forma violenta com a água e nem forma misturas potencialmente explosivas.

Inflamabilidade

Não produz fogo em condições normais de temperatura e pressão.

Corrosividade

Não é corrosivo, pois o pH situa-se acima de 2,0 e abaixo de 12,0.

8



Cromatografia Gasosa com Head Space
Cromatografia Líquida (HPLC)
Absorção Atômica com Chama e Forno de Grafite

Continuação Laudo 0535.

Classificação do Resíduo Segundo NBR 10.004

De acordo com o anexo I da listagem nº 9, todos os parâmetros analisados estão dentro dos limites permitidos na Composição do Resíduo.

Pelo ensaio de lixiviação, o Resíduo apresentou-se como NÃO TÓXICO – TL

O ensaio de Solubilização apresentou todos os parâmetros dentro do Limite Máximo Permitido pela Legislação.

Este comportamento caracteriza o resíduo como CLASSE III – INERTE.

Laudo de Coleta, Segundo NBR 10.007

A coleta foi realizada após a elaboração de um plano, seguindo os itens:

- Tipo de material a ser coletado
- Tipo de análise a ser realizada
- Tipo de amostragem
- Ponto de amostragem
- Tipo de armazenagem

O tipo de coleta selecionado foi o sistema de quarteamento, que é um processo de mistura pela qual uma amostra bruta é dividida em quatro partes iguais. Sendo tomadas duas partes opostas entre si para constituir uma nova amostra e descartada as partes restantes.

As partes não descartadas são misturadas totalmente e o processo de quarteamento é repetido até que se obtenha o volume desejado.

A armazenagem foi feita em sacos plásticos, até a chegada no laboratório, onde foram iniciadas as análises imediatamente.

Stella Maria Leonardi
 Stella Maria Leonardi
 CRQ - 10 - 05.200.398

**ANEXO 5: ganho de massa ao longo do tempo no ensaio de sucção capilar –
Método Kelham**

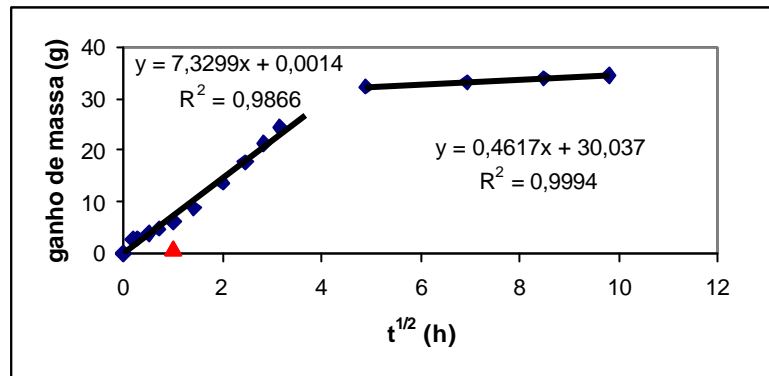


Figura A1: ganho de massa em função $t^{1/2}$ para concreto de relação água/aglomerante 0,40, com 0% de escória – 1º exemplar

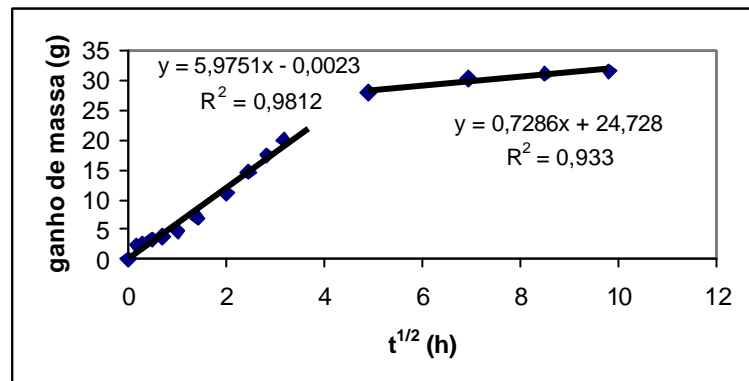


Figura A2: ganho de massa em função $t^{1/2}$ para concreto de relação água/aglomerante 0,40, com 0% de escória – 2º exemplar

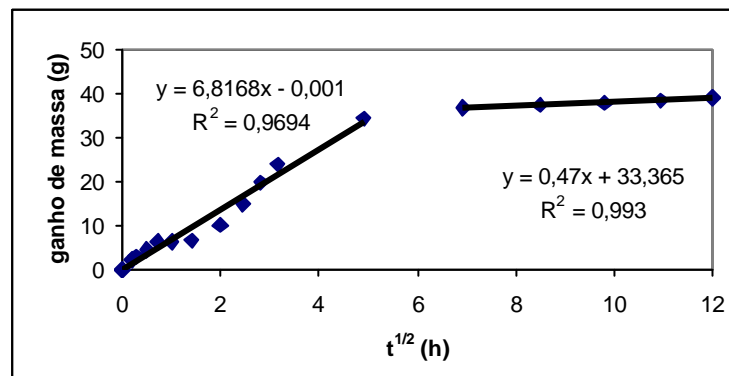


Figura A3: ganho de massa em função $t^{1/2}$ para concreto de relação água/aglomerante 0,55, com 0% de escória – 1º exemplar

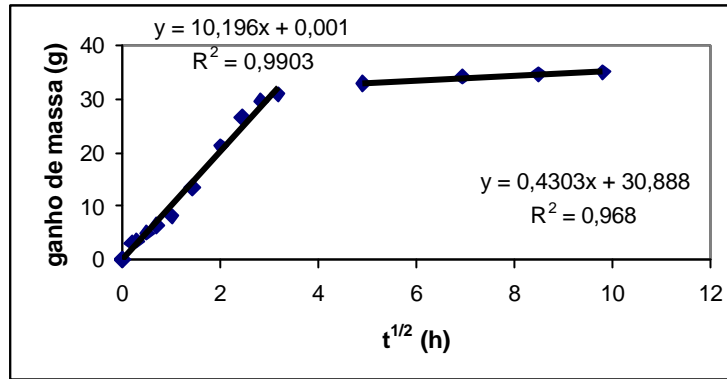


Figura A4: ganho de massa em função $t^{1/2}$ para concreto de relação água/aglomerante 0,55, com 0% de escória – 2º exemplar

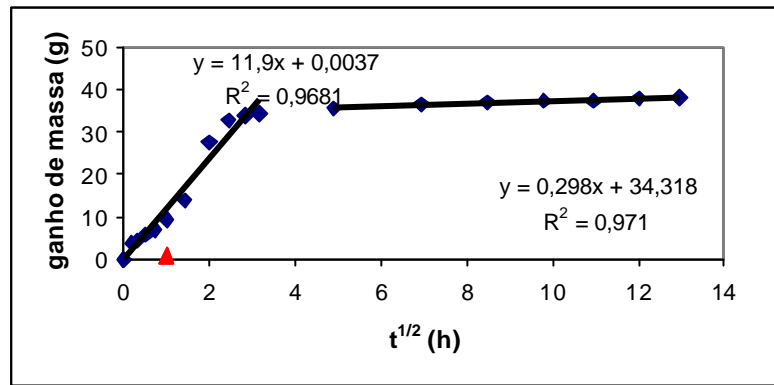


Figura A5: ganho de massa em função $t^{1/2}$ para concreto de relação água/aglomerante 0,70, com 0% de escória – 1º exemplar

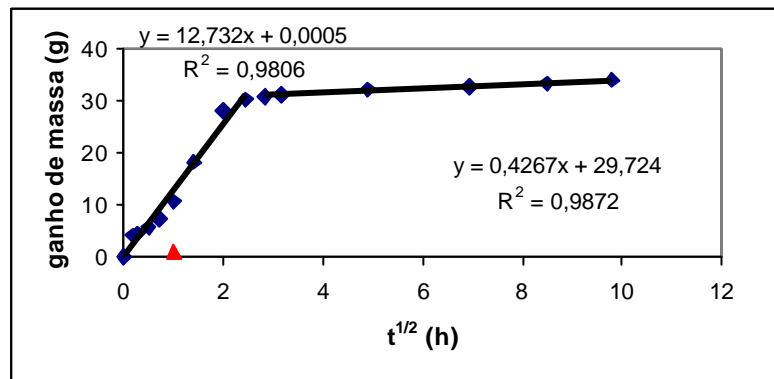


Figura A6: ganho de massa em função $t^{1/2}$ para concreto de relação água/aglomerante 0,70, com 0% de escória – 2º exemplar

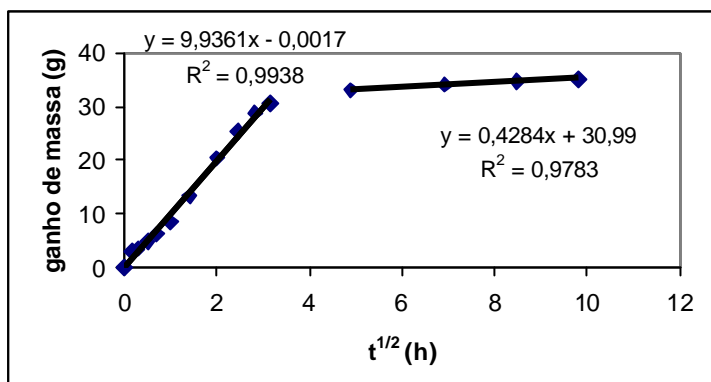


Figura A7: ganho de massa em função $t^{1/2}$ para concreto de relação água/aglomerante 0,40, com 10% de escória – 1º exemplar

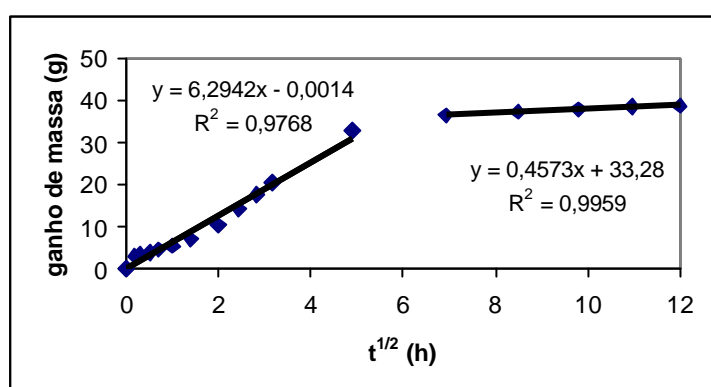


Figura A8: ganho de massa em função $t^{1/2}$ para concreto de relação água/aglomerante 0,40, com 10% de escória – 2º exemplar

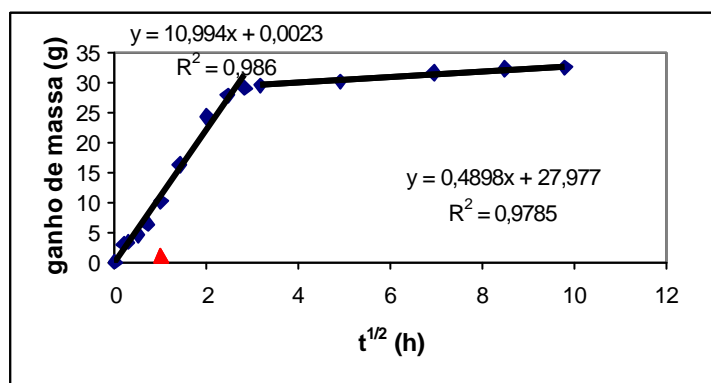


Figura A9: ganho de massa em função $t^{1/2}$ para concreto de relação água/aglomerante 0,55, com 10% de escória – 1º exemplar

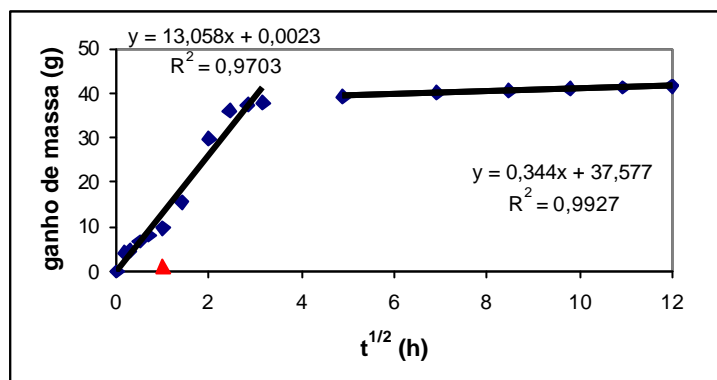


Figura 10: ganho de massa em função \sqrt{t} para concreto de relação água/aglomerante 0,55, com 10% de escória – 2º exemplar

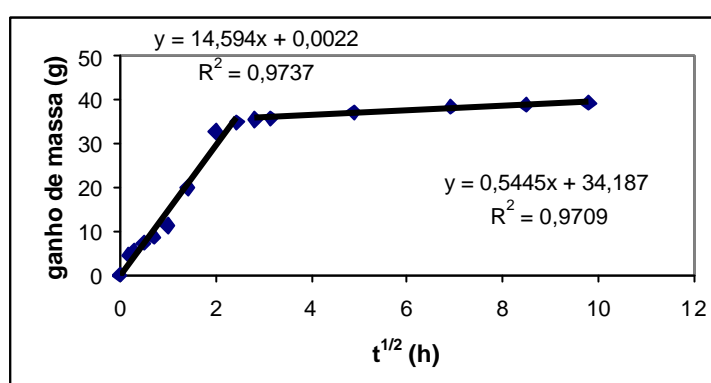


Figura 11: ganho de massa em função \sqrt{t} para concreto de relação água/aglomerante 0,70, com 10% de escória – 1º exemplar

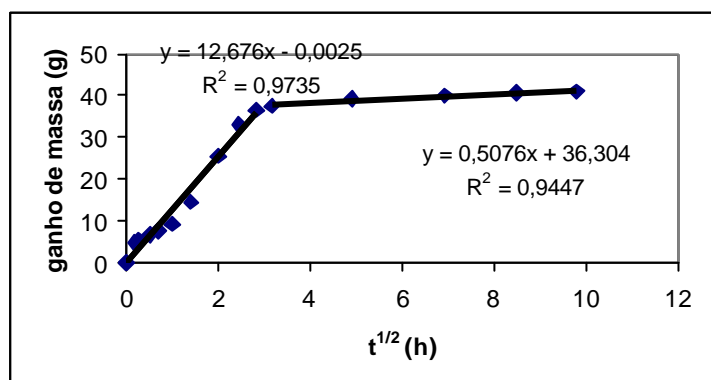


Figura 12: ganho de massa em função \sqrt{t} para concreto de relação água/aglomerante 0,70, com 10% de escória – 2º exemplar

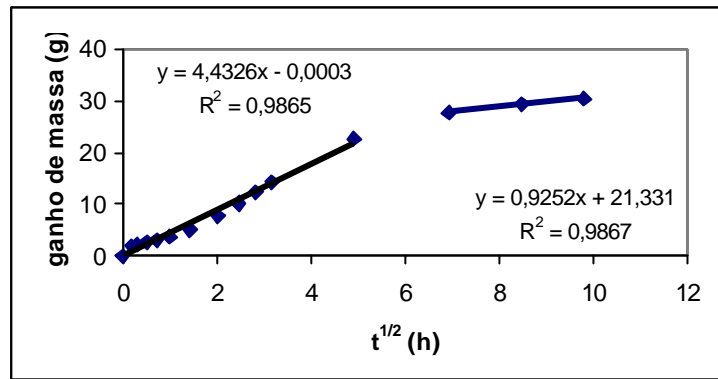


Figura 13: ganho de massa em função \sqrt{t} para concreto de relação água/aglomerante 0,40, com 30% de escória – 1º exemplar

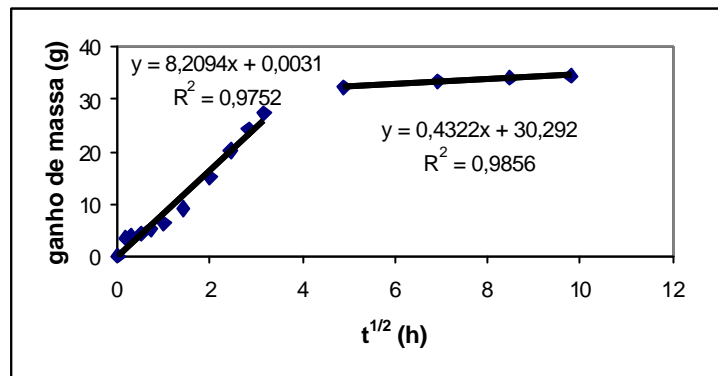


Figura 14: ganho de massa em função \sqrt{t} para concreto de relação água/aglomerante 0,40, com 30% de escória – 2º exemplar

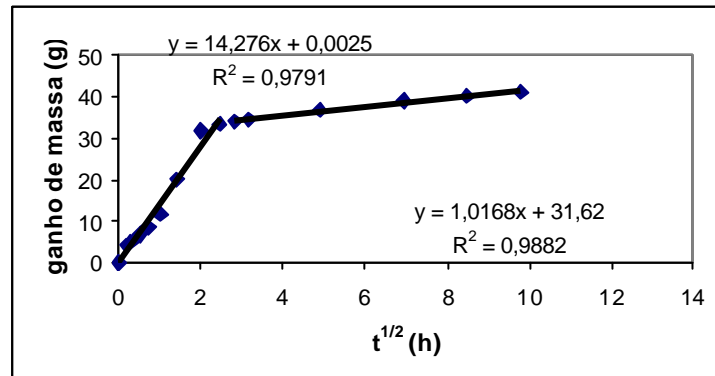


Figura 15: ganho de massa em função \sqrt{t} para concreto de relação água/aglomerante 0,55, com 30% de escória – 1º exemplar

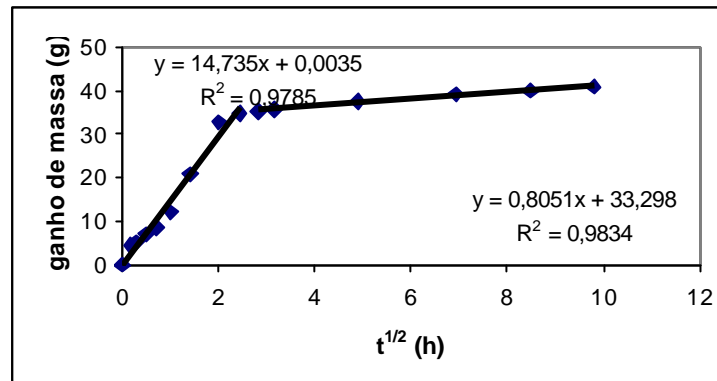


Figura 16: ganho de massa em função \sqrt{t} para concreto de relação água/aglomerante 0,55, com 30% de escória – 2º exemplar

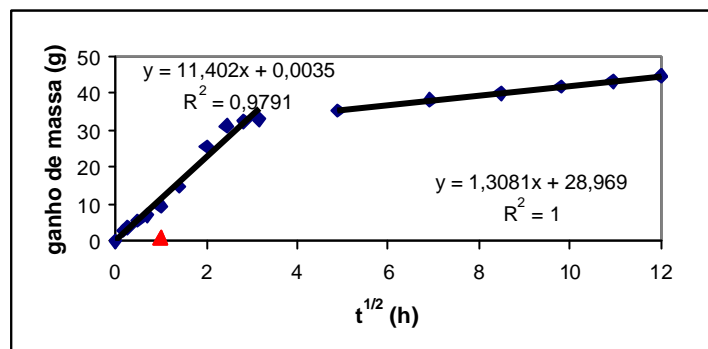


Figura 17: ganho de massa em função \sqrt{t} para concreto de relação água/aglomerante 0,70, com 30% de escória – 1º exemplar

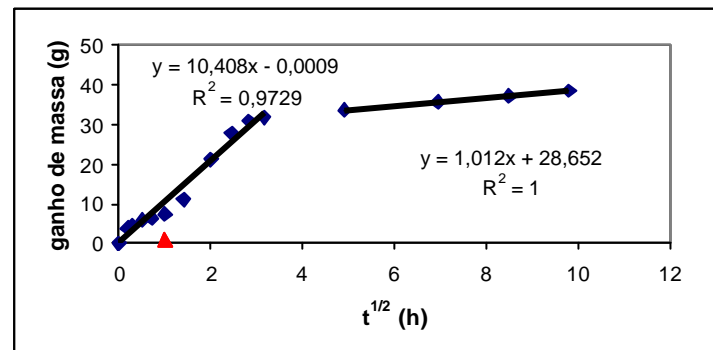


Figura 18: ganho de massa em função \sqrt{t} para concreto de relação água/aglomerante 0,70, com 30% de escória – 2º exemplar

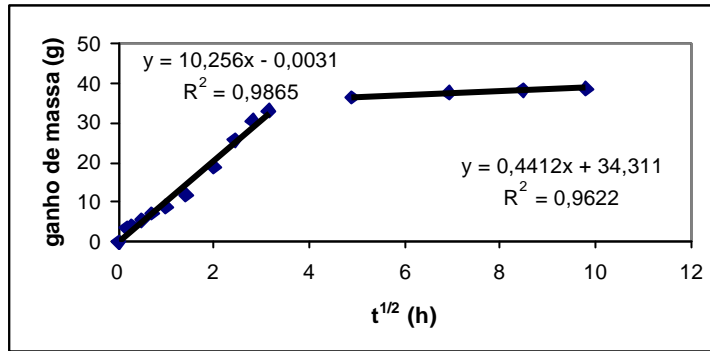


Figura 19: ganho de massa em função \sqrt{t} para concreto de relação água/aglomerante 0,40, com 50% de escória – 1º exemplar

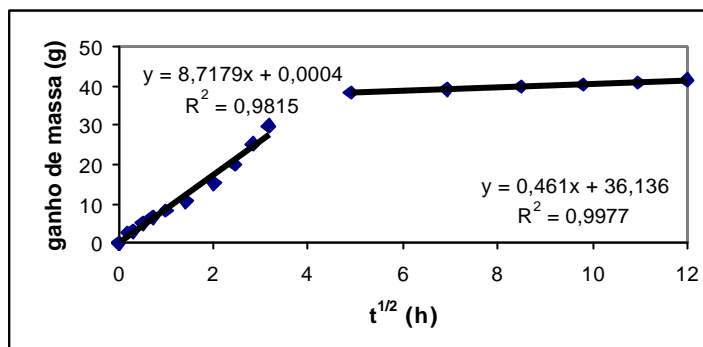


Figura 20: ganho de massa em função \sqrt{t} para concreto de relação água/aglomerante 0,40, com 50% de escória – 2º exemplar

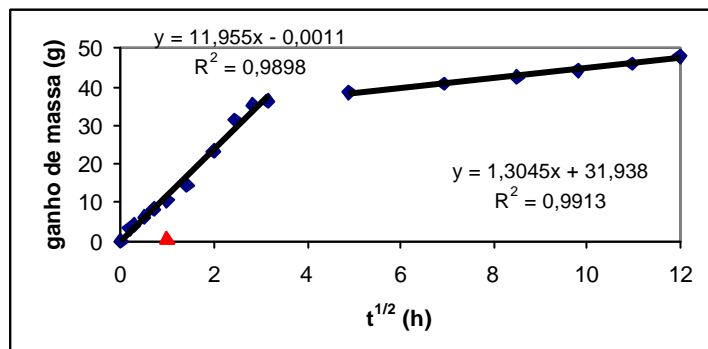


Figura 21: ganho de massa em função \sqrt{t} para concreto de relação água/aglomerante 0,55, com 50% de escória – 1º exemplar

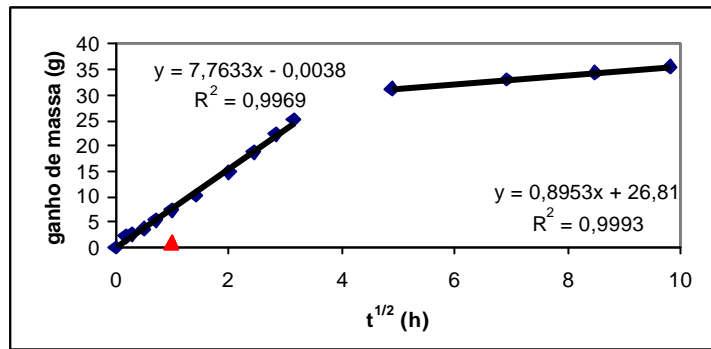


Figura 22: ganho de massa em função \sqrt{t} para concreto de relação água/aglomerante 0,55, com 50% de escória – 2º exemplar

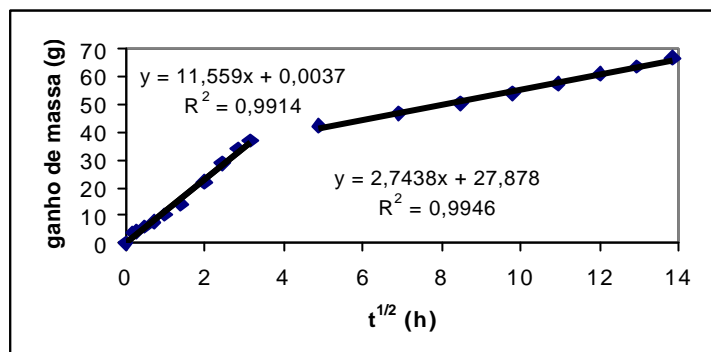


Figura 23: ganho de massa em função \sqrt{t} para concreto de relação água/aglomerante 0,70, com 50% de escória – 1º exemplar

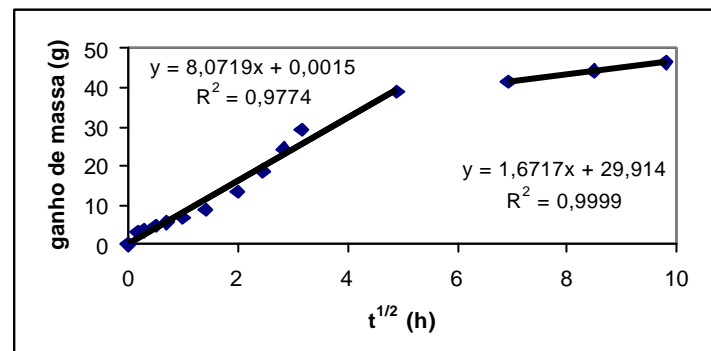


Figura 24: ganho de massa em função \sqrt{t} para concreto de relação água/aglomerante 0,70, com 50% de escória – 2º exemplar