

MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais - PPGEM

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA GRANULADA
DE FUNDIÇÃO (EGF) COMO SUBSTITUIÇÃO DE PARTE DO
CIMENTO EM CONCRETO – PROPRIEDADES MECÂNICAS**

Diana Maria Ceccatto

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2003

MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais - PPGEM

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA GRANULADA
DE FUNDIÇÃO (EGF) COMO SUBSTITUIÇÃO DE PARTE DO
CIMENTO EM CONCRETO – PROPRIEDADES MECÂNICAS**

Diana Maria Ceccatto
Engenheira Civil,

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa & Tecnologia Mineral

Porto Alegre
2003

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração: Metalurgia Extrativa & Tecnologia Mineral e aprovada em sua forma final, pelo Orientador, co-orientadores e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Antonio Cezar Faria Vilela, PPGEM/UFRGS
Dr. Ing. pela Aachen University of Technology, Alemanha

Co-orientadora : Prof^a. Angela Borges Masuero, PPGEC/UFRGS
Dr^a. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Co-orientador: Prof. Carlos Alberto Mendes Moraes, ACA MECÂNICA/UNISINOS
Ph.D. pela University of Manchester and Institute Of Science and Technology/UMIST/Inglaterra

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin (UFRGS)
Dr^a pela Universidade de São Paulo

Prof^o. Ivo André Homrich Schneider (UFRGS)
Dr^o pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof^o. Washington Almeida Moura (UEFS/Bahia)
Dr^o pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Carlos Arthur Ferreira
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais

Aos meus pais,
Dorvalino e Elza Ceccatto e a
minha irmã Danusa.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer e dedicar este trabalho de pesquisa a todas as pessoas que no decorrer deste período tiveram fundamental participação, seja na transmissão de conhecimentos, ou no convívio e amizade:

Ao prof^o Vilela, pelo apoio e empenho como orientador, e pelos importantes conhecimentos transmitidos. À prof^a Ângela, pela grande dedicação na co-orientação desta pesquisa, pelo imprescindível auxílio durante todo o trabalho. Ao prof^o Carlos pelo apoio como co-orientador, especialmente na parte de fundição.

À prof^a Denise pela fundamental contribuição durante o projeto de pesquisa, e também pelas importantes sugestões de todos os integrantes da banca: prof^o Washington, prof^a Denise e prof^o Ivo.

Aos professores do NORIE e PPGEM pelos valiosos conhecimentos transmitidos.

À colega Juliana, pela amizade e por compartilhar comigo, durante a parte experimental, momentos decisivos, algumas vezes angustiantes outros nem tanto. Aos colegas de mestrado, Daniela e Alexandre, pela amizade e apoio de sempre. Aos colegas do NORIE, Águida, Fernanda, Marlova, Maurício, Daniel, Ana Paula, Geilma, Ludmila, Lucília, Adriana Silveira, Hilton, Giane, Rosana, pela amizade, trocas de conhecimento e constante colaboração. Ao Paulo Sérgio, pela fundamental contribuição na parte de análise estatística. Também agradeço aos secretários, Luís e Marlise. Aos antigos “norianos”, que deixam muita saudade, Adriana Gumieri, Mônica, Valéria, Anelise, Washington, Barata, Ângela Ferreira, Jardel, Roberto, Taís, Jairo.

Aos colegas do LASID, pela amizade e auxílio durante a pesquisa, Feliciane, Leila, Eduardo, Paulinho, Janaina. Também agradeço aos auxiliares de pesquisa do LASID. Ao Sidney, do LAPRON, pela contribuição na determinação da granulometria a laser da EGF.

Aos auxiliares de pesquisa do NORIE, Diego Altieri, Márcio, pelo grande dedicação e contribuição na elaboração dos ensaios, e especialmente ao Mário, pelo seu elogiável desempenho e dedicação demonstrados neste projeto de pesquisa. Aos funcionários do LEME, Fontes, Teixeira, Flávio, e do NORIE, Airton e Éderson, pelo importante apoio laboratorial e amizade.

Ao Leandro (moto-boy), Aline e Ayumi Yoshioka (LAMEF); pela fundamental contribuição durante o MEV. À Mirian e Francis (Física) pelo auxílio na preparação das amostras para MEV.

À química Jacqueline Miranda, da UNISINOS, pela contribuição na análise química das amostras dos extratos lixiviados e solubilizados.

Às amigas de faculdade, pelo incentivo e compreensão nos momentos em que não pude estar presente, Graziela Zim, Graziella Benvegnú, Rutinéia, Heloísa, Márcia.

À Fundação Becker por fornecer o material de estudo, e ao Atilano pelo apoio especialmente durante a amostragem. À Camargo Correa pela doação do cimento, à CAPES, pelo auxílio financeiro, bem como à Fundação Luis Englert.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao PPGEM/LASID e NORIE, por incentivar o desenvolvimento de pesquisas como esta em questão. A todos que contribuíram direta ou indiretamente na elaboração desta pesquisa, meu agradecimento.

À minha família, pelo constante incentivo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XVII
LISTA DE EQUAÇÕES.....	XXII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XXIII
RESUMO.....	XXIV
ABSTRACT	XXV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA	4
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	5
2 RESÍDUOS INDUSTRIAIS: UMA VISÃO SOB O CONTEXTO AMBIENTAL	6
2.1 TECNOLOGIAS LIMPAS <i>VERSUS</i> TECNOLOGIAS DE FIM-DE-TUBO	6
2.2 INDÚSTRIA <i>VERSUS</i> MEIO AMBIENTE.....	10
2.3 DANOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS	14
2.4 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL.....	15
3 RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO	23
3.1 AREIA DE FUNDIÇÃO	23
3.2 ESCÓRIA DE FUNDIÇÃO	27
3.2.1 <i>O Forno Cubilô</i>	27
3.2.2 <i>Produção de Ferro Fundido e Geração de Escória de Fundição</i>	30
3.2.3 <i>Constituição da Escória de Fundição</i>	33
3.2.4 <i>Aplicação da Escória de Fundição</i>	34
4 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	37
4.1 MATÉRIA-PRIMA NA PRODUÇÃO DE CIMENTO OU SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO EM CONCRETO	40
4.1.1 <i>Influência do Resfriamento na Reatividade das Escórias</i>	45
4.1.1.1 Reações Expansivas.....	48
4.1.1.2 Potencial de Oxidação do Ferro	52
4.1.2 <i>Utilização de Escórias Ativadas</i>	53
4.2 BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS	54
4.3 AGREGADO GRAÚDO EM REVESTIMENTO ASFÁLTICO	56
4.4 AGREGADOS EM CONCRETO	57
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	59
5.1 APRESENTAÇÃO DA APLICAÇÃO PROPOSTA À EGF DE ACORDO COM A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	59
5.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	61
5.2.1 <i>Determinação das Variáveis de Resposta do Projeto Experimental</i>	63
5.2.2 <i>Escolha dos Fatores Controláveis do Projeto Experimental</i>	63
5.2.3 <i>Modelo Estatístico e Matriz Experimental</i>	66
5.3 METODOLOGIA.....	70

5.3.1	<i>Amostragem da Escória Granulada de Fundição (EGF)</i>	70
5.3.2	<i>Beneficiamento da Escória Granulada de Fundição (EGF)</i>	73
5.3.3	<i>Materiais Utilizados</i>	75
5.3.3.1	Cimento	75
5.3.3.2	Escória Granulada de Fundição (EGF).....	77
5.3.3.2.1	Caracterização Química e Estrutural	77
5.3.3.2.2	Caracterização Física.....	84
5.3.3.2.3	Caracterização Ambiental.....	86
5.3.3.2.4	Índice de Atividade Pozolânica	87
5.3.3.3	Agregados.....	89
5.3.4	<i>Ajuste da Curva de Dosagem</i>	91
5.3.5	<i>Determinação dos Traços e Quantidade de Materiais Utilizados na Produção dos Concretos</i>	92
5.3.6	<i>Produção dos Concretos (referência e com EGF)</i>	97
5.3.7	<i>Métodos de Ensaio</i>	99
5.3.7.1	Propriedades Mecânicas	99
5.3.7.1.1	Resistência à Compressão Uniaxial.....	99
5.3.7.1.2	Resistência à Tração por Compressão Diametral	100
5.3.7.1.3	Resistência à Tração na Flexão	102
5.3.7.2	Avaliação da Microestrutura de Concretos Referência e com EGF.....	103
5.3.7.3	Caracterização Ambiental dos Concretos Referência e com EGF	104
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	105
6.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS	105
6.1.1	<i>Resistência à Compressão Uniaxial</i>	110
6.1.1.1	Efeito Isolado da Relação Água/aglomerante (a/agl.) sobre a Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto	111
6.1.1.2	Efeito Isolado do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) sobre a Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto	112
6.1.1.3	Efeito Isolado da Idade (ID) sobre a Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto	114
6.1.1.4	Efeito da Interação da Relação Água/aglomerante (a/agl.) e do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) sobre a Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto	115
6.1.1.5	Efeito da Interação do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) e da Idade (ID) sobre a Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto.....	119
6.1.1.6	Efeito da Interação da Relação Água/aglomerante (a/agl.) e da Idade (ID) sobre a Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto	123
6.1.1.7	Percentual de Hidratação do Concreto	127
6.1.1.8	Estimativa do Consumo de Cimento (CC)	130
6.1.2	<i>Resistência à Tração por Compressão Diametral</i>	139
6.1.2.1	Efeito Isolado da Relação Água/aglomerante (a/agl.) sobre a Resistência à Tração por Compressão Diametral do Concreto	140
6.1.2.2	Efeito Isolado do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) sobre a Resistência à Tração por Compressão Diametral do Concreto	141
6.1.2.3	Efeito Isolado da Idade (ID) sobre a Resistência à Tração por Compressão Diametral do Concreto	142
6.1.2.4	Efeito da Interação da Relação Água/aglomerante (a/agl.) e do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) sobre a Resistência à Tração por Compressão Diametral do Concreto	144

6.1.2.5	Efeito da Interação do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) e da Idade (ID) sobre a Resistência à Tração por Compressão Diametral do Concreto	148
6.1.2.6	Efeito da Interação da Relação Água/aglomerante (a/agl.), do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) e da Idade (ID) sobre a Resistência à Tração por Compressão Diametral do Concreto	152
6.1.3	<i>Resistência à Tração na Flexão</i>	156
6.1.3.1	Efeito Isolado da Relação Água/aglomerante (a/agl.) sobre a Resistência à Tração na Flexão do Concreto.....	156
6.1.3.2	Efeito Isolado do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) sobre a Resistência à Tração na Flexão do Concreto.....	158
6.1.3.3	Efeito Isolado da Idade (ID) sobre a Resistência à Tração na Flexão do Concreto	159
6.1.3.4	Efeito da Interação da Relação Água/aglomerante (a/agl.) e do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) sobre a Resistência à Tração na Flexão do Concreto	160
6.1.3.5	Efeito da Interação do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) e da Idade (ID) sobre a Resistência à Tração na Flexão do Concreto	164
6.1.3.6	Efeito da Interação da Relação Água/aglomerante (a/agl.) e da Idade (ID) sobre a Resistência à Tração na Flexão do Concreto	168
6.1.4	<i>Relação entre Resistência à Tração e Resistência à Compressão do Concreto</i> 172	
6.2	AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA DOS CONCRETOS REFERÊNCIA E COM EGF	174
6.3	CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DOS CONCRETOS REFERÊNCIA E COM EGF	179
7	CONCLUSÕES.....	181
7.1	QUANTO ÀS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	182
7.1.1	<i>Resistência à Compressão Uniaxial</i>	182
7.1.2	<i>Resistência à Tração por Compressão Diametral</i>	184
7.1.3	<i>Resistência à Tração na Flexão</i>	186
7.1.4	<i>Relação entre Resistência à Tração e Resistência à Compressão do Concreto</i> 187	
7.2	QUANTO À AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA DE CONCRETOS REFERÊNCIA E COM EGF	188
7.3	QUANTO À CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DE CONCRETOS REFERÊNCIA E COM EGF	189
8	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	190
	REFERÊNCIAS	191
	ANEXOS	200
	ANEXO 1: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA GRANULADA DE FUNDIÇÃO MOÍDA NO TEMPO DE 40 MINUTOS E UTILIZADA NO PROJETO EXPERIMENTAL	201
	ANEXO 2: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA GRANULADA DE FUNDIÇÃO MOÍDA NO TEMPO DE 60 MINUTOS.....	204
	ANEXO 3: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA GRANULADA DE FUNDIÇÃO MOÍDA NO TEMPO DE 80 MINUTOS.....	207
	ANEXO 4: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA GRANULADA DE FUNDIÇÃO MOÍDA NO TEMPO DE 100 MINUTOS.....	210
	ANEXO 5: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA GRANULADA DE FUNDIÇÃO MOÍDA NO TEMPO DE 120 MINUTOS.....	213

ANEXO 6: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA GRANULADA DE FUNDIÇÃO MOÍDA NO TEMPO DE 180 MINUTOS, EM MOINHO DE CAPACIDADE DE $\cong 7,5$ LITROS	216
ANEXO 7: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CIMENTO CP II-F	219
ANEXO 8: RELATÓRIO DO ENSAIO DE GRAU DE VITRIFICAÇÃO DA EGF, REALIZADO PELA ABCP	222
ANEXO 9: CLASSIFICAÇÃO AMBIENTAL DA EGF	224
ANEXO 10: RELATÓRIO DO ENSAIO QUÍMICO DE ATIVIDADE POZOLÂNICA DA EGF, REALIZADO PELA CIENTEC	228
ANEXO 11: TABELAS UTILIZADAS NO PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DAS MOLDAGENS DOS CONCRETOS	230
ANEXO 12: RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS CONCRETOS	237
ANEXO 13: RESUMO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA, REALIZADA PARA OBTENÇÃO DO MODELO DE FC	256
ANEXO 14: RESUMO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA, REALIZADA PARA OBTENÇÃO DO MODELO DE $FT'D$	258
ANEXO 15: RESUMO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA, REALIZADA PARA OBTENÇÃO DO MODELO DE $FT'F$	260

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Formas de gerenciamento de resíduos (BERNARDES, 2000).....	9
Figura 2.2	Evolução da produção de cimento Portland no Brasil (Cimento Web, 2002).....	11
Figura 2.3	Energia demandada por tonelada de cimento produzido (EHRENBERG e GEISELER, 2000).....	12
Figura 2.4	Emissão de CO ₂ por tonelada de cimento produzido (EHRENBERG e GEISELER, 2000).....	12
Figura 2.5	Classificação de resíduos de acordo com as normas brasileiras (BERNARDES, 2000).....	17
Figura 2.6	Principais fases de investigação na avaliação ambiental de subprodutos industriais (MROUCH e WAHLSTRÖM, 2002).....	21
Figura 3.1	Desenho esquemático de forno cubilô a ar frio (PIESKE et al., 1980).....	29
Figura 3.2	Participação dos principais produtores de fundidos na produção mundial de 1998 (TYBULCZUK, 2002).....	31
Figura 3.3	Produção de peças fundidas no Brasil (KANICKI, 2001).....	32
Figura 3.4	Distribuição das vendas de peças fundidas no Brasil, por indústria usuária final (KANICKI, 2001).....	33
Figura 3.5	Desempenho mecânico de materiais empregados como lubrificantes no corte de metais (<i>a</i> =sem lubrificante; <i>b</i> =pó de escória; <i>c</i> =pó de zinco; <i>d</i> =pó de cobre; <i>e</i> =CaO+Al ₂ O ₃ +SiO ₂), (UEHARA e SAKURAI, 1996).....	35
Figura 4.1	Representação esquemática simplificada a) geração de escórias de alto-forno e aciaria, durante os processos de produção do aço (VILELA, 2001) b) geração de escória de fundição (MORAES, 2002).....	39
Figura 5.1	Matriz experimental completa do projeto de pesquisa.....	69
Figura 5.2	Vazamento do ferro fundido líquido em forno cubilô.....	70
Figura 5.3	Vazamento da escória de fundição do forno cubilô, para o canal de resfriamento.....	71
Figura 5.4	Resfriamento brusco da escória de fundição no canal de fluxo d'água contínuo.....	71
Figura 5.5	Coleta da amostra de escória granulada de fundição (EGF), após resfriamento brusco, no canal de fluxo d'água contínuo.....	72
Figura 5.6	Amostras de escória granulada de fundição (EGF) após secagem a) outros materiais presentes na EGF b) torrão maior de EGF c) escória granulada de fundição seca.....	73
Figura 5.7	Vista superior do moinho de bolas utilizado para moagem da escória granulada de fundição (EGF).....	74
Figura 5.8	Escória granulada de fundição moída em moinho de bolas (tempo de moagem = 40 minutos), utilizada na realização do projeto experimental.....	75
Figura 5.9	Difratograma de raios-x da escória granulada de fundição (CECCATTO et al., 2002).....	80

Figura 5.10	Micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários da escória granulada de fundição não beneficiada a) magnitude de 50x b) 125x c) 30x d) 60x. Os números 1, 2 e 3 mostram as áreas submetidas à análise por EDS.	81
Figura 5.11	Micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários da escória granulada de fundição beneficiada a) magnitude de 125x b) 1000x. Os números 4 e 5 mostram as áreas submetidas à análise por EDS.	82
Figura 5.12	Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retroespalhados da escória granulada de fundição não beneficiada a) magnitude de 50x b) 400x. Os números 6 e 7 mostram as áreas submetidas à análise por EDS.	83
Figura 5.13	Diagrama de dosagem.....	92
Figura 5.14	Traços e quantidades de materiais utilizados na produção dos concretos referência e com 10% de substituição de cimento por EGF.....	95
Figura 5.15	Traços e quantidades de materiais utilizados na produção dos concretos com 30% e 50% de substituição de cimento por EGF.....	96
Figura 5.16	a) medição da consistência do concreto através do ensaio de abatimento do tronco de cone b) adensamento dos corpos-de-prova de concreto, utilizando-se vibrador de imersão.....	98
Figura 5.17	Corpos-de-prova produzidos durante a execução de 6 diferentes traços de concreto (6 concretagens).....	98
Figura 5.18	Ensaio de resistência à compressão uniaxial, em um corpo-de-prova cilíndrico (9,5 cm x 19 cm) de concreto.....	99
Figura 5.19	Esquema do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (d = diâmetro do corpo-de-prova; $b=(0,15\pm 0,01)d$; $h=(3,5\pm 0,5)mm$).....	100
Figura 5.20	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral, em um corpo-de-prova cilíndrico (9,5 cm x 19 cm) de concreto.....	101
Figura 5.21	Esquema do ensaio de resistência à tração na flexão (P =carga aplicada; L =distância entre cutelos de suporte).....	102
Figura 5.22	Ensaio de resistência à tração na flexão, em um corpo-de-prova prismático (10 cm x 10 cm x 35 cm) de concreto.....	103
Figura 6.1	Níveis codificados para cada um dos fatores controláveis.....	106
Figura 6.2 (a, b, c)	Relação completa de dados, utilizados na análise estatística, com os valores dos níveis codificados e reais dos fatores controláveis, e os respectivos resultados de resistência mecânica obtidos para cada combinação de fatores controláveis.....	109
Figura 6.3	Efeito isolado da relação água/aglomerante (a/agl.) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c).....	112
Figura 6.4	Efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c).....	113
Figura 6.5	Efeito isolado da idade sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c).....	114

Figura 6.6	Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF sobre a resistência à compressão uniaxial (fc).....	117
Figura 6.7	Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (para a idade de 7 dias) sobre a resistência à compressão uniaxial (fc).....	117
Figura 6.8	Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (para a idade de 91 dias) sobre a resistência à compressão uniaxial (fc).....	118
Figura 6.9	Comparação entre os efeitos das interações a/agl. x TE= 10% e a/agl. x TE= 0% (referência) sobre a resistência à compressão uniaxial (fc) a) ID = 7 dias b) ID = 28 dias c) ID = 91 dias.....	119
Figura 6.10	Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade sobre a resistência à compressão uniaxial (fc).....	120
Figura 6.11	Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade (para relação água/aglomerante igual a 0,40) sobre a resistência à compressão uniaxial (fc).....	121
Figura 6.12	Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade (para relação água/aglomerante igual a 0,70) sobre a resistência à compressão uniaxial (fc).....	122
Figura 6.13	Comparação entre os efeitos das interações ID x TE= 10% e ID x TE= 0% (referência) sobre a resistência à compressão uniaxial (fc) a) a/agl. = 0,40 b) a/agl. = 0,55 c) a/agl. = 0,70.....	123
Figura 6.14	Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade sobre a resistência à compressão uniaxial (fc).....	125
Figura 6.15	Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para o concreto referência) sobre a resistência à compressão uniaxial (fc).....	125
Figura 6.16	Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para teor de substituição de cimento por EGF igual a 10%) sobre a resistência à compressão uniaxial (fc).....	126
Figura 6.17	Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para teor de substituição de cimento por EGF igual a 50%) sobre a resistência à compressão uniaxial (fc).....	127
Figura 6.18	Percentual de hidratação do concreto com fator água/aglomerante igual a 0,40, em relação a resistência à compressão aos 28 dias.....	128
Figura 6.19	Percentual de hidratação do concreto com fator água/aglomerante igual a 0,55, em relação a resistência à compressão aos 28 dias.....	129
Figura 6.20	Percentual de hidratação do concreto com fator água/aglomerante igual a 0,70, em relação a resistência à compressão aos 28 dias.....	129
Figura 6.21	Diagrama de dosagem dos concretos referência e com EGF, para a idade de 28 dias.....	131
Figura 6.22	Diagrama de dosagem dos concretos referência e com EGF, para a idade de 91 dias.....	133

Figura 6.23	Consumo de cimento x Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias de idade do concreto	135
Figura 6.24	Percentual de consumo de cimento em relação ao concreto referência x Resistência à compressão uniaxial, para idade de 28 dias	136
Figura 6.25	Custo/benefício x Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias de idade do concreto	136
Figura 6.26	Custo/benefício em relação ao concreto referência x Resistência à compressão uniaxial, para idade de 28 dias	137
Figura 6.27	Consumo de cimento x Resistência à compressão uniaxial aos 91 dias de idade do concreto	137
Figura 6.28	Percentual de consumo de cimento em relação ao concreto referência x Resistência à compressão uniaxial, para idade de 91 dias	138
Figura 6.29	Custo/benefício x Resistência à compressão uniaxial aos 91 dias de idade do concreto	138
Figura 6.30	Custo/benefício em relação ao concreto referência x Resistência à compressão uniaxial, para idade de 91 dias	139
Figura 6.31	Efeito isolado da relação água/aglomerante (a/agl.) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)	141
Figura 6.32	Efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)	142
Figura 6.33	Efeito isolado da idade sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)	143
Figura 6.34	Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)	145
Figura 6.35	Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (para a idade de 7 dias) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)	146
Figura 6.36	Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (para a idade de 91 dias) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)	147
Figura 6.37	Comparação entre os efeitos das interações a/agl. x TE= 10% e a/agl. x TE= 0% (referência) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D) a) ID = 7 dias b) ID = 28 dias c) ID = 91 dias	148
Figura 6.38	Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)	149
Figura 6.39	Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade (para relação água/aglomerante igual a 0,40) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)	150
Figura 6.40	Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade (para relação água/aglomerante igual a 0,70) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)	150

Figura 6.41	Comparação entre os efeitos das interações ID x TE= 10% e ID x TE= 0% (referência) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D) a) a/agl. = 0,40 b) a/agl. = 0,55 c) a/agl. = 0,70	152
Figura 6.42	Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para o concreto referência) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D).....	153
Figura 6.43	Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para teor de substituição de cimento por EGF igual a 10%) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D).....	154
Figura 6.44	Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para teor de substituição de cimento por EGF igual a 30%) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D).....	155
Figura 6.45	Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para teor de substituição de cimento por EGF igual a 50%) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D).....	155
Figura 6.46	Efeito isolado da relação água/aglomerante (a/agl.) sobre a resistência à tração na flexão (ft'F)	157
Figura 6.47	Efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a resistência à tração na flexão (ft'F).....	158
Figura 6.48	Efeito isolado da idade sobre a resistência à tração na flexão (ft'F).....	159
Figura 6.49	Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF sobre a resistência à tração na flexão (ft'F).....	161
Figura 6.50	Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (para a idade de 7 dias) sobre a resistência à tração na flexão (ft'F).....	161
Figura 6.51	Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (para a idade de 91 dias) sobre a resistência à tração na flexão (ft'F).....	162
Figura 6.52	Comparação entre os efeitos das interações a/agl. x TE= 10% e a/agl. x TE= 0% (referência) sobre a resistência à tração na flexão (ft'F) a) ID = 7 dias b) ID = 28 dias c) ID = 91 dias	164
Figura 6.53	Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade sobre a resistência à tração na flexão (ft'F)	165
Figura 6.54	Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade (para relação água/aglomerante igual a 0,40) sobre a resistência à tração na flexão (ft'F)	166
Figura 6.55	Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade (para relação água/aglomerante igual a 0,70) sobre a resistência à tração na flexão (ft'F)	167
Figura 6.56	Comparação entre os efeitos das interações ID x TE= 10% e ID x TE= 0% (referência) sobre a resistência à tração na flexão (ft'F) a) a/agl. = 0,40 b) a/agl. = 0,55 c) a/agl. = 0,70.....	168

Figura 6.57	Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade sobre a resistência à tração na flexão (ft'F).....	169
Figura 6.58	Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para o concreto referência) sobre a resistência à tração na flexão (ft'F).....	170
Figura 6.59	Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para teor de substituição de cimento por EGF igual a 10%) sobre a resistência à tração na flexão (ft'F).....	171
Figura 6.60	Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para teor de substituição de cimento por EGF igual a 50%) sobre a resistência à tração na flexão (ft'F).....	171
Figura 6.61	Micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários do concreto referência (a/agl.=0,70), aos 7 dias de idade a) interface pasta-agregado (magnitude de 800x) b) cristais de hidróxido de cálcio (3200x).....	176
Figura 6.62	Micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários do concreto com TE=10% (a/agl.=0,70), aos 7 dias de idade a) interface pasta-agregado (magnitude de 1600x) b) cristais de hidróxido de cálcio (800x) c) (3200x).....	177
Figura 6.63	Micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários do concreto referência (a/agl.=0,70), aos 28 dias de idade; interface pasta-agregado a) magnitude de 200x b) 800x.....	178
Figura 6.64	Micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários do concreto com TE=10% (a/agl.=0,70), aos 28 dias de idade ; interface pasta-agregado a) magnitude de 200x b) 800x.....	178

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Comparação entre tecnologias limpas e de fim-de-tubo (ECOPROFIT/1998 apud SANTOS, 2000)	8
Tabela 5.1	Propriedades químicas e físicas do CP II-F (cimento Portland Composto com Fíler).....	76
Tabela 5.2	Composição química de Escória Granulada de Fundação (EGF)	77
Tabela 5.3	Comparativo de composições químicas entre diferentes materiais cimentícios e/ou pozolânicos	79
Tabela 5.4	Análise indicativa por EDS da amostra de escória granulada de fundição não beneficiada (Figura 5.10)	81
Tabela 5.5	Análise indicativa por EDS da amostra de escória granulada de fundição beneficiada (Figura 5.11).....	82
Tabela 5.6	Análise indicativa por EDS da amostra de escória granulada de fundição não beneficiada (Figura 5.12)	84
Tabela 5.7	Composição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima característica da escória granulada de fundição (EGF)	84
Tabela 5.8	Resultados de massa específica absoluta da escória granulada de fundição (EGF) não beneficiada e beneficiada.....	85
Tabela 5.9	Resultados do ensaio de índice de atividade pozolânica da escória granulada de fundição (EGF) com cimento Portland	88
Tabela 5.10	Composição granulométrica e características físicas da areia.....	90
Tabela 5.11	Composição granulométrica e características físicas da brita	90
Tabela 5.12	Resultados do ajuste da curva de dosagem experimental.....	92
Tabela 6.1	Resultados de resistência à compressão uniaxial (f_c) em função do efeito isolado da relação água/aglomerante (a/agl.) a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	111
Tabela 6.2	Resultados de resistência à compressão uniaxial (f_c) em função do efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	113
Tabela 6.3	Resultados de resistência à compressão uniaxial (f_c) em função do efeito isolado da idade a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis	114
Tabela 6.4	Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis	116
Tabela 6.5	Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE, para a idade de 7 dias a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	117
Tabela 6.6	Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE, para a idade de 91 dias a) níveis	

	codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	118
Tabela 6.7	Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação TE x ID a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis	120
Tabela 6.8	Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação TE x ID, para relação água/aglomerante igual a 0,40 a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	121
Tabela 6.9	Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação TE x ID, para relação água/aglomerante igual a 0,70 a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	121
Tabela 6.10	Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis	124
Tabela 6.11	Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para o concreto referência) a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	125
Tabela 6.12	Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para TE igual a 10%) a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	126
Tabela 6.13	Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para TE igual a 50%) a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	126
Tabela 6.14	Consumo de cimento para idade de 28 dias dos concretos referência e com EGF	130
Tabela 6.15	Consumo de cimento para idade de 91 dias dos concretos referência e com EGF	132
Tabela 6.16	Consumo de cimento em função da resistência à compressão uniaxial aos 28 dias de idade, dos concretos referência e com EGF	135
Tabela 6.17	Relação custo/benefício (expresso em termos de consumo de cimento por MPa) em função da resistência à compressão uniaxial aos 28 dias de idade, dos concretos referência e com EGF.....	136
Tabela 6.18	Consumo de cimento em função da resistência à compressão uniaxial aos 91 dias de idade, dos concretos referência e com EGF	137
Tabela 6.19	Relação custo/benefício (expresso em termos de consumo de cimento por MPa) em função da resistência à compressão uniaxial aos 91 dias de idade, dos concretos referência e com EGF.....	138
Tabela 6.20	Resultados de resistência à tração por compressão diametral (ft'D) em função do efeito isolado da relação água/aglomerante (a/agl.) a) níveis	

	codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	141
Tabela 6.21	Resultados de resistência à tração por compressão diametral (ft'D) em função do efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	142
Tabela 6.22	Resultados de resistência à tração por compressão diametral (ft'D) em função do efeito isolado da idade a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis	143
Tabela 6.23	Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	145
Tabela 6.24	Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE, para a idade de 7 dias a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	146
Tabela 6.25	Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE, para a idade de 91 dias a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	146
Tabela 6.26	Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação TE x ID a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis	149
Tabela 6.27	Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação TE x ID, para relação água/aglomerante igual a 0,40 a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	149
Tabela 6.28	Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação TE x ID, para relação água/aglomerante igual a 0,70 a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	150
Tabela 6.29	Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para o concreto referência) a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	153
Tabela 6.30	Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para TE igual a 10%) a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	154
Tabela 6.31	Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para TE igual a 30%) a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	154
Tabela 6.32	Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para TE igual a 50%) a)	

	níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	155
Tabela 6.33	Resultados de resistência à tração na flexão em função do efeito isolado da relação água/aglomerante (a/agl.) a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis	157
Tabela 6.34	Resultados de resistência à tração na flexão em função do efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	158
Tabela 6.35	Resultados de resistência à tração na flexão em função do efeito isolado da idade a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis	159
Tabela 6.36	Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	160
Tabela 6.37	Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE, para a idade de 7 dias a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	161
Tabela 6.38	Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE, para a idade de 91 dias a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	162
Tabela 6.39	Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação TE x ID a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis	165
Tabela 6.40	Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação TE x ID, para relação água/aglomerante igual a 0,40 a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	166
Tabela 6.41	Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação TE x ID, para relação água/aglomerante igual a 0,70 a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	166
Tabela 6.42	Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	169
Tabela 6.43	Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para o concreto referência) a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	170
Tabela 6.44	Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para TE igual a 10%) a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	170
Tabela 6.45	Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para TE igual a 50%) a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis.....	171

Tabela 6.46	Relação entre resistência à tração e resistência à compressão dos concretos referência (TE=0%) e com EGF (TE=10%, 30% e 50%), para a idade de 28 dias.....	172
Tabela 6.47	Relação entre resistência à tração e resistência à compressão dos concretos referência (TE=0%) e com EGF (TE=10%, 30% e 50%), para a idade de 91 dias.....	172
Tabela 6.48	Resultados do ensaio de lixiviação do concreto referência (a/agl.=0,70 e ID=28).....	179
Tabela 6.49	Resultados do ensaio de solubilização do concreto referência (a/agl.=0,70 e ID=28)	179
Tabela 6.50	Resultados do ensaio de lixiviação do concreto com EGF (a/agl=0,70, TE=50% e ID=28)	180
Tabela 6.51	Resultados do ensaio de solubilização do concreto com EGF (a/agl=0,70, TE=50% e ID=28).....	180

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 4.1.....	48
Equação 4.2.....	49
Equação 4.3.....	49
Equação 4.4.....	49
Equação 4.5.....	49
Equação 4.6.....	49
Equação 5.1.....	93
Equação 5.2.....	100
Equação 5.3.....	102
Equação 6.1.....	110
Equação 6.2.....	139
Equação 6.3.....	156
Equação 6.4.....	174
Equação 6.5.....	174

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ASTM – American Society for Testing and Material

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABIFA – Associação Brasileira de Fundição

a/agl. – água/aglomerante

BOF - Forno de Oxigênio Básico

C₂S - silicato dicálcico (abreviação do composto 2CaO . SiO₂)

C₃S - silicato tricálcico (abreviação do composto 3CaO . SiO₂)

CP's - corpos-de-prova

C-S-H – silicato de cálcio hidratado

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (antigo DNER)

EDS - Energy Dispersive Spectroscopy

EGF - escória granulada de fundição

FEA - Forno Elétrico a Arco

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental

fc – resistência à compressão uniaxial

ft`D – resistência à tração por compressão diametral

ft`F – resistência à tração na flexão

ID – idade do concreto

LD - Lins-Donawitz

MEV - microscopia eletrônica de varredura

OH - Open-Hearth Furnace

TE – teor de substituição de cimento por EGF

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA GRANULADA DE FUNDIÇÃO (EGF) COMO SUBSTITUIÇÃO DE PARTE DO CIMENTO EM CONCRETO – PROPRIEDADES MECÂNICAS

Diana Maria Ceccatto

RESUMO

A reciclagem de resíduos sólidos industriais tem-se tornado uma prática indispensável na preservação de recursos naturais, minimização de custos e redução de impacto ambiental. Dentro deste contexto destaca-se a indústria da construção civil, com enorme potencial de reciclagem, tendo em vista o grande volume de materiais consumidos. A utilização de materiais alternativos neste setor é uma prática economicamente atraente e ambientalmente correta. Sendo assim, o emprego de escórias como matéria-prima em estradas, aterro, concreto e cimento já é uma prática corrente, onde o destino mais nobre destes materiais recicláveis depende da existência de características adequadas ao uso proposto. A escória granulada de fundição (EGF) é um resíduo gerado no processo de fusão de sucatas de ferro fundido via forno cubilô. Ensaios realizados mostram que esta escória, quando finamente moída, apresenta propriedades pozolânicas. Além disso, sua estrutura amorfa, resultante do processo de geração através de resfriamento brusco e composição química adequada podem permitir uma aplicação nobre deste resíduo, como substituição ao cimento. Este trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade da utilização de escória granulada de fundição como substituição de parte do cimento em concreto, através da avaliação de suas propriedades mecânicas. Para tanto foram moldados corpos-de-prova de concreto com diferentes combinações de teores de substituição de cimento por escória granulada de fundição (10%, 30% e 50%), em volume, e relações água/aglomerante (0,40; 0,55 e 0,70), comparando-se com o concreto referência. Para cada idade do concreto (7, 28 e 91 dias) realizaram-se ensaios mecânicos, tais como, resistência à compressão uniaxial, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão. Além disso, foram realizadas avaliação da microestrutura e caracterização ambiental de concretos com EGF, comparativamente ao concreto referência. Os resultados mostram que o teor de 10% de substituição de cimento por escória granulada de fundição, em volume, apresentou desempenho mecânico similar ao concreto referência. A caracterização ambiental dos concretos com EGF mostra que este material é considerado inerte (NBR 10004).

EVALUATION OF THE USE OF GRANULATED FOUNDRY SLAG AS SUBSTITUTION OF PART OF THE CEMENT IN CONCRETE - MECHANICAL PROPERTIES

Diana Maria Ceccatto

ABSTRACT

The recycling of industrial solid wastes has been a necessary practice for preservation of natural resources, reduction of environmental impact, which mean costs minimization. In this context it stands out the civil construction industry, with its enormous recycling potential as a function of the great volume of consumed materials. The use of alternative materials in the civil construction is economically attractive, and a correct practice for the environmental preservation. The employment of slag as raw material in highways, embankment, concrete and cement is already a current practice, and a more noble use of these recyclable materials depends on the existence of adequate characteristics for such possible use. The granulated foundry slag is a solid waste generated in the process of cast iron melting, via cupola furnace. This work shows that this slag, when finely milled, has pozzolanic properties. Besides, its amorphous structure, resultant of the generation process through water quenching and appropriate chemical composition allows a noble application to this solid wastes, as a substitution to the cement. This work intends to study the strength of concrete samples containing granulated foundry slag as a substitution of part of the cement. Those concretes samples were produced with different combinations of granulated foundry slag amount (10%, 30% and 50%), substitutes cement in volume, and water/binding ratio (0,40; 0,55 and 0,70). These samples were compared with the reference. For each age of the concretes samples (7, 28 e 91 days) were carried out mechanical tests: compressive strength, flexural and split tensile strength. Moreover the evaluation of the microstructure and environmental characterization of concretes samples with EGF were carried out to compare with concrete reference. The results have shown that 10% of cement substitution by granulated foundry slag, in volume, presented similar mechanical performance to the concrete reference. The environmental characterization has shown that the concrete samples containing EGF are considered an inert material according to NBR 10004.

1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica proporcionou à indústria, nos últimos anos, o aperfeiçoamento e otimização de seus produtos e processos produtivos. No entanto, este crescimento industrial veio acompanhado pelo ônus da elevada geração e acúmulo de resíduos, impondo ao homem um novo desafio: estabelecer um equilíbrio harmônico entre desenvolvimento econômico e o meio ambiente. Dessa forma, novas metas na prevenção de problemas ambientais, de poluição e geração de resíduos, através de tecnologias limpas, são desenvolvidas.

Dentro do conceito de Tecnologias Limpas, três ordens seqüenciais devem ser seguidas a fim de se promover o desenvolvimento sustentável, entre elas, evitar, minimizar e reciclar no próprio processo. Entretanto, quando o processo produtivo é otimizado, porém ainda algum resíduo é descartado, a reciclagem externa ganha papel preponderante na preservação do meio ambiente.

JOHN (2000) afirma que a reciclagem de resíduos permite vantagens potenciais para a sociedade, entre elas, preservação de recursos naturais, economia de energia, redução do volume de aterros, menor poluição, geração de empregos, redução de custos de controle ambiental pelas indústrias, aumento da durabilidade, e até mesmo economia de divisas.

Como exemplo, HABASHI (1999) cita a utilização de sucata na fabricação do aço como uma excelente alternativa de reciclagem, reduzindo a poluição ambiental. Além disso, produzir aço a partir da sucata consome 25% menos energia do que seria necessário na produção do mesmo aço a partir do minério de ferro, o que resulta também em benefícios econômicos.

A reciclagem de resíduos sólidos industriais tem sido fundamental na busca pelo desenvolvimento sustentável, possibilitando a preservação de recursos naturais não renováveis, através da substituição destes por materiais alternativos, com propriedades adequadas ao uso, além de minimização de custos e redução de impacto ambiental.

A busca pela minimização dos prejuízos causados ao meio ambiente mobiliza diversos setores da sociedade, visto que afeta a todos indistintamente. MOTZ e GEISELER (2001) ilustram alguns objetivos da Comunidade Européia referentes a este tema:

- proteger o meio ambiente e melhorar sua qualidade;
- proteger a saúde humana;
- garantir cauteloso e eficiente uso dos recursos naturais.

Segundo MOTZ e GEISELER (2001), estes objetivos refletem o compromisso com a responsabilidade de economizar fontes naturais, usando subprodutos da indústria, incrementando sua taxa de utilização, onde quer que suas propriedades técnicas e ambientais sejam satisfatórias para a aplicação em campo.

Para JOHN e ZORDAN (2001), a reciclagem de resíduos como material útil, é uma ferramenta de administração ambiental muito importante para alcançar o desenvolvimento sustentável. Sendo assim, sintetizam bem as regras para a adaptação da indústria às novas propostas de desenvolvimento sustentável:

- minimizar a geração de resíduos nas indústrias;
- um novo produto deve ser reciclável;
- um novo produto deve apresentar vantagens competitivas em comparação com competidores já estabelecidos no mercado e melhorar o valor dos resíduos.

A utilização de resíduos é uma alternativa atrativa na redução de custos de disposição e do potencial problema de poluição ou até mesmo eliminação, juntamente com a conservação de recursos. Além disso, esta utilização econômica estratégica deve ser combinada com a conservação ambiental e de energia, aproveitando de forma adequada o maior potencial do resíduo (SHI e QIAN, 2000).

Conforme JOHN e ZORDAN (2001), o sucesso da pesquisa no desenvolvimento de um novo material de construção ou componente, usando resíduo como matéria-prima, é uma tarefa complexa. Esta tarefa compreende a multidisciplinaridade, envolvendo conhecimento de diferentes áreas técnicas, ambientais, comerciais, legais e aspectos sociais. Caso contrário, a reciclagem de resíduos, sem adequada pesquisa e desenvolvimento científico, pode resultar em problemas ambientais maiores que o próprio resíduo.

No campo da reciclagem, a construção civil tem se tornado uma grande fonte recicladora de resíduos, devido ao elevado volume de materiais que utiliza. Dentro deste contexto, tem-se a reciclagem de escórias como matéria-prima na construção civil, podendo apresentar excelente desempenho técnico e econômico, além da importância ambiental, quando adequadamente empregadas.

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 apropriadas aos mesmos. Esta preocupação também se aplica à escória granulada de fundição (EGF), especificamente àquela gerada em forno cubilô na produção de ferro fundido, que, atualmente, não tem aplicação com valor agregado para a empresa geradora, sendo encaminhada para aterro no final do processo.

Como já vem acontecendo com as escórias granuladas de alto-forno, que possuem boas propriedades cimentícias, devido a sua característica reativa, a utilização de escória granulada de fundição (EGF) como material cimentante na construção civil poderá proporcionar uma aplicação, além de ser um uso de elevado valor agregado para este resíduo. No entanto, a correta utilização deste material reciclável depende de investigação científica, através da avaliação da adequação de suas propriedades a determinado uso proposto. Esta observação reforça o entendimento que cada escória gerada pode ter comportamento diferente, mesmo se for considerado processo semelhante, liga semelhante, em diferentes empresas.

Embora a indústria de fundição gere volumes inferiores de resíduos quando comparado à indústria de produção de aço, nem assim a reciclagem de resíduos de fundição, no caso específico de escória granulada de fundição (EGF), pode ser ignorada, visto que sua reciclagem e possível aquisição de valor comercial permitem, além de redução de custos, minimizar os prejuízos ambientais que a geração de diferentes materiais residuais tem provocado até então, contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a viabilidade de utilização de Escória Granulada de Fundição (EGF) como substituição de parte do cimento em concreto, sob o ponto de vista de desempenho mecânico e caracterização ambiental do concreto com EGF, comparativamente ao concreto referência.

Os objetivos específicos são:

- avaliar a influência de diferentes proporções de substituição de cimento por escória granulada de fundição (EGF) sobre as propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão uniaxial, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão), quando comparadas ao concreto referência (sem EGF);
- analisar a microestrutura do concreto com utilização de EGF;
- avaliar as características ambientais do produto (concreto) com substituição parcial de cimento por EGF.

1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta pesquisa foi estruturada em 8 capítulos, conforme as colocações seguintes.

No primeiro capítulo apresenta-se um contexto introdutório do tema de pesquisa, destacando-se a relevância da correta administração de resíduos industriais, entre eles escórias, para a preservação do meio ambiente, economia de energia e recursos naturais esgotáveis, na busca pelo desenvolvimento sustentável. Além disso, relacionam-se os objetivos, estrutura e limitações da pesquisa.

No segundo capítulo discute-se brevemente a importância da visão ambiental em relação à geração de resíduos industriais, apresentando-se as principais diferenças entre tecnologias limpas e de fim-de-tubo, os prejuízos ambientais e econômicos relacionados à geração de resíduos pelas indústrias e a necessidade da caracterização ambiental, em função do uso proposto aos resíduos industriais, especialmente quando da incorporação destes resíduos em um novo produto para comercialização.

O terceiro capítulo apresenta, entre os principais resíduos provenientes da indústria de fundição, uma abordagem sobre a areia de fundição e em especial sobre a escória granulada de fundição (EGF). Quanto à EGF, tratam-se aspectos relacionados a sua geração em forno cubilô, principais características, alguns estudos de aplicação da EGF e estimativas de geração da mesma.

O quarto capítulo aborda, de uma forma geral, as possibilidades de reciclagem de diferentes escórias na construção civil. Neste capítulo realizou-se um levantamento das principais aplicações propostas para as escórias na construção civil, visando avaliá-las como

possibilidade de aplicação no caso da EGF. Discute-se também a importância do resfriamento brusco das escórias na determinação de seu potencial reativo.

No quinto capítulo expõe-se o programa experimental, materiais e métodos relativos à pesquisa. Neste capítulo relacionam-se as variáveis de resposta, além dos fatores controláveis definidos na elaboração da matriz experimental do projeto de pesquisa. Apresenta-se desde a amostragem, beneficiamento, bem como caracterização da EGF utilizada como substituição parcial ao cimento, na produção dos concretos.

O sexto capítulo apresenta os resultados, bem como discussão destes resultados relacionados às variáveis de resposta (propriedades mecânicas do concreto) investigadas. Além disso, expõem-se resultados e discussões de análises microestruturais de concretos com EGF como substituição parcial do cimento, bem como da caracterização ambiental destes concretos.

No sétimo capítulo abordam-se as conclusões relacionadas à proposta de pesquisa, finalizando-se com o oitavo capítulo, que apresenta algumas sugestões para futuros trabalhos, utilizando-se escória granulada de fundição (EGF).

1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

No decorrer desta pesquisa, observou-se a seguinte limitação:

- como o projeto experimental exigia grande quantidade de EGF moída para a confecção de todos os corpos-de-prova de concreto, utilizados na realização dos ensaios mecânicos, não foi possível estocar volume de EGF moída suficiente para realizar estudo do tempo ótimo de moagem deste material, sendo utilizado como parâmetro, o estipulado pela NBR 12653/1992, que classifica os materiais pozolânicos.

2 RESÍDUOS INDUSTRIAIS: UMA VISÃO SOB O CONTEXTO AMBIENTAL

Alcançar o desenvolvimento sustentável tem sido aceito como uma necessidade vital para proteger o futuro do planeta. Isto somente pode acontecer se for assegurado que nas atividades econômicas, os recursos usados e resíduos gerados sejam minimizados e administrados de tal forma que o equilíbrio da natureza não seja afetado negativamente (HOOPER e JENKINS, 1995).

A modernização ecológica tem sido apontada, conforme MURPHY e GOULDSON (2000), como uma possível solução para os problemas ambientais que enfrentam a maioria dos países, além de possibilitar maior competitividade para as empresas.

O desenvolvimento sustentável preconiza que economia e ambiente são mutuamente dependentes. Assim, utilizando-se tecnologias mais limpas, pode-se reduzir a quantidade de resíduo produzido por unidade de produção, alcançando níveis de desenvolvimento sustentável tais, que se criaria, segundo HOOPER e JENKINS (1995), riqueza suficientemente necessária para combater a pobreza, sempre assumindo que nações mais pobres adquiram sua parte justa.

2.1 TECNOLOGIAS LIMPAS *versus* TECNOLOGIAS DE FIM-DE-TUBO

O processo sustentável de gerenciamento de resíduos implica nas seguintes medidas: **evitar** a geração de resíduos; **minimizar** a geração de resíduos, **reciclar** os resíduos e por fim, dispor de maneira ambientalmente segura (BERNARDES, 2000). A produção limpa, chamada tecnologia limpa (*clean technology*), consiste na prevenção dos problemas ambientais, atacando as causas, visa antecipar e prevenir o problema antes do evento acontecer. Dessa forma, o melhor planejamento tecnológico reduz a necessidade de tratamento dos poluentes. A tecnologia de fim-de-tubo (*end-of-pipe technology*) costuma atacar os efeitos, consistindo no controle e tratamento da poluição já existente (BERNARDES, 2000). Assim também concordam MURPHY e GOULDSON (2000), ao afirmarem que tecnologias de fim-de-tubo preocupam-se em tratar a emissão de resíduos, visando limitar seu impacto no ambiente e as tecnologias limpas objetivam evitar a geração de resíduos. Desta forma, enquanto que a tecnologia de controle (tecnologia de fim-de-tubo) pode ser interpretada como resposta de

reação às emissões de poluentes, a tecnologia limpa funciona como uma forma preventiva, evitando a emissão de resíduos.

Existem diferentes implicações econômicas e ecológicas na adoção de alternativas tecnológicas como tecnologias de produção limpas ou tecnologias de fim-de-tubo. Enquanto que na tecnologia de fim-de-tubo os problemas ambientais são separados do processo de produção, no processo de produção limpa as considerações ambientais fazem parte integrante do sistema produtivo (GETZNER, 2002). Tecnologias de emissão zero, minimização de desperdícios, reduções significativas de energia e racionalização no processo de produção são algumas das vantagens ambientais que podem ser citadas no processo de tecnologias limpas. Porém, segundo GETZNER (2002), ganhos ambientais são só um lado deste “*triângulo de sustentabilidade*”, sendo as duas outras bases, a viabilidade econômica e os benefícios sociais.

A Tabela 2.1 mostra, resumidamente, características relacionadas às tecnologias limpas e tecnologias de fim-de-tubo, estabelecendo uma análise comparativa.

MURPHY e GOULDSON (2000) sustentam ainda que tecnologias limpas são economicamente e ambientalmente mais eficientes a médio e longo prazo, melhorando a administração de recursos e aumentando o desempenho econômico da empresa. Já as tecnologias de controle de fim-de-tubo oferecem uma resposta em curto prazo, produzindo soluções rápidas.

Visto que tecnologias mais limpas têm por finalidade prevenir os problemas de poluição, atacando a fonte de poluição, ou seja, a fonte geradora de resíduos, na busca da redução do desperdício, para HOOPER e JENKINS (1995), a implementação de mecanismos de tecnologias limpas ocorre segundo as alternativas seguintes:

- reutilização ou recuperação;
- reciclagem dentro do próprio processo;
- mudanças dentro do segmento produtivo do próprio processo;
- alteração do produto final.

As mudanças relacionadas com tecnologias mais limpas incluem: otimização do processo; uso mais eficiente de matérias-primas e energia; minimização de custos e administração de desperdícios. Assim, tecnologias mais limpas podem reduzir problemas ambientais enquanto elevam a produtividade econômica. Porém alguns obstáculos na adoção do processo de tecnologias limpas podem ser citados, entre eles, relativas vantagens da

tecnologia de fim-de-tubo, pois esta solução normalmente está relacionada com despesas reduzidas a curto prazo; investimentos inovadores, como no caso de tecnologias limpas, costumam estar relacionados com longo prazo de retorno; falta de conhecimento, onde as empresas freqüentemente ignoram os benefícios derivados da redução no custo de poluição (HOOPER e JENKINS, 1995). Dessa forma, a compatibilidade de tecnologias limpas, com sistemas existentes, é normalmente mais limitada, sendo conseqüentemente um processo mais caro (MURPHY e GOULDSON, 2000).

Tabela 2.1 Comparação entre tecnologias limpas e de fim-de-tubo (ECOPROFIT/1998 apud SANTOS, 2000)

Tecnologia de fim-de-tubo	Tecnologia limpa
Como tratar resíduos e emissões existentes?	De onde vêm os resíduos e emissões existentes?
Atitude de reação	Atitude de ação
Geralmente leva a custos adicionais	Pode ajudar a reduzir custos
Os resíduos e emissões são limitados através de filtros e unidades de tratamento Tecnologia de reparo Estocagem de emissões	Prevenção de resíduos e emissões na fonte Evita processos e materiais potencialmente tóxicos
A proteção ambiental entra depois que os produtos e processos tenham sido desenvolvidos	A proteção ambiental entra como uma parte integrante do <i>design</i> do produto e da engenharia do processo
Os problemas ambientais são resolvidos a partir de um ponto de vista tecnológico	Tenta-se resolver os problemas ambientais em todos os níveis e em todos os campos
Proteção ambiental é assunto para especialistas competentes	Proteção ambiental é tarefa de todos
Normalmente é trazida de fora	É uma inovação desenvolvida dentro da empresa
Aumenta o consumo de material e energia	Reduz o consumo de material e energia
Complexidade e riscos aumentados	Riscos reduzidos e transparência aumentada
Proteção ambiental desce para preenchimento de prescrições legais	Proteção ambiental como um desafio permanente
É resultado de um paradigma de produção que data de um tempo em que problemas ambientais ainda não eram conhecidos	É uma abordagem que pretende criar técnicas de produção para um desenvolvimento mais sustentado

Segundo PIETRELLI (1999), o desenvolvimento sustentável deveria ser desempenhado principalmente como uma prevenção estratégica de poluição, que usualmente consiste em alguns procedimentos, tais como, avaliação do processo, minimização de desperdícios, reuso de resíduos no processo, projetar o processo para que o resíduo permaneça como matéria-prima do mesmo ou de outros processos (“*cascata de uso*”).

A Figura 2.1 mostra, esquematicamente, formas de gerenciamento de resíduos que dizem respeito a uma ou outra tecnologia, respectivamente.

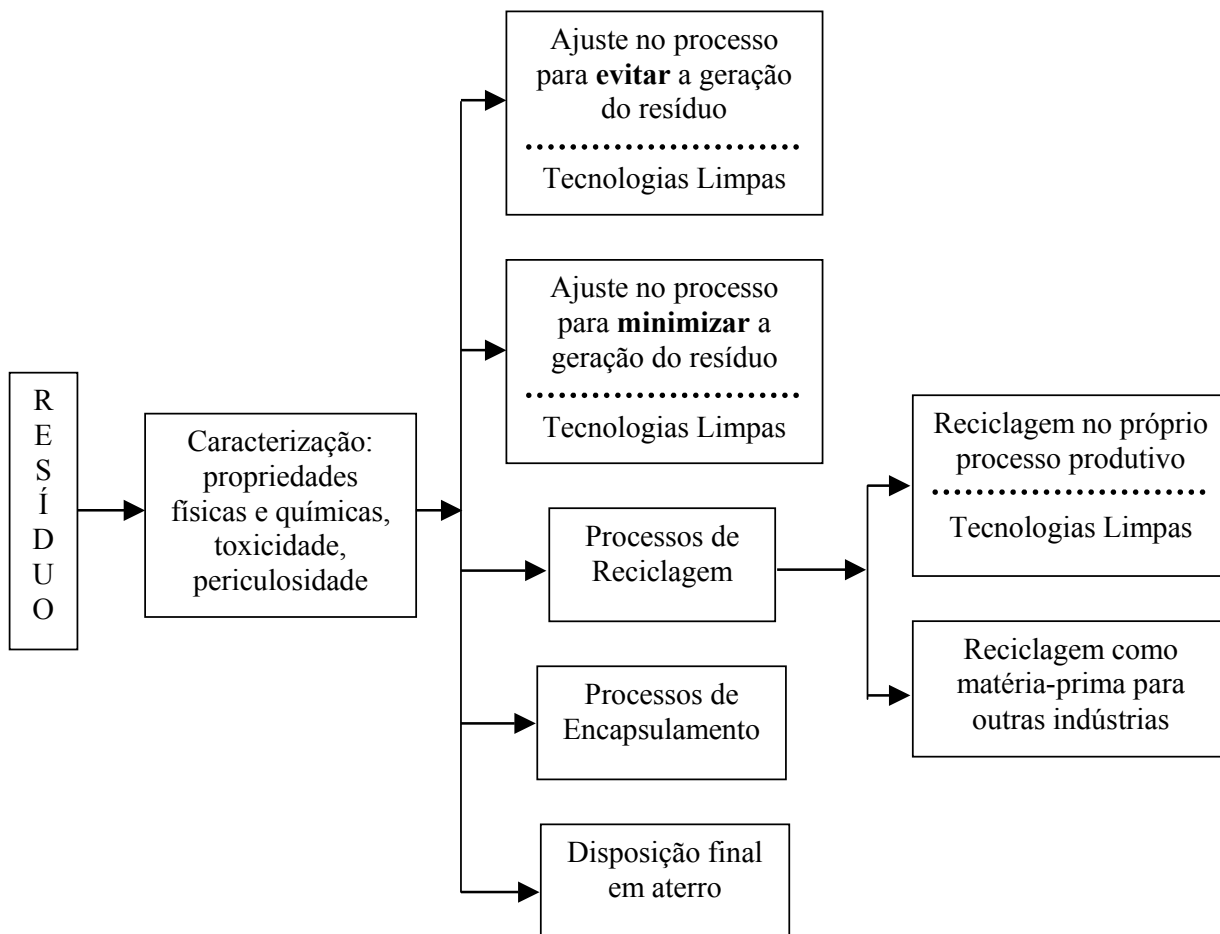


Figura 2.1 Formas de gerenciamento de resíduos (BERNARDES, 2000)

Para NAKAMURA et al. (1999), reciclagem e minimização de resíduos são palavras chaves para o desenvolvimento sustentável nos próximos tempos. Contudo, segundo os autores, o uso do termo desenvolvimento sustentável sem qualquer base científica pode dar para as pessoas uma falsa sensação de segurança. Os engenheiros e cientistas têm que analisar o fluxo de massa do total de energia e materiais, estimando a geração local de resíduos no ambiente, como também o impacto global da atividade industrial para que se assegure a sustentabilidade no planeta.

2.2 INDÚSTRIA *versus* MEIO AMBIENTE

A crescente industrialização dos países, intensiva exploração agrícola e elevado consumo de recursos naturais tem resultado em aumento de desperdícios industriais e agrícolas, sendo grande parte resíduos tóxicos, prejudiciais ao ar, água, solo e ser humano. Para CHAABAN (2001), isto torna cada vez mais essencial a solução do conflito entre desenvolvimento econômico e proteção ambiental. Para tanto, severas leis de regulamentação das emissões prejudiciais (gases, líquidos e sólidos) das plantas industriais têm sido aplicadas, objetivando minimizar os efeitos prejudiciais da poluição. Entretanto, resultados mais eficazes podem ser obtidos através de pesquisa inovadora e reformulação dos produtos e equipamentos, modificando processos e recuperando materiais através do reuso ou reciclagem.

Segundo CHAABAN (2001), a indústria é sem dúvida a maior geradora de resíduos perigosos. Estimativas de geração de resíduos são dificilmente encontradas na maioria dos países (JOHN, 2000; CHAABAN, 2001). É assumido que provavelmente entre 10-15% dos resíduos produzidos pelas indústrias sejam perigosos, e que esta geração de resíduos perigosos seja incrementada numa taxa de 2-5% ao ano (CHAABAN, 2001).

De acordo com dados levantados pela Agência Européia do Meio Ambiente, entre os anos de 1990–1995, a quantidade de desperdícios gerados nos países da União Européia aumentou em quase 10%, enquanto que o crescimento econômico foi apenas 6,5% (KAUTTO e MELANEN, 2003).

Na Finlândia, em estudo de múltiplo-caso, KAUTTO e MELANEN (2003) avaliaram o impacto de políticas de resíduos em 14 grandes companhias industriais finlandesas dos anos noventa. Segundo os autores, o interesse das empresas em melhorar suas políticas de desperdício era pequeno e a maior pressão pelo desempenho ambiental vinha dos clientes. Entretanto, segundo a legislação finlandesa, a administração de resíduos industriais consiste em apoiar o desenvolvimento sustentável, aumentando o uso racional de recursos naturais, prevenindo e controlando os danos à saúde humana e ao ambiente provocados pelo mau gerenciamento desses desperdícios. A prioridade no controle dos resíduos industriais, segundo a legislação finlandesa, é a minimização e prevenção na geração de resíduos, bem como a recuperação e reciclagem.

Para SHEN e TAM (2002), a construção não é normalmente uma atividade benéfica ao meio ambiente. Provavelmente a atividade de construção seja a principal contribuinte para

poluição ambiental, onde os contribuintes principais para os impactos ambientais são tipicamente a poluição do ar, geração de resíduos, ruídos e poluição da água. Entre os benefícios alcançados através da implementação da administração ambiental pelas empresas estão a contribuição para proteção ambiental, a redução de risco ambiental, melhora na imagem ambiental da empresa, economia de custos devido à redução de multas associadas à poluição ambiental, melhora no ambiente de trabalho, incremento na competitividade da empresa, contribuição para a melhoria de padrões ambientais públicos, redução de reclamações ambientais.

Segundo dados da ABCP (2002), o Brasil é um dos oito maiores produtores de Cimento Portland, onde somente no ano de 2000, o Brasil produziu cerca de 39,6 milhões de toneladas de Cimento Portland. A Figura 2.2 mostra dados estatísticos da evolução da produção de cimento Portland no Brasil.

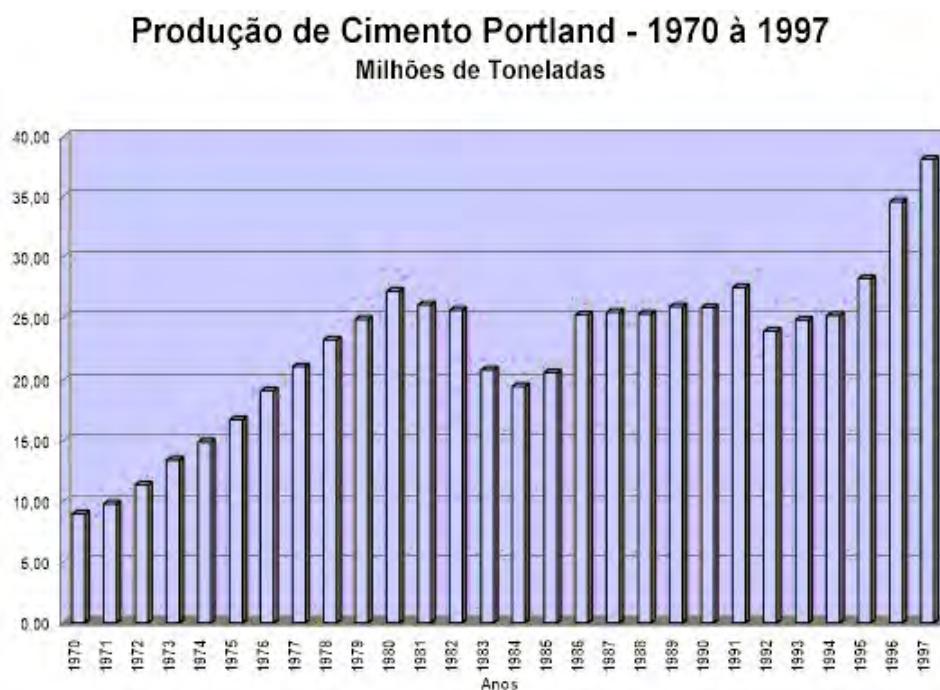


Figura 2.2 Evolução da produção de cimento Portland no Brasil (Cimento Web, 2002)

Conforme EHRENBERG e GEISELER (2000), a produção anual de cimento gera aproximadamente 7,9% de toda a emissão de CO₂ no mundo inteiro. ROSTIK (1999) apresenta um valor aproximado, afirmando que a emissão de CO₂ pelas empresas de fabricação de cimento está em torno de 7% ao ano. Metade disto resulta da calcinação do calcário e o restante provém do uso de combustíveis fósseis na produção do clínquer (ROSTIK, 1999). Na Alemanha, a produção de 1 tonelada de cimento Portland libera ao meio

aproximadamente 1,011 toneladas de CO₂, ao passo que a produção de 1 tonelada de cimento de escória de alto-forno (contendo 75% de escória de alto-forno em massa) libera somente 0,32 toneladas de CO₂ (EHRENBERG e GEISELER, 2000). No momento em que através de debates internacionais, países desenvolvidos e subdesenvolvidos se reúnem para discutir formas de redução de emissões de poluentes ambientais, a utilização de resíduos industriais como matérias-primas, a exemplo do bom desempenho ambiental e técnico demonstrado pelas escórias de alto-forno, assume cada vez mais papel preponderante na aplicação de medidas sustentáveis.

O uso de escória granulada de alto-forno reduz tanto o consumo de energia quanto a emissão de CO₂ em proporções significativas. Observando os levantamentos feitos por EHRENBERG e GEISELER (2000), na Alemanha, fica evidente a contribuição da utilização de resíduos como matéria-prima, tanto do ponto de vista econômico, através de economia de energia (Figura 2.3), quanto ambiental, através de redução na emissão de CO₂ (Figura 2.4).

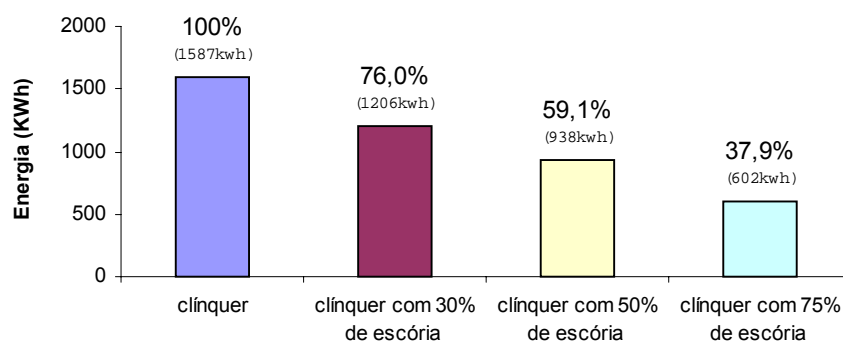


Figura 2.3 Energia demandada por tonelada de cimento produzido (EHRENBERG e GEISELER, 2000)

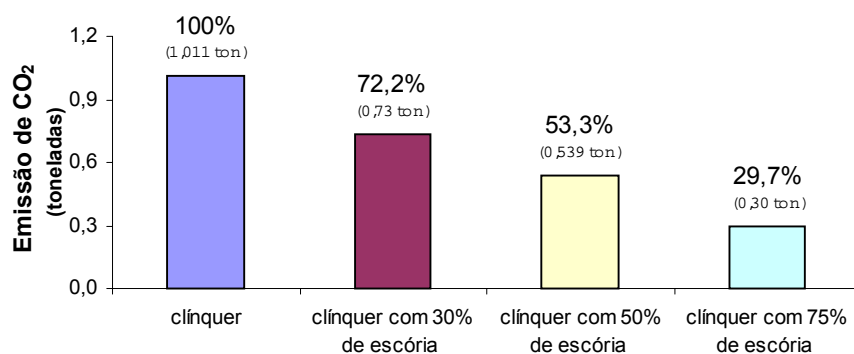


Figura 2.4 Emissão de CO₂ por tonelada de cimento produzido (EHRENBERG e GEISELER, 2000)

No Texas, a TXI (“Texas Industries, Inc.”), companhia que atua em diversas atividades industriais, entre elas produção de aço e fabricação de cimento, interligou estes dois setores e atualmente utiliza 100% da escória que gera como matéria-prima na fabricação do cimento. Com este processo a TXI substitui entre 10 a 15% do calcário por escória de aciaria (com estrutura pozolânica), o que possibilitou aumento em torno de 9% na produtividade e entre 10 a 15% de economia de energia. De acordo com monitoramentos realizados, a empresa constatou redução de 10% na emissão de CO₂ (ROSTIK, 1999). Conforme ROSTIK (1999), se este processo fosse aplicado em todas as indústrias de fabricação de cimento dos Estados Unidos, isto representaria um potencial de redução da emissão de CO₂ em torno de 8,8 milhões de toneladas por ano, somente nos Estados Unidos.

Segundo SEALEY et al. (2001), a produção de concreto é responsável por aproximadamente um terço de toda a extração mineral do Reino Unido. As pressões ambientais e elevadas taxas de disposição encorajaram os fabricantes de concreto a reduzir substancialmente a quantidade de resíduos gerados. A indústria da construção do Reino Unido utiliza aproximadamente 240 milhões de toneladas de agregados por ano e produz mais de 70 milhões de toneladas de resíduos. A maior parte destes resíduos é disposta em pilhas, sendo que menos de 25% dos agregados usados na construção civil provém de fontes recicláveis.

AÏTCIN (2000), em suas previsões sobre o futuro da indústria do cimento e concreto, argumenta que o cimento e concreto terão que evoluir no que diz respeito ao meio ambiente, dentro de uma perspectiva de desenvolvimento sustentável, através da utilização de misturas minerais, incrementando as possibilidades de uso de misturas hidráulicas e agregados recicláveis. Dessa forma, o aumento no uso de componentes minerais, em relação ao clínquer, ajudará a indústria do cimento a cumprir algumas metas para alcançar o desenvolvimento sustentável, o qual será imposto pelos governos.

Para AÏTCIN (2000), o concreto do futuro será mais durável, sendo desenvolvido para satisfazer as necessidades socioeconômicas com o menor impacto ambiental possível. O custo de um projeto no futuro irá incorporar não só os custos econômicos presentes, mas também os custos sociais e ambientais, que incluem desde a extração da matéria-prima, sua utilização, bem como sua eliminação ao término do ciclo de vida das estruturas.

Cada vez mais a competitividade entre companhias exige rápidas mudanças e adaptações. Da mesma forma, segundo ERCORECA et al. (1999), o processo de globalização e a integração econômica e monetária da Europa fazem despertar maior atenção à inovação e

tecnologia nestes países. Entretanto, esta inovação tecnológica não será promissora se não for acompanhada pela adaptação ao meio ambiente.

Segundo MORAES (2002), a existência de barreiras envolvendo o regulador ambiental (agências de proteção ambiental), o gerador de resíduos (a empresa) e o usuário (construtoras, por exemplo) atuam como um obstáculo à reciclagem de resíduos sólidos da indústria de fundição. Esta observação também vale para outros setores industriais.

A administração de resíduos deveria servir como um vínculo direto entre governo, indústria e população em geral, existindo um programa obrigatório de prevenção de desperdício, bem como o tratamento e disposição dos resíduos que inevitavelmente são gerados (CHAABAN, 2001).

2.3 DANOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS

Atualmente, grande parte dos resíduos industriais gerados é depositada em terrenos próximos às próprias fábricas, formando-se grandes pilhas de resíduo. O destino incerto deste material acarreta diversos problemas ambientais e econômicos, tais como (GARCÍA et al., 1999):

- incremento nos custos de produção, como, por exemplo, pagamento de taxas de depósito. As empresas terceirizam a disposição final de seus resíduos, mas continuam tendo responsabilidade solidária em relação aos mesmos;
- grande espaço físico para depósito de resíduos, em função dos elevados volumes gerados;
- poluição ambiental através do impacto visual e do grau de periculosidade atribuída ao resíduo (caso este não seja inerte);
- redução da qualidade de vida nos arredores das indústrias. Terras próximas às indústrias tornam-se impróprias para cultivo e habitação. Contaminantes, como emissão de partículas, podem representar sério perigo para a vegetação e vida animal nas vizinhanças (HABASHI, 1999).

Entretanto, o impacto ambiental pode ser minimizado, agregando-se valor econômico aos subprodutos industriais, especificamente às escórias, quando aplicadas na construção civil sob diferentes formas, como lastro de ferrovias, material de aterro, agregados para base e sub-base de pavimentos ou revestimento asfáltico, agregado para concreto e matéria-prima na produção de cimento (MURPHY, 1997; VIKLUND et al., 1999; GARCÍA et al., 1999). O

destino mais nobre destes materiais recicláveis depende da existência de características adequadas ao uso proposto.

2.4 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

A caracterização ambiental dos resíduos é considerada atualmente, principalmente pelos órgãos ambientais, requisito indispensável para aprovação ou não do uso proposto para determinado resíduo.

Quando resíduos industriais são utilizados como materiais de construção, a migração de componentes prejudiciais destes resíduos é a preocupação mais significativa em termos ambientais. Algumas características dos resíduos devem ser consideradas quando o potencial de risco e utilização dos mesmos é avaliado (MROUCH e WAHLSTRÖM, 2002):

- riscos diretos para humanos, plantas, animais e organismos na água;
- propriedades lixiviantes, como no local de disposição;
- formação de emissões de gases tóxicos, através da degradação, reatividade;
- problemas causados pela formação de pó.

Segundo JOHN e ZORDAN (2001), a avaliação ambiental constitui um passo decisivo na produção de um novo produto que utiliza algum material residual como matéria-prima. Inicialmente a avaliação comercial é um importante passo, freqüentemente negligenciado quando se escolhe a melhor aplicação para um determinado resíduo. Outros passos importantes são o desenvolvimento do produto e avaliação do desempenho. E por fim, a avaliação ambiental, sendo muito importante no desenvolvimento de uma nova tecnologia, pois nem tudo o que é reciclável pode ser aceito ambientalmente. Esta avaliação deve ser baseada na definição do ciclo de vida, devendo-se considerar o benefício ambiental, evitar a disposição do resíduo em pilhas e incluir testes ambientais como lixiviação e outros testes específicos. Também a transferência de tecnologia deve ser cuidadosamente planejada e desenvolvida na apresentação de um novo produto.

Devido ao fato de algumas escórias não se enquadrarem como inertes pela NBR 10004/1987 (Classificação de Resíduos Sólidos), o produto resultante de sua utilização como matéria-prima deve ser caracterizado ambientalmente. Esta é uma exigência dos órgãos ambientais, que no estado do Rio Grande do Sul são representados pela FEPAM (Fundação

Estadual de Proteção Ambiental), entidade estadual responsável pela execução de programas e projetos de controle e fiscalização de atividades potencialmente poluidoras.

A questão realmente é verificar se, quando o resíduo é incorporado ao concreto, por exemplo, ocorre o “encapsulamento” do mesmo, ou seja, se passa a não ser mais solubilizado ao meio (no caso de escórias classificadas como perigosas ou não-inertes). Esta questão está diretamente relacionada às condições de exposição do material. Atualmente, as normas NBR 10005/1987 (Lixiviação de Resíduos), NBR 10006/1987 (Solubilização de Resíduos) e NBR 10004/1987 (Classificação de Resíduos Sólidos), são utilizadas como referência pela FEPAM, para avaliar a liberação ou não da comercialização tanto dos resíduos quanto produtos que utilizam estes resíduos como matéria-prima.

A NBR 10004 (1987) classifica os resíduos sólidos conforme riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde humana, de acordo com as seguintes classes: resíduos classe I – perigosos; resíduos classe II – não-inertes; resíduos classe III – inertes. Conforme esta norma, os resíduos classe I são aqueles que apresentam periculosidades e características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Os resíduos não-inertes são os que podem ter propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. Resíduos inertes são considerados os que não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, com exceção de padrões como aspecto, cor, turbidez e sabor.

Para a classificação dos resíduos segue-se o procedimento indicado no fluxograma da Figura 2.5.

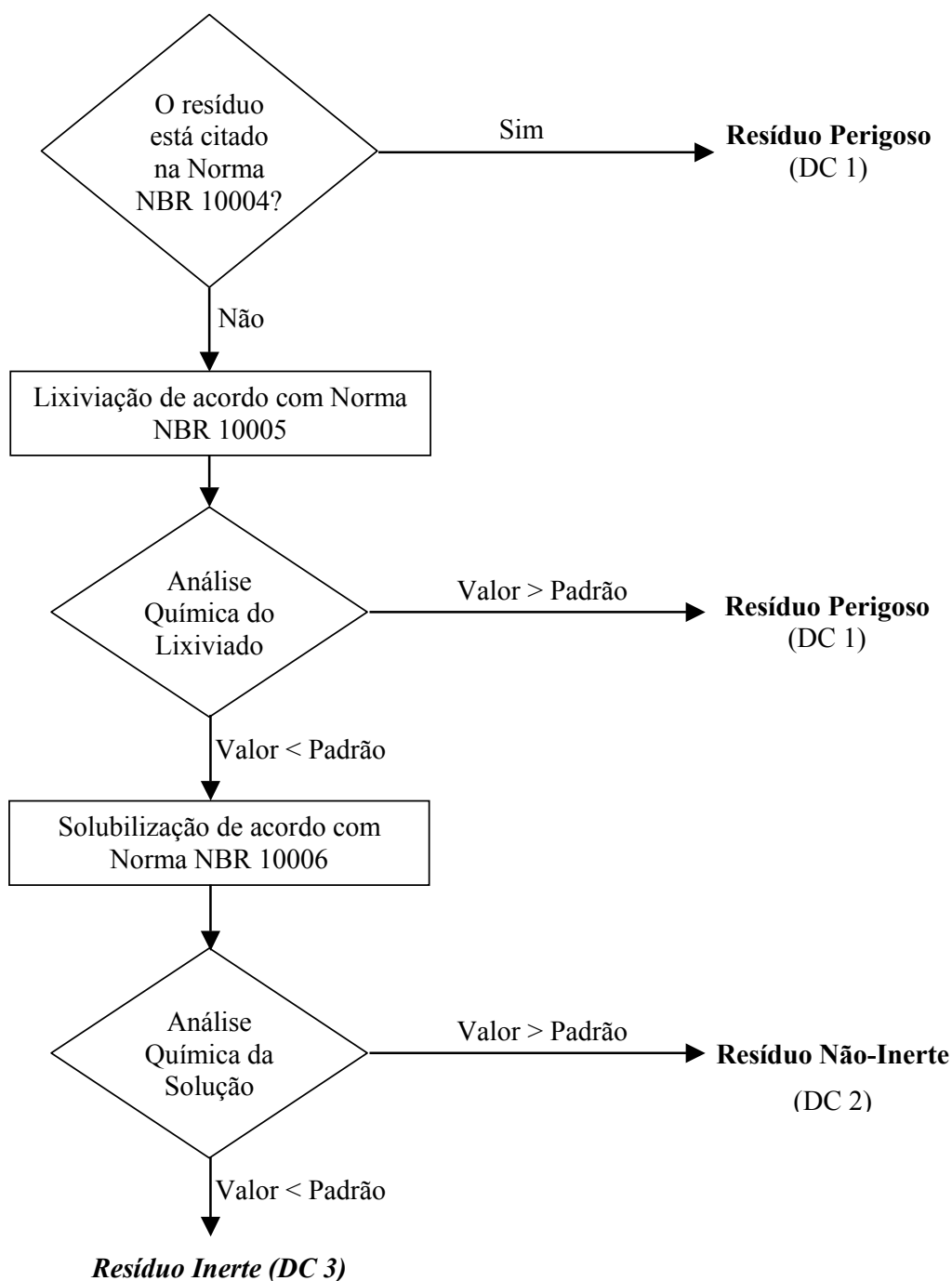


Figura 2.5 Classificação de resíduos de acordo com as normas brasileiras (BERNARDES, 2000)

Assim, se o resíduo não estiver citado na norma NBR 10004 (1987), realiza-se o ensaio de lixiviação (NBR 10005/1987), e através da análise do limite máximo admitido no extrato lixiviado, determina-se sua periculosidade ou não. Caso esteja dentro dos limites, amostras deste material são então submetidas ao ensaio de solubilização (NBR 10006/1987), e a verificação da adequação ou não aos limites máximos admitidos para o extrato deste teste,

classificará o resíduo, respectivamente como não-inerte ou inerte. Esta classificação objetiva avaliar a periculosidade do resíduo através da análise do potencial que o constituinte tem de migrar para o ambiente (BERNARDES, 2000).

Para MOTZ e GEISELER (2001), a avaliação básica da compatibilidade ambiental dos agregados como materiais de construção civil não é determinada pelo conteúdo dos elementos relevantes ambientalmente presentes no material sólido, mas pelo seu comportamento potencial de lixiviação em uso, no meio em que se encontra. Sendo assim, é este contexto que os testes de lixiviação devem simular. O tradicional método de lixiviação de resíduos (como no caso da NBR 10005/1987) trabalha com a constante rotação do material ensaiado, produzindo tensão mecânica, novas fraturas na superfície, onde graus de abrasão estão sujeitos a acontecer. Dessa forma, MOTZ e GEISELER (2001) consideram que a técnica tradicional é inadequada para descrever as características de lixiviação dos agregados, desenvolvendo um novo método de ensaio, o teste do tanque de lixiviação.

Segundo BIALUCHA et al. (2000), o teste do tanque é mais adequado para uso prático. Neste ensaio o material é colocado dentro de um tanque de polipropileno ou de vidro, com capacidade para 30 litros, com quantidade de água igual a 10 vezes o peso do material em estudo. O material é disposto sobre uma malha de abertura igual a 2mm para permitir bom fluxo. A vantagem deste teste e diferença para o método tradicional está essencialmente no fato de que em vez de agitar todo o recipiente apenas o líquido circula em torno do agregado (através de um agitador magnético), para permitir intensa lixiviação em curto período de investigação. Isto evita tensão mecânica severa na amostra. Conforme MOTZ e GEISELER (2001), na Alemanha o teste do tanque de lixiviação tem sido utilizado oficialmente como método de controle ambiental, especialmente de agregados de escórias empregados na construção de estradas.

LIND et al. (2001) têm investigado o impacto ambiental da escória de ferro-cromo em estradas construídas em 1994. Esta escória é um subproduto da produção de ferro-cromo, que é essencial componente na produção de aço inoxidável, sendo utilizada como material de construção de estradas. Testes de composição da escória de ferro-cromo mostraram que o conteúdo de cromo é alto, entre 1 e 3%, embora a lixiviação no solo em condições normais é muito baixa. Com exceção do potássio (K), que apresentou capacidade potencial de lixiviação em torno de 16%, a lixiviação do cromo, níquel, zinco e outros elementos apresentou-se baixa. Contudo, os autores desejavam investigar se as condições de campo, como a influência

da chuva ácida e atividade biológica, poderiam ser reproduzidas em laboratório e estes dados comparáveis. Assim, realizaram estudos em condições reais de campo, e compararam os resultados de campo com os ensaios de laboratório. A investigação incluiu amostragem do solo, análises da água do solo e, além disso, a avaliação do efeito do cromo e outros metais nas plantas (raízes e folhas) que crescem em contato com esta escória.

Amostras de pavimento com escória foram coletadas, utilizando-se para os testes de lixiviação material de dimensões menores de 2mm em duas etapas, através do teste de extração com ácido ascórbico (“*ascorbate extraction*”) e do teste de troca de metais (“*exchangeable metals*”). No primeiro teste, a amostra é disposta em uma mesa vibratória durante 24 horas, onde ajusta-se o pH igual a 8, através de ácido ascórbico, e L/S (relação líquido/sólido) igual a 20. Este método simula o potencial de lixiviação durante longo período (100 anos ou mais). O segundo teste é realizado sob as mesmas condições do primeiro, entretanto a relação L/S é 8 e o pH é ajustado para 7, usando $MgCl_2$ ao invés de ácido ascórbico. Este método simula o potencial de lixiviação por infiltração da água da chuva durante longo período (LIND et al., 2001).

Os autores obtiveram resultados mostrando que havia uma pequena migração de partículas da escória para o solo, ocorrendo pequeno aumento do cromo adsorvido próximo à cobertura superficial da estrada. A lixiviação na água do solo foi baixa para todos os elementos analisados. Contudo parecia ser significativo o efeito do cromo nas plantas que cresciam com suas raízes em contato com a escória. O risco de bioacumulação (cromo ou demais elementos), por pássaros ou outros animais que se alimentam das plantas ao longo da estrada não foi estudado.

SILVA FILHO (2001) também estudou o desempenho da escória de ferro-cromo como matéria-prima na construção civil, através da avaliação da utilização de escória de ferro-cromo (gerada numa companhia de ferro-ligas da Bahia), como agregado graúdo na produção de concreto. Os resultados mostraram que, embora a escória de ferro-cromo tenha sido classificada como não inerte, quando incorporado no concreto, elementos como cromo hexavalente não eram solubilizados ao meio, provavelmente por encapsulamento destes elementos no concreto.

Conforme pesquisas realizadas por MOUCH e WAHLSTRÖM (2002) sobre utilização de subprodutos industriais na Finlândia, até os anos oitenta, pouca atenção era dada ao cumprimento das condições ambientais. A falta de informações a respeito do desempenho a

longo prazo de subprodutos industriais prejudicou a difusão de sua utilização, motivado pela incerteza em relação ao seu impacto ambiental e desempenho técnico. Dessa forma, objetivando assegurar o desempenho técnico, proteger a saúde humana e o meio ambiente, um guia para avaliação ambiental e aplicabilidade técnica destes materiais foi desenvolvido, através de estudo intenso de vários fatores que afetam a aceitabilidade de diferentes produtos secundários na indústria da construção.

Segundo MOUCH e WAHLSTRÖM (2002), atualmente, na Finlândia, são gerados, anualmente, mais de 6 milhões de toneladas de subprodutos industriais e ao mesmo tempo, mais de 50 milhões de agregados naturais são utilizados a cada ano na construção de estradas. Conforme os autores, a evidente necessidade de substituição é expressa especialmente pelo esgotamento destes materiais, aumentando-se a distância de transporte. Juntamente com isto, a atual legislação ambiental do país, exigindo o uso racional de fontes naturais e redução de disposição em pilhas de estocagem, torna o emprego de subprodutos como substitutos de materiais naturais uma prática indispensável. No entanto, o pré-requisito para uso de subprodutos industriais é a aprovação de sua adequação técnica e ambiental, o que significa que o conteúdo de poluentes destes materiais deve ser baixo, bem como sua migração para o meio.

Os parâmetros de avaliação da lixiviação de resíduos, na Finlândia, estão baseados na norma holandesa de lixiviação, teste de lixiviação em colunas NEN 7343 e teste de lixiviação por difusão NEN 7345. O desempenho a longo prazo é simulado variando as condições de pH, as quais o material está submetido (MROUCH e WAHLSTRÖM, 2002). A Figura 2.6 apresenta as principais fases de investigação ambiental para reciclagem de subprodutos industriais na Finlândia.

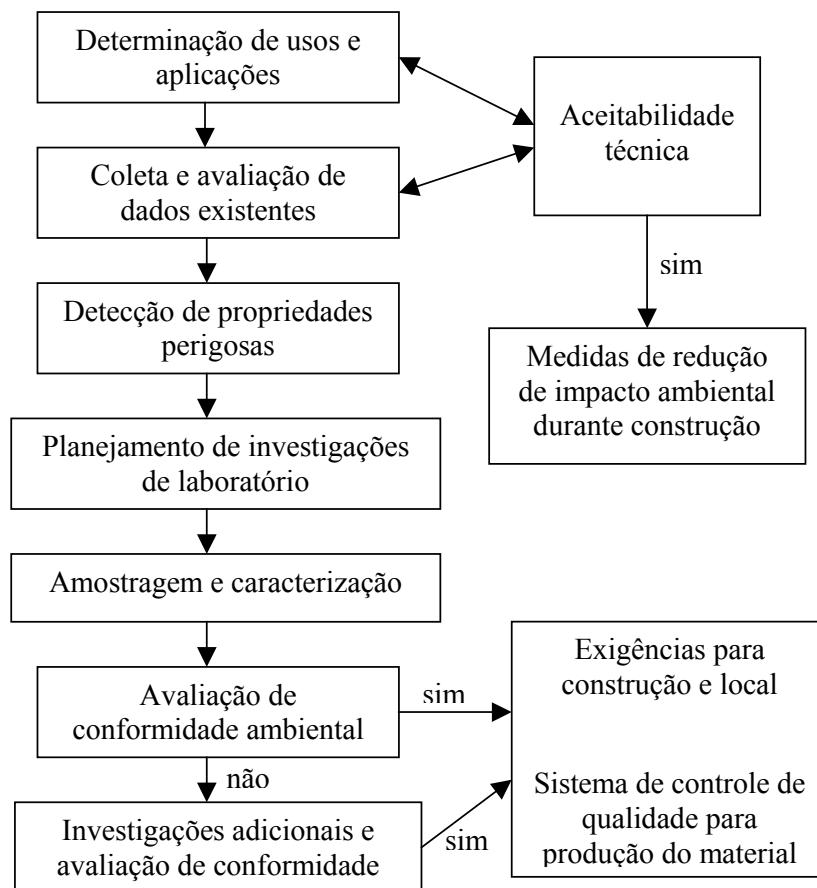


Figura 2.6 Principais fases de investigação na avaliação ambiental de subprodutos industriais (MROUCH e WAHLSTRÖM, 2002)

Atualmente, os processos de solidificação em matriz cimentícia, com emprego de materiais residuais com características cimentícias e/ou pozolânicas, ou somente como fíler (material de preenchimento), têm sido bem aceito como uma forma de alcançar a solidificação/estabilização de metais pesados, presentes nestes materiais residuais (RHA et al., 2000).

A estabilização consiste num pré-tratamento através do qual os constituintes perigosos de um resíduo são transformados e mantidos nas suas formas menos solúveis ou menos tóxicas. Já a solidificação, é uma forma de pré-tratamento que gera uma massa sólida monolítica de resíduo tratado. Ambos permitem melhorar as características físicas e de manuseio de resíduos, diminuem a área superficial através da qual poderia ocorrer transferência ou perda de poluentes, limitando a solubilização dos constituintes perigosos contidos no resíduo (ROCCA et al., 1993).

RHA et al. (2000) têm investigado os processos de estabilização e solidificação, através da avaliação da estabilidade química de íons de cromo e chumbo em pastas de escória

endurecidas. A estabilidade física de pastas endurecidas, contendo substituição parcial de escória por cinza volante e gesso também foi examinada. Para o estudo, estes metais, em forma de sais ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ e $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$), foram dissolvidos separadamente na água de mistura das pastas de escória, escória + cinza volante e escória + gesso, na proporção de 5% em massa. Silicato de sódio (Na_2SiO_3), 5% sobre a massa de escória, foi usado como um ativador na hidratação da escória. Os resultados mostraram que os íons de chumbo foram estabilizados, através do encapsulamento físico na matriz hidratada das pastas de escória. Também ocorreu a estabilização do cromo.

RHA et al. (2000) também examinaram a influência de metais pesados (íons de cromo e chumbo), na hidratação da escória granulada de alto-forno. Observaram que os íons chumbo retardam o início de hidratação da escória, tendo iniciado após 50 horas. Este fenômeno foi atribuído, pelos autores, à precipitação do chumbo em forma de sais de baixa solubilidade sobre as partículas de escória, formando um filme impermeabilizante que funcionou como uma barreira entre as partículas de escória e a água. Contudo, este efeito de retardamento da hidratação da escória não foi observado no caso do cromo.

A avaliação de um procedimento, aprovado e harmonizado melhora as condições prévias de utilização de um subproduto. Sendo assim, as incertezas sobre os impactos ambientais e métodos adequados de investigação podem ser reduzidas (MROUCH e WAHLSTRÖM, 2002).

Além de uma avaliação ambiental precisa, também é necessário conhecer a durabilidade do novo produto confeccionado com resíduos industriais. Isto pode ser alcançado pela investigação dos mecanismos e fatores de degradação deste novo produto. Durabilidade é muito importante porque afeta simultaneamente desempenho econômico e ambiental. É indispensável considerar que as mudanças químicas e físicas, que são resultado dos processos de degradação, podem afetar o comportamento ambiental e desempenho no que diz respeito à lixiviação do resíduo (JOHN e ZORDAN, 2001).

3 RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO

Embora a indústria da fundição contribua para a limpeza de ambientes consumindo as mais diversas sucatas metálicas, por outro lado gera apreciável volume de resíduos sólidos não-metálicos (MARIOTTO, 2000).

Segundo MORAES (2002), os principais resíduos sólidos gerados no processo de fundição são a areia de fundição; escória de fundição; pó de exaustão da preparação da areia, da desmoldagem, do forno de fusão, da limpeza de peças e da usinagem; lama do tratamento da água de refrigeração e cavaco da usinagem. Normalmente a areia de fundição é gerada em maior quantidade nas fundições, representando, segundo MORAES (2002), mais de 90% do volume de resíduos gerado numa fundição. Esta estimativa é confirmada por ARANZABAL et al (1999), ao afirmarem que a areia de fundição representa grande montante (aproximadamente 90%) dos resíduos sólidos gerados por fundições. Já para LEIDEL (1996), a areia constitui 60-80% de resíduos sólidos de toda a operação das fundições.

A areia de fundição, juntamente com a escória de fundição, são os principais resíduos gerados na indústria de fundição.

3.1 AREIA DE FUNDIÇÃO

Nas fundições, de uma maneira geral, a areia é consumida em grandes quantidades para a produção de moldes e machos (SILVA et al., 1999). Segundo WATANABE et al. (2002), a moldagem em areia é o método de moldagem mais utilizado em todo o mundo para a produção de peças fundidas, onde provavelmente mais de 80% das peças fundidas produzidas utilizam moldes feitos de areia aglomerada. Conforme os autores, o aglomerante mais comum é a argila, utilizada em areias aglomerantes, sendo empregadas para confeccionar moldes, que dão forma às faces externas de peças fundidas.

A disposição da areia de fundição, (tratada como resíduo pela empresa geradora) em aterros monitorados, representa à fundição custos de descarte e gastos com insumos. Além disso, o limitado espaço para disposição da areia de fundição em pilhas e aterros, somado às exigências da legislação ambiental, também contribuíram para aumentar os custos das fundições (ARANZABAL et al., 1999; KAUFFMANN et al., 1998; SILVA et al., 1999). Conforme ARANZABAL et al. (1999), o elevado rigor da legislação ambiental tem incrementado custos de disposição de resíduos de fundição na Espanha e em todos os países

da Europa. Também no Brasil, segundo MARIOTTO (2000), o rigor da legislação ambiental não constitui exceção à regra.

Dessa forma a redução de custos relativos à compra de matéria-prima, insumos, descarte, tratamento de resíduos, monitoramento e transporte passam a ter significativa importância para as empresas de fundição. Alternativas ambientalmente mais adequadas de gerenciamento dos excedentes de areia usada passam a ser economicamente viáveis (SILVA et al., 1999; MARIOTTO, 2000). Dentro deste contexto, encontram-se diferentes possibilidades de redução do volume de areia, por meio da minimização e técnicas de recuperação e regeneração dentro da própria fundição, ou uso de subprodutos em outros setores das indústrias, como construção civil.

O processo de recuperação envolve separação metálica, peneiramento e classificação granulométrica, enquanto que o processo de regeneração consiste basicamente na limpeza superficial dos grãos da areia de fundição, removendo-se as substâncias aderentes, de forma mecânica (atrição), térmica (queima de compostos aderidos ou reagidos a areia como resinas fenólicas), ou a combinação de ambos (MORAES, 2002). Através do processo de regeneração pode-se reconduzir a areia usada à condição de nova, permitindo seu uso no processo, sem perda de qualidade dos moldes ou machos produzidos (MARIOTTO, 2000).

O adequado controle do processo e administração do circuito de areia, geralmente com pequeno ou nenhum custo associado, podem conferir às fundições, além de economia com gastos, a redução da quantidade de resíduos gerados (LEIDEL, 1996; ARANZABAL et al., 1999).

Apesar da minimização, recuperação e regeneração da areia de fundição permitem grandes benefícios para a indústria da fundição, MARIOTTO (2000) afirma que a utilização externa de areia de fundição, através da reciclagem, parece ser a única alternativa viável para eliminação de passivos ambientais já acumulados nas empresas. O benefício dos subprodutos da fundição é uma alternativa para o depósito em pilhas e administração dos mesmos (THOMAS, 1996). Dessa forma, estudos visando a reciclagem deste resíduo também assumem grande importância.

SILVA et al. (1999), em estudo desenvolvido, através de experimentos industriais realizados na CSN (Companhia Siderúrgica Nacional), mostram a viabilidade de reciclagem da areia de fundição na cobertura dos canais de corrida dos alto-fornos. Segundo os autores,

normalmente usa-se uma mistura de areia lavada e argila (1:3) para recobrir estes canais. O material de cobertura tem por finalidade facilitar a remoção e limpeza do gusa projetado no início do vazamento da corrida, devendo apresentar elevada refratariedade, capaz de impedir a aderência do gusa à borda do canal.

Além disso, a possibilidade de uso da areia de fundição na indústria da construção civil, como em concreto, cimento, asfalto, agregados de construção, aterros, representa excelente alternativa de reciclagem deste resíduo (KAUFFMANN et al., 1998; LEIDEL, 1996, THOMAS, 1996; REGAN et al., 1998; ARANZABAL et al., 1999).

REGAN et al. (1998) apontam o uso da areia de fundição como fonte de sílica em cimento Portland. Segundo estes autores, a sílica é um ingrediente importante na composição do cimento, visto que o cimento Portland é composto essencialmente de silicatos de cálcio. Como a areia de fundição possui grande quantidade de sílica, torna-se, dessa maneira, uma matéria-prima potencial para uso na fabricação de cimento Portland. No entanto, para esta aplicação, a areia de fundição deve satisfazer exigências no que diz respeito à consistência das propriedades químicas e físicas, nível de álcalis menor que 0,1%, consistente distribuição do tamanho das partículas ao longo do tempo e conteúdo de sílica superior a 80%, em massa.

Na Espanha, ARANZABAL et al. (1999) realizaram estudos experimentais, avaliando o uso de areia de fundição como agregado em concreto, mistura asfáltica, e produção de cimento. A areia de fundição quando utilizado no concreto como agregado apresentou bom comportamento, ajustando-se para curvas específicas, tais como parábola de Fuller. Nesta aplicação (agregado em concreto), o experimento constituiu-se de diferentes misturas, variando entre 10 e 50% de substituição da areia natural em concretos por areia de fundição. Os testes de resistência à compressão, resistência à tração, permeabilidade e densidade realizados apresentaram resultados semelhantes quando comparados com o concreto referência, confirmando a possibilidade do uso de areia de fundição como substituição parcial de agregados naturais na produção de concreto. Entretanto, ARANZABAL et al. (1999) destacam que as areias de fundição com elevado conteúdo de bentonita costumam ser rejeitadas para aplicação em concreto, bem como, areias de fundição que não cumprem prescrições referente ao conteúdo de material orgânico e estabilidade de sulfatos também têm sido recusadas.

Em mistura asfáltica, a areia de fundição apresentou bons resultados para substituição de até 10% de areia natural por areia de fundição (ARANZABAL et al., 1999). Na produção

de cimento, a composição química da areia de fundição permite que seja usada como material alternativo para substituição parcial do clínquer, material tradicional na produção de cimento. Contudo cuidados especiais devem ser adotados para eliminar a presença de contaminações na areia de fundição, evitando problemas durante o processo de fabricação do cimento (ARANZABAL et al., 1999).

WATANABE et al. (2002) avaliaram a utilização de areia de fundição como matéria-prima na fabricação de blocos de concreto (utilizados em pavimentação), como substituição da areia comum. Neste trabalho, os autores moldaram corpos-de-prova de pavimento utilizando quatro diferentes teores de substituição da areia comum por areia de fundição: 25%, 50%, 75% e 100%, além da moldagem de corpos-de-prova referência (sem substituição da areia comum). Através de testes de resistência à compressão e avaliação microestrutural do concreto, observaram que é possível utilizar teor de 25% de substituição de areia comum por areia de fundição. Também observaram que devido à presença de argila bentonita, os maiores teores de substituição apresentaram queda significativa de resistência pela falta de hidratação do cimento, causada pela retenção de água por parte desta argila. Verificaram, que embora também exista contaminação por argila bentonita na areia de fundição utilizada no teor 25% de substituição da areia comum, esta argila está presente em menor quantidade, sem chegar ao ponto de prejudicar significativamente a hidratação da pasta de cimento.

Os autores ainda sugerem que para tornar possível a utilização de teores de substituição maiores é necessária a elaboração de um estudo de beneficiamento da areia de fundição, visando eliminar as argilas bentonitas que retêm água, hidratam e provocam o aparecimento de vazios, contribuindo para a formação de planos preferenciais de ruptura e falhas na aderência entre a pasta de cimento e o agregado.

É importante observar que o pré-tratamento da areia de fundição poderá ser necessário para qualificá-la como matéria-prima para vários tipos de aplicações. Cuidadoso planejamento e efetiva implementação, além de qualidade e controle das técnicas e teste próprios, garantirão a consistência deste material (areia de fundição) para cada uso específico (THOMAS, 1996; ARANZABAL et al., 1999).

3.2 ESCÓRIA DE FUNDIÇÃO

A escória de fundição é um resíduo gerado no processo de fusão de sucatas de ferro fundido e ferro-gusa, para a fabricação de peças de ferro fundido com propriedades metalúrgicas e dimensões definidas, via forno cubilô.

De acordo com LÚCIO (1981), a escória pode ser definida como sendo um banho líquido homogêneo de um ou mais compostos químicos de vários óxidos, que durante o processo pirometalúrgico de fusão, separa-se da fase metálica por ser insolúvel e de menor densidade.

Durante o vazamento da escória, esta pode ser resfriada rapidamente, com jato d'água por exemplo, desintegrando-se em pequenas partículas como uma areia grossa, sendo portanto denominada *escória granulada* (AÏTCIN, 2000). A partir desta definição, a escória de fundição resultante do processo de resfriamento brusco pode ser denominada *escória granulada de fundição (EGF)*.

Segundo UEHARA e SAKURAI (1996), a escória obtida em fornos de fusão de ferro fundido, resultante de resfriamento brusco, é um material amorfo (vítreo), normalmente tratado como um resíduo industrial.

A escória granulada de fundição é friável, o que permite a obtenção de partículas finas com tempos razoáveis de moagem. Esta escória consiste em um rejeito industrial da indústria metalúrgica que é descartado na natureza, tornando-se um problema ambiental, com volumes descartados bastante significativos (MIRANDA et al., 1998).

Entre as vantagens de resfriar bruscamente a escória, submetendo-a a um fluxo contínuo de água estão a melhora nas condições de trabalho, fácil recuperação de metal, simplificação das condições de disposição e até mesmo, produção de um produto que pode ser vendido. O sistema de resfriamento da escória de fundição é simples, necessitando de um canal com volume suficiente de água corrente para permitir a obtenção de uma escória de pequenas partículas (MEYST, 1984).

3.2.1 O Forno Cubilô

O equipamento clássico de produção de ferro fundido cinzento é o forno cubilô. O forno cubilô é um equipamento de fusão empregado para a produção de ferros fundidos, por meio

da refusão de materiais metálicos ferrosos. Seu funcionamento é baseado no princípio de contra-corrente, ou seja, a carga metálica (normalmente sucata de ferro fundido, ferro-gusa, retorno) e o combustível (normalmente coque) possuem um fluxo contrário ao do comburente (oxigênio do ar) (PIESKE et al., 1980).

Para EDGE (1984), a fusão de ferro em forno cubilô é um processo de transferência de calor do combustível, usualmente o coque, para os materiais de carga. O ar é insuflado no cubilô com a finalidade de fornecer o oxigênio necessário para a combustão do coque.

Segundo PIESKE et al., (1980), as matérias-primas normalmente utilizadas para fusão em forno cubilô (carga) são o coque (combustível), gusa, sucata de aço, ferro-ligas e calcário. A adição de calcário forma CaO e promove abaixamento na temperatura de fusão da escória primária (formada pela escorificação da cinza do coque, partículas de refratário, óxidos e areia de retorno), garantindo boa condução metalúrgica do forno, principalmente no que se refere à fluidez da escória e ação desta na retirada do enxofre (dessulfuração) e fósforo (desfosforação) do banho metálico. Uma eficiente dessulfuração é possível com escórias de elevada basicidade, ou seja, ricas em CaO, o que no entanto, não é recomendável em cubilô de revestimento ácido.

O carregamento do cubilô é iniciado com a formação do pé de coque (coluna de coque que serve de suporte para as cargas) junto à soleira do cadinho (fundo do cadinho), sendo posteriormente introduzido mais coque (coque de fusão), juntamente com a carga metálica, em porções menores, para substituir o que foi consumido do coque inicial.

A Figura 3.1 mostra a representação esquemática das partes constituintes do forno cubilô. Através da *porta de carga* as matérias-primas são introduzidas no forno cubilô, sendo que a passagem do ar (responsável pela combustão do coque) ocorre por orifícios denominados *ventaneiras*. Pela *bica de sangria* o banho metálico jorra para o exterior do forno, sendo através da *bica de sangria da escória* (situada 10 a 15 cm abaixo do plano inferior das ventaneiras) a retirada da escória. A chaminé, prolongamento da cuba, tem função de levar gases para fora do ambiente da fundição (PIESKE et al., 1980).

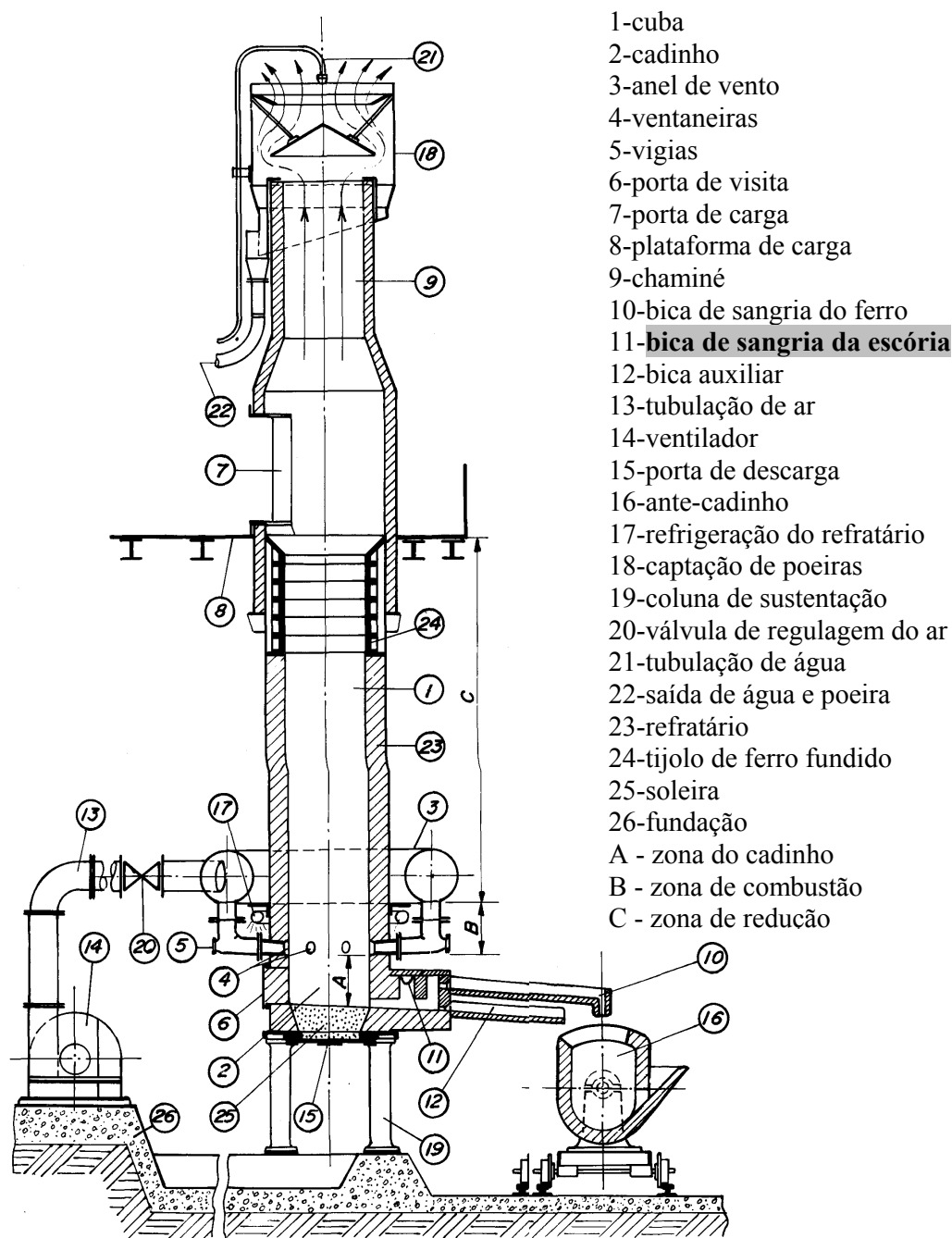


Figura 3.1 Desenho esquemático de forno cubilô a ar frio (PIESKE et al., 1980)

No cubilô, na região logo acima do cadinho chamada *zona de combustão*, ocorre processo intenso de combustão, através da oxidação do coque efetuada pelo oxigênio do ar soprado. Esta zona apresenta elevada concentração de gases oxidantes, onde ocorre oxidação do silício e do manganês. Esta oxidação é acompanhada pela liberação adicional de calor, superaquecendo o ferro fundido que goteja no cadinho. Acima da *zona de combustão* está situada a *zona de redução*, onde ocorre, pela ação do coque, a redução do dióxido de carbono

(CO₂) para monóxido de carbono (CO), acompanhada de queda de temperatura. Na *zona de redução*, em geral, a fusão da carga metálica inicia e termina (PIESKE et al., 1980).

Conforme MAHAN (1984), o forno cubilô ácido é mais simples e mais econômico para operar, devido a menor complexidade e volume de escória, e inferior custo do refratário. No entanto, a principal limitação é a ineficiência na remoção de fósforo e enxofre do ferro, visto que para a eliminação destes, presume-se que exista escória básica. Dessa forma, em forno cubilô ácido deve existir maior controle na qualidade dos materiais da carga, para reduzir a presença destes elementos (fósforo e enxofre).

Quanto ao revestimento dos fornos cubilô, segundo PIESKE et al. (1980), para que os tijolos refratários apresentem resistência adequada à ação das escórias ácidas, normalmente empregam-se tijolos sílico-aluminosos, com aproximadamente 60% SiO₂ e 40% de Al₂O₃.

Conforme SCHULSTROM (1984), a composição do ferro fundido produzido em forno cubilô é determinado pela composição dos materiais de carga e o efeito das variáveis operacionais.

A faixa de temperatura normalmente atingida em fornos cubilô é da ordem de 1450 - 1530°C para condições de fusão ótimas. A sangria da primeira escória é realizada aproximadamente uma hora e meia após o início do sopro. A operação de sangria deve ser imediatamente interrompida, assim que se percebe saída de escória juntamente com o ferro fundido. As retiradas subsequentes, geralmente, são efetuadas de hora em hora. Em cubilô, teores de carbono abaixo de 2,8% são difíceis de serem atingidos (PIESKE et al., 1980).

3.2.2 Produção de Ferro Fundido e Geração de Escória de Fundição

A fundição pertence ao grupo dos mais importantes setores da indústria como um fornecedor de componentes para quase todos os ramos industriais produzirem produtos finais. A tendência da evolução mundial na produção de fundidos nos anos 1990 a 1998, conforme os principais tipos de metais fundidos, mostra que o volume de produção de fundidos em toneladas está crescendo, sendo este crescimento bastante acentuado em países altamente desenvolvidos, como Estados Unidos e países membros da Comunidade Européia (TYBULCZUK, 2002).

De acordo com dados de 40 países, em 1998 o total de fundidos produzidos foi de aproximadamente 65,2 milhões de toneladas, com os fundidos de ferro cinzento respondendo por mais de 53%, os fundidos de ferro nodular com quase 21%, os fundidos de aço com 10% e os fundidos de ferro maleável com menos de 2% (TYBULCZUK, 2002), sendo que os 14% restantes provavelmente correspondam aos metais não ferrosos (cobre, zinco, alumínio, magnésio). A Figura 3.2 apresenta dados da produção mundial de fundidos de 1998, observando-se que neste ano o Brasil ocupava a décima posição em termos de produção global de fundidos.

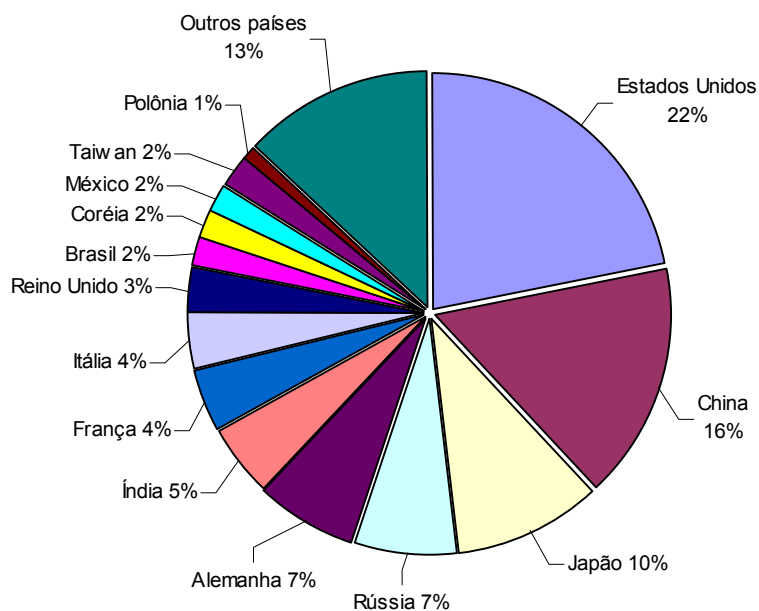


Figura 3.2 Participação dos principais produtores de fundidos na produção mundial de 1998 (TYBULCZUK, 2002)

A taxa de escória de fundição gerada pode variar muito dependendo da quantidade de calcário e outros materiais da carga, bem como da qualidade destes materiais da carga (impurezas, areia). Em geral, a soma de escória gerada varia entre 5% (boa acidez) e 15% (operação altamente básica) sobre a carga metálica (MEYST, 1984).

Dessa forma, em função de não existirem dados estatísticos sobre geração de escórias provenientes da fundição, estimando-se aproximadamente 10% em relação à massa de ferro fundido produzido, poderia-se ter uma geração mundial em torno de 6,52 milhões de toneladas de escória de fundição no ano de 1998.

No Brasil, segundo dados apresentados pelo presidente da Associação Brasileira de Fundição (ABIFA), José Aoad Raya, ao representar o Brasil no Primeiro Fórum Internacional

sobre mercados de Fundição no Século 21, realizado em setembro de 2000, na França (onde reuniram-se os principais representantes de países da indústria de fundição de todo o mundo, entre eles, Estados Unidos, China, países europeus, Japão e Brasil), afirmou que houve um crescimento significativo na produção de peças fundidas no Brasil, passando de 1,5 milhão de toneladas para uma projeção de 1,8 milhão de toneladas de peças fundidas no ano de 2000, conforme apresentado na Figura 3.3 (KANICKI, 2001).

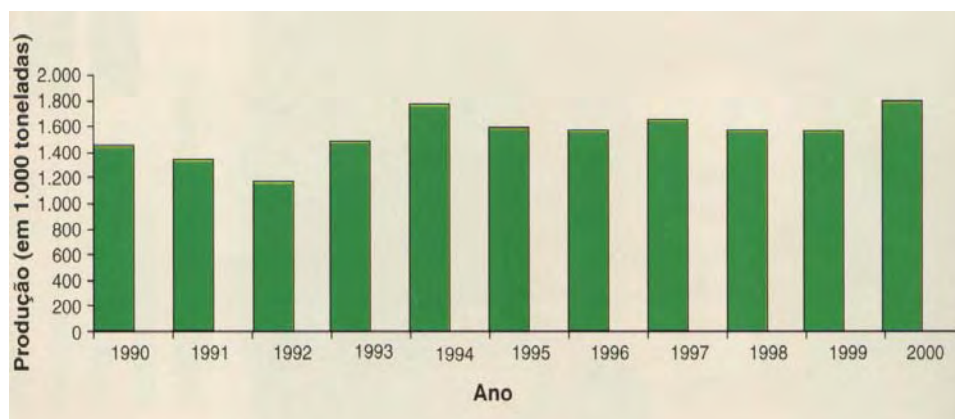


Figura 3.3 Produção de peças fundidas no Brasil (KANICKI, 2001)

Dessa forma, se fosse feita a mesma estimativa anterior, considerando uma taxa de geração de escória de fundição em torno de 10%, em relação à massa de ferro fundido produzido, teria-se um valor estimado de 180 mil toneladas de escória de fundição, geradas no Brasil somente no ano de 2000.

Ainda, segundo o presidente da ABIFA, a indústria de fundição brasileira empregava 38000 trabalhadores, tendo um faturamento aproximado de 2,3 bilhões de dólares/ano, somente no ano de 2000, compreendendo quase 1000 empresas, a maioria das quais pertencentes a brasileiros (KANICKI, 2001).

Quanto à distribuição nacional da produção de fundidos, destacam-se São Paulo, respondendo por aproximadamente 35,3% da produção nacional de fundidos (em relação ao mês de novembro de 2002, onde o Brasil produziu 174.706,0 toneladas de peças fundidas), seguido por Minas Gerais com 29,8%, pelos Estados da região Sul com 26,4%, Rio de Janeiro (6,3%) e os Estados da região Norte com 2,2% (ABIFA, 2002).

Como pode ser observado na Figura 3.4, 50% dos fundidos manufaturados no Brasil são consumidos pela indústria automotiva, incluindo automóveis, ônibus e tratores. Além disso, também destacam-se outros clientes da indústria de fundição brasileira, dos quais, as

indústrias de bens de capital, siderúrgica e ferroviária. Estima-se que para 2004, a demanda doméstica e exportação de fundidos brasileiros totalizem 2,5 milhões de toneladas (KANICKI, 2001).

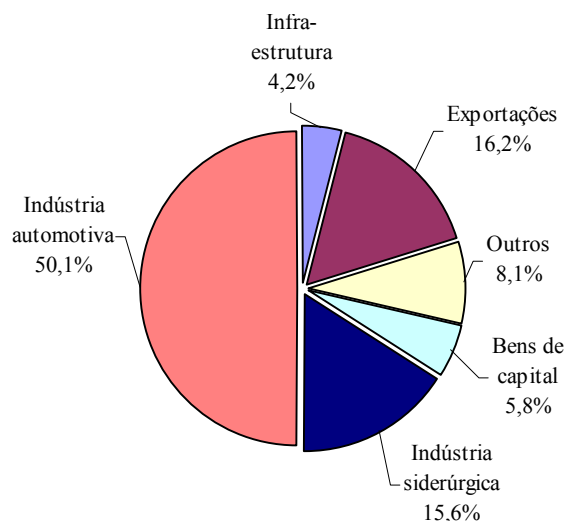


Figura 3.4 Distribuição das vendas de peças fundidas no Brasil, por indústria usuária final (KANICKI, 2001)

3.2.3 Constituição da Escória de Fundição

A escória de fundição é um resíduo da fundição formado por óxidos naturais da carga (como cinza do coque), impurezas presentes na carga metálica adicionada e refratário fundido. Os componentes da escória podem ser classificados de acordo com sua origem como adições intencionais (tais como calcário, dolomita, cinzas de coque), materiais oxidados (FeO , MnO , SiO_2 , etc) e adições não intencionais (como FeO , SiO_2 de areia e refratário fundido) (MAHAN, 1984).

Segundo MIRANDA et al. (1998), a escória proveniente da fusão de metais ferrosos em fornos de indução ou cubilô é rica em sílica (40-80%), entre outros óxidos como os de magnésio, alumínio e manganês.

Dessa forma, a escória de fundição é constituída basicamente de três componentes: Al_2O_3 (alumina), SiO_2 (sílica) e CaO (óxido de cálcio). A alumina (Al_2O_3) é proveniente do desgaste do refratário; a sílica (SiO_2) também do refratário, da areia aderente aos materiais da carga e da cinza do coque e o CaO provém da adição de calcário (PIESKE et al., 1980).

Segundo MAHAN (1984), as cinzas do coque e o refratário do forno, que fundem durante a operação, originam grande parte da escória de fundição. Em análises de cinzas de coque podem ser encontrados normalmente entre 50 a 55% de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) que varia entre 30 a 35%, conteúdo de óxido de ferro (Fe_2O_3) entre 6 a 10% e demais elementos como cálcio, magnésio, manganês e óxidos de titânio que estão presentes em quantidades menores.

Sendo assim, escórias de fundição ácidas, por exemplo, apresentam normalmente em sua composição entre 40 a 50% de SiO_2 , 10 a 20% de Al_2O_3 , 25 a 38% de CaO , 1 a 8% de FeO e 1 a 5% de MnO (MAHAN, 1984). Neste caso, percebe-se a forte influência da cinza do coque na composição destas escórias.

A natureza química e a fluidez da escória exercem grande influência sobre o banho metálico. Assim, o conhecimento das propriedades da escória, sua composição química, temperatura líquida e sólida, viscosidade, bem como o controle dos mesmos, é essencial para o adequado desempenho do cubilô e qualidade final do ferro fundido. A adição de materiais fluidizantes é benéfico, pois permite a redução da viscosidade e diminuição de temperatura, contribuindo para a eficiência da operação do cubilô (MAHAN, 1984).

3.2.4 Aplicação da Escória de Fundição

A escória de fundição ainda tem sido tratada como um resíduo pelas indústrias de fundição, sendo disposta em aterros, através de serviços prestados por empresas terceirizadas. Esta solução, além de significar aumento no custo de produção, também pode acarretar penas ambientais, quando da disposição inadequada do resíduo pelas empresas terceirizadas. Nos termos do art. 8º, §1º, do Decreto nº 38.356/98, que aprova o Regulamento da Lei nº 9.921/93, a qual dispõe sobre a gestão de resíduos sólidos no Estado do Rio Grande do Sul, no caso de contratação de terceiros, a empresa geradora responde solidariamente pelos prejuízos ambientais que o resíduo possa causar ao ambiente (HAUSEN et al., 2001). Além disso, conforme o art. 4º, §1º do mencionado Decreto, fica vedada a descarga ou depósito, de forma indiscriminada, de resíduos sólidos no solo e em corpos d'água.

O potencial da escória granulada de fundição (EGF) pouco tem sido explorado até então, através de estudos sobre a aplicação mais nobre deste resíduo, avaliando-se a adequação ao uso proposto.

No Japão, UEHARA e SAKURAI (1996), em estudos realizados com escória de fundição, constataram através de análises químicas, que esta apresenta estrutura semelhante a gelenita ($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$), conhecida como um material inibidor de difusão no campo de metais de corte. A partir desta verificação, estudaram a possibilidade do uso da escória de fundição como pó para auxiliar no corte de metais. Através de testes realizados em corte de metais, conforme pode ser observado na Figura 3.5 (onde F_c provavelmente seja a força normal de corte e F_t a força transversal de corte), verificaram que a força de corte é diminuída quando usa-se pó de escória de fundição, apresentando comportamento semelhante à gelenita e funcionando como lubrificante no corte do aço. Dessa forma, a escória de fundição mostrou-se como um material alternativo da gelenita no corte de metais.

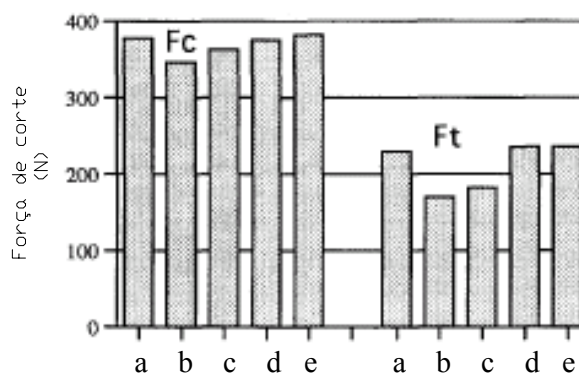


Figura 3.5 Desempenho mecânico de materiais empregados como lubrificantes no corte de metais (a =sem lubrificante; b =pó de escória; c =pó de zinco; d =pó de cobre; e = $\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$), (UEHARA e SAKURAI, 1996)

MIRANDA et al. (1998) realizaram estudo sobre a utilização de escória de cubilô como matéria-prima em massas para cerâmica branca (porcelana), utilizando percentuais de adição entre 15 a 45%. Além disso, foram preparadas mais duas misturas, uma referência, sem escória (quartzo, feldspato, argila e caulim) e outra com escória substituindo o quartzo (escória, feldspato, argila e caulim). Neste estudo, a escória de cubilô foi primeiramente moída, em moinho de bolas, via úmida, com tempo de moagem de 10 horas. A escória moída, seca em estufa a $45\text{-}50^\circ\text{C}$ por 24 horas e peneirada em malha de 0,5 mm, foi utilizada na confecção de corpos-de-prova, os quais, após sinterização, foram caracterizados física e mecanicamente. A mistura da massa que substituiu o quartzo por escória na composição obteve os melhores resultados, com maior valor de resistência à compressão e o menor valor de absorção de umidade, além de apresentar uma coloração clara de tom pastel. Os autores concluíram assim, que a escória de cubilô é potencialmente viável como matéria-prima para a

indústria cerâmica, principalmente para cerâmicas que não exigem padronagens de cor muito claras.

Contudo, muito ainda se tem a explorar quanto às possibilidades de reciclagem da escória de fundição, sendo a construção civil, um campo de aplicação interessante devido à vasta possibilidade de opções que oferece, em função da variedade e volume de materiais que absorve.

4 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A reciclagem de resíduos sólidos industriais tem sido fundamental na busca pelo desenvolvimento sustentável, possibilitando a preservação de recursos naturais não renováveis, através da substituição destes por materiais alternativos, com propriedades adequadas ao uso. JOHN (2000) afirma que a reciclagem é essencial para o desenvolvimento sustentável, uma vez que é impossível pensar em uma sociedade que não gere resíduos. Sendo assim, 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.

Dentro deste contexto tem-se a reciclagem de escórias como matéria-prima na construção civil, podendo apresentar excelente desempenho técnico e econômico, além da importância ambiental, quando adequadamente empregadas.

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

- base e sub-base de pavimentos;
- lastro de ferrovias;
- agregado graúdo em revestimento asfáltico;
- material de aterro;
- agregados no concreto;
- adição na produção de peças pré-moldadas de argamassa;
- matéria-prima para a indústria cerâmica (MIRANDA et al., 1998);
- matéria-prima na produção de cimento ou substituição parcial do cimento em concretos.

Contudo, propriedades técnicas e características ambientais das escórias não são sempre adequadas e podem algumas vezes limitar seu uso. Isto explica porque considerável parte das escórias geradas na produção mundial de aço são, até hoje, depositadas em extensas pilhas. Parâmetros importantes devem ser avaliados quando utiliza-se a escória como um material comercial (VIKLUND et al., 1999), quais sejam:

- presença de óxidos de cálcio e magnésio livres causando instabilidade volumétrica;

- produtos da desintegração do silicato dicálcico (C_2S);
- a necessidade de um comércio local devido à competição com os agregados naturais;
- conteúdo de óxido de ferro (potencial de oxidação do ferro no produto final).

JOHN e ZORDAN (2001) sugerem que na escolha da aplicação conferida aos resíduos industriais, como primeira aproximação, a situação ideal é o uso do resíduo sem qualquer transformação industrial. Como exemplo, ilustram a reciclagem de escória granulada de alto-forno, ou cinza volante no concreto, sendo atualmente muito mais do que uma alternativa de redução de custos, mas também uma forma de melhorar o desempenho, incluindo durabilidade e redução do impacto ambiental do concreto. Os autores ainda salientam que é pertinente a avaliação da regulamentação legal dos resíduos, destinação, bem como todos os custos associados. A avaliação do total de custos de um resíduo normalmente é um bom caminho para calcular o interesse por sua reciclagem.

A melhor aplicação escolhida para um resíduo é aquela que usa suas características e propriedades para aumentar o desempenho do novo produto e minimizar os riscos ambientais e de saúde (JOHN e ZORDAN, 2001).

Neste capítulo, apresenta-se um apanhado geral do que tem sido pesquisado sobre o uso de diferentes escórias na construção civil. Cabe salientar que a maior parte das pesquisas sobre utilização de escórias na construção civil concentram seus estudos na escória de alto-forno e escória de aciaria do setor siderúrgico, devido aos maiores volumes gerados destas quando comparados com a escória de fundição. Desta forma, optou-se por fazer um levantamento destas aplicações propostas visando avaliá-las como possibilidade de aplicação no caso de EGF.

Sendo assim, apresenta-se na Figura 4.1, de forma simplificada, a representação esquemática da geração de escórias de alto-forno e aciaria, durante os processos de produção do aço, bem como da geração de escória de fundição, a fim de facilitar o entendimento da diferença entre ambas.

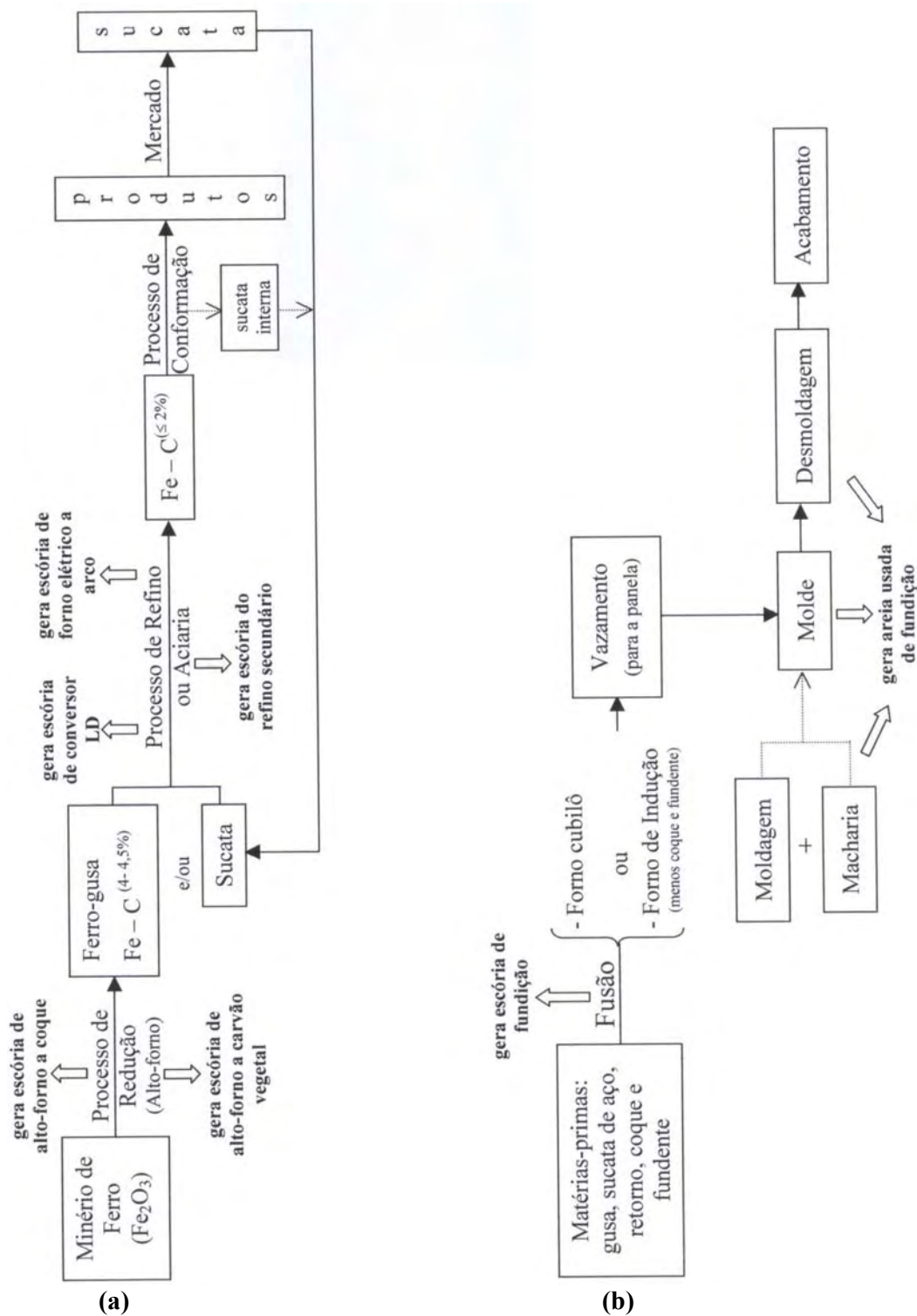


Figura 4.1 Representação esquemática simplificada **a)** geração de escórias de alto-forno e aciaria, durante os processos de produção do aço (VILELA, 2001)¹ **b)** geração de escória de fundição (MORAES, 2002)²

¹ Notas de aula. Disciplina de Fundamentos da Fabricação do Aço.

² Notas de aula. Disciplina de Fundição.

4.1 MATÉRIA-PRIMA NA PRODUÇÃO DE CIMENTO OU SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO EM CONCRETO

A utilização de escória granulada de alto-forno como matéria-prima na fabricação do cimento já é uma prática consagrada, sendo no Brasil comercializado o cimento Portland de alto-forno - CP III (NBR 5735/1991), onde mistura-se ao clínquer proporções entre 35 a 70% de escória granulada de alto-forno. Também pode-se moer juntamente com o clínquer, proporções entre 6 a 34% de escória granulada de alto-forno, constituindo-se assim, o cimento Portland composto com escória - CP II-E (NBR 11578/1991).

As demais escórias, ao contrário da escória de alto-forno, não recebem o mesmo destino, e ainda devem passar por uma criteriosa avaliação, desde suas propriedades químicas, características ambientais, bem como de durabilidade e desempenho em uso.

A substituição parcial do clínquer na produção do cimento por materiais recicláveis permite excelentes vantagens econômicas e energéticas como (MURPHY, 1997; XUEQUAN et al., 1999; SHI e QIAN, 2000):

- *menor impacto ambiental na fabricação do cimento*, com a diminuição da formação de gases, especialmente o CO₂, nocivo à atmosfera;
- *economia de energia* devido à redução do calor de formação do clínquer;
- *preservação de recursos naturais*, qualificando-se como uma prática sustentável.

A produção de cimento envolve moagem de matérias-primas, calcinação destas matérias-primas a 1500°C e moagem do clínquer e gesso (SHI e QIAN, 2000). É um processo de consumo intenso de energia, visto que o processo de queima na produção do cimento representa tipicamente 40% a 60% do custo de produção, enquanto a extração de matéria-prima representa 10% do custo total do cimento (NEVILLE, 1997).

Estes fatores ambientais negativos resultantes do processo de fabricação do cimento (substancial geração de CO₂, intenso consumo de energia), deveriam ser amenizados pela simples redução do total de matérias-primas usadas na clinquerização. Conforme MURPHY et al. (1997), a geração de escória é de aproximadamente 10% sobre a taxa de produção de clínquer. A adição de escória no clínquer durante a fabricação do cimento, na razão 1:10, poderia efetivamente, significar a reciclagem de todo este subproduto da fabricação do aço, enquanto que a redução do fluxo de clínquer seria de aproximadamente 10%.

Segundo SHI e QIAN (2000), escórias de alto-forno, escórias de aciaria e escórias de cobre, resfriadas rapidamente ou bruscamente, têm propriedades cimentícias e/ou pozolânicas. Para o uso destes materiais cimentantes é necessário apenas moagem, o que proporciona substancial economia de energia quando comparado com a produção de cimento Portland. Por exemplo, a energia requerida para moagem de escórias metalúrgicas é somente 10% do total de energia requerida para a produção de cimento Portland.

Ao se adicionar materiais recicláveis e com propriedades pozolânicas e/ou cimentantes adequadas no final do processo de fabricação do cimento, elimina-se a etapa de queima deste material utilizado, representando significativa economia de energia e redução de impacto ambiental.

Dessa forma, pode-se destacar duas diferentes formas de incorporar escória de aciaria na produção de cimento. A primeira envolve a simples substituição de matéria-prima misturada com calcário e argila, no início do processo de fabricação do cimento. Neste caso, como a escória deve ser clínquerizada, não existe economia de energia e nenhum benefício econômico direto, pois um material barato é substituído por outro. Um caminho mais atraente envolve a incorporação de escória no final do processo de fabricação do cimento, com a mistura desta escória com clínquer, gesso e, até mesmo, escória de alto-forno. Estes cimentos misturados têm uma clara vantagem econômica, devido à substancial economia nos custos de energia que podem ser alcançados (MURPHY et al., 1997). Observa-se que este procedimento torna-se possível, desde que estas escórias apresentem natureza cimentícia, e consistam principalmente de cal e silicatos de cálcio (constituintes do cimento Portland).

Entretanto MURPHY et al. (1997) salientam que a grande variabilidade na composição química das escórias tem causado dificuldade em assegurar qualidade ao produto final, sendo por isso que a escória é predominantemente usada como uma matéria-prima secundária na fabricação de cimento Portland. Além disso, cimentos contendo grandes porcentagens de escória, normalmente apresentam acréscimo lento de resistência nas primeiras idades, devido ao baixo calor de hidratação, quando comparado com o cimento Portland comum. Em contrapartida, em relação ao cimento Portland, cimentos com escória de alto-forno têm mostrado ganhos de resistência em idades avançadas, melhora na resistência química e redução da difusão de cloretos.

MEHTA e MONTEIRO (1994) afirmam que o descarte destes subprodutos recicláveis (como as escórias) como agregado para concreto e em subleito de rodovias é um

aproveitamento menos nobre, que não utiliza o potencial destes materiais pozolânicos e cimentantes. Desta forma, utilizá-los na fabricação do cimento ou substituir parte do cimento na produção de concretos constituem aplicações mais nobres, sendo atrativo do ponto de vista econômico, uma vez que o preço dos materiais cimentícios suplementares é mais baixo do que o cimento (AÏTCIN, 2000).

JOHN e ZORDAN (2001) destacam que para um resíduo ser considerado adequado na reciclagem como material cimentício ou pozolânico deve:

- ser solúvel em água;
- ter Ca, Si, Al, como elementos predominantes;
- estar presente na forma granular, preferencialmente com elevada superfície específica;
- ter preferencialmente elevado conteúdo vítreo.

Dessa forma, estudos têm sido desenvolvidos para determinar se a escória de aciaria pode ser processada como material cimentício, para permitir sua reciclagem como adição ao clínquer do cimento Portland comum. MURPHY et al. (1997) observaram que com controle das condições de geração da escória e de sua taxa de resfriamento, a natureza cimentícia deste material é melhorada. Sendo assim, analisaram misturas variadas de escória granulada com o cimento Portland, verificando que a resistência e o desempenho do material não foram afetados, com misturas de até 20 % em peso de escória com cimento Portland.

Segundo NEVILLE (1997), a incorporação de escória de alto-forno ao concreto, melhora a resistência à penetração de íons cloretos e de sulfatos, além de reduzir a permeabilidade em concretos e argamassas. Os efeitos benéficos da escória de alto-forno são devidos à microestrutura mais densa da pasta de cimento hidratada, onde mais espaços de poros são preenchidos com C-S-H (refinamento dos poros) do que no caso do cimento Portland sem adições. MEHTA e MONTEIRO (1994) também afirmam que este melhoramento das propriedades do concreto em termos de resistência à penetração de íons cloretos e de sulfatos (quando da incorporação de adições minerais, como no caso da escória de alto-forno), deve-se principalmente à reação pozolânica, a qual é acompanhada por uma redução da permeabilidade bem como no teor de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) da pasta de cimento hidratada. Quanto à carbonatação, embora a profundidade de carbonatação seja maior nas primeiras idades de concretos com escória de alto-forno do que em concretos com cimento Portland sem adições, a baixa permeabilidade de concretos com escória de alto-forno quando bem curados, impede o aumento continuado da frente de carbonatação, reduzindo

risco de corrosão da armadura devido à redução da alcalinidade da pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 1997).

Em pesquisa realizada por MONSHI e ASGARANI (1999), escórias de alto-forno e de aciaria, após separação magnética foram misturadas com calcário de seis diferentes composições. Estes materiais foram aquecidos em um forno rotativo até 1530°C por 1 hora, sendo posteriormente, o clínquer resfriado, moído e misturado com 3% de gesso, atingindo uma finura maior que 3300 cm²/g. Após medições de tempos de início e fim de pega, consistência de pastas, cal livre e resistência à compressão e tração aos 3, 7 e 28 dias de idade, observaram que as amostras com maior saturação de cal desenvolveram elevado conteúdo de C₃S e melhores propriedades mecânicas.

Na China cimentos de escória de aciaria têm sido desenvolvidos como um novo tipo de cimento a mais de duas décadas (DONGXUE, 1997):

- consiste em uma mistura de clínquer de cimento Portland, escória LD (proveniente do processo com conversores LD (*Lins-Donawitz*)), escória de alto-forno e gesso;
- este cimento apresentou bons resultados quanto à resistência a agentes nocivos como sulfatos, dióxido de carbono, água do mar e além de proporcionar redução da reação álcali-agregado;
- apresentou maior resistência em idades avançadas e expansão superficial. As desvantagens foram lento endurecimento e inferior resistência nas primeiras idades.

CERJAN-STEFANOVIC et al. (1997) utilizaram escória de aciaria misturada ao cimento, na proporção de 15% de adição. Os resultados do estudo mostraram que é possível o uso desta escória em cimento, apresentando resultados de resistência satisfatórios.

Um tipo de cimento misturando clínquer, escória de aciaria e cinza volante foi pesquisado por XUEQUAN et al. (1999). O desempenho foi avaliado, através da medição de tempo de pega, ensaios de resistência a sulfatos, carbonatação, avaliação da expansão através da reação álcali-agregado, bem como ensaios de resistência à compressão e tração em barras de argamassa. Os resultados mostraram que misturas de 50% cinza volante e escória de aciaria no cimento podem ser viáveis, contudo a carbonatação e resistência a sulfatos foi menor que na argamassa referência.

MASUERO (2001) avaliou a utilização de escória de aciaria elétrica resfriada bruscamente (ACIGRAN), como adição ao cimento (nos teores de substituição de 10, 30 e

50%, em volume), através da avaliação da resistência à compressão e durabilidade (carbonatação, resistência ao ataque de íons cloretos e por sulfato) de argamassas com ACIGRAN, obtendo desempenho igual ou superior em comparação as argamassas referência, com exceção da carbonatação. GUMIERI (2002) em pesquisa sobre utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos, constatou que argamassas compostas com escória granulada (escória de aciaria do processo LD, com teores de substituição de 6, 20 e 34%, em massa) e clínquer apresentaram níveis de resistência à compressão axial compatíveis com as especificações referentes ao cimento Portland composto.

O concreto de cimento Portland tem sido o material manufaturado mais utilizado na construção civil. Contudo, o impacto ambiental na produção de cimento suscita a necessidade de utilização de misturas minerais com propriedades cimentícias e/ou pozolânicas, como substituição parcial do cimento, visando minimizar o prejuízo ao meio ambiente. Segundo ALDEA et al. (2000), misturas minerais têm sido usadas cada vez mais no concreto, devido aos seus benefícios em termos de resistência e durabilidade. Dessa forma, estudaram concretos com substituição parcial do cimento por escória, com teores de substituição de 25%, 50% e 75%, além do referência (sem substituição). Propriedades do concreto como resistências à compressão e à tração, microestrutura e penetração de cloretos foram avaliadas, bem como diferentes condições de cura. A penetração de cloretos diminuiu significativamente com o acréscimo de substituição de cimento por escória. Concretos com 50% de substituição de cimento por escória obtiveram resistência similar ao concreto referência, com a vantagem de apresentarem menor penetração de cloretos.

Em estudos sobre o efeito da finura da cinza volante e escória granulada de alto-forno na resistência do concreto, TAN e PU (1998), observaram que a incorporação de 20% de cinza volante ou escória granulada de alto-forno podem aumentar significativamente a resistência à compressão do concreto após 3 dias de idade. A resistência à compressão do concreto incorporando a combinação de ambos materiais (cinza volante e escória granulada de alto-forno) foi superior quando comparado às resistências de cada material incorporado separadamente no concreto, e foi quantitativamente similar ao concreto com a incorporação de sílica ativa.

Objetivando avaliar a eficiência da utilização de materiais cimentícios suplementares, no caso de escórias granuladas de alto-forno, BABU e KUMAR, (2000), desenvolveram um projeto experimental, através da avaliação de vários níveis de substituição (entre 10 e 80% de substituição) de cimento por escória granulada de alto-forno, em concreto. Os materiais

cimentícios suplementares melhoram algumas características de desempenho do concreto, tais como resistência, trabalhabilidade, permeabilidade, durabilidade e resistência à corrosão. Também observaram que, o conteúdo vítreo e finura das escórias granuladas de alto-forno, influenciaram na eficiência destas como materiais pozolânicos e cimentícios e na reatividade em composições de concretos.

COLLINS e SANJAYAN (1999) enfatizam que a maior vantagem da utilização de escória como material cimentício suplementar, na substituição de parte do cimento em concreto é a superior durabilidade e baixa temperatura de hidratação, quando comparado com concretos desenvolvidos somente com cimento. Contudo, o lento desenvolvimento da resistência dos concretos com escória nas primeiras idades, pode limitar as aplicações destes concretos.

Normalmente na elaboração de concretos de elevada resistência tem sido incorporada sílica ativa ao concreto. Contudo, segundo TAN e PU (1998), na China, o uso de sílica ativa é limitado pelos altos custos da mesma, sendo inviável economicamente sua utilização. Logo, na China, foi necessário encontrar materiais que substituíssem a sílica ativa sem prejudicar o desempenho do concreto de alta resistência. Dessa forma a cinza volante e escória granulada de alto-forno têm sido utilizadas.

A possibilidade da utilização de escórias como material pozolânico e/ou cimentante dependerá fundamentalmente de sua composição química, de suas características reativas (depende do tipo de resfriamento) e características ambientais (classificação do resíduo como perigoso, não inerte ou inerte).

4.1.1 Influência do Resfriamento na Reatividade das Escórias

As propriedades pozolânicas e/ou cimentantes das escórias dependem do tipo de resfriamento ao qual a escória será submetida após sua retirada do forno (com aproximadamente 1500°C). Em função deste tratamento dado à escória, esta poderá apresentar características expansivas ou não; estrutura vítrea (característica importante para materiais pozolânicos e/ou cimentícios) ou estrutura cristalina (pouco reativa).

As escórias podem ser resfriadas basicamente de duas maneiras:

- resfriamento lento, ao ambiente. Este processo é usualmente utilizado para as escórias de aciaria, em geral (MASUERO, 2001);
- resfriamento brusco, o qual pode ocorrer de duas formas:
 - resfriada com jato de água de elevada pressão, assim que escorre do forno em calhas metálicas (AÏTCIN, 2000). Esta escória é chamada *granulada*, pois adquire dimensões de partículas de areia após o resfriamento brusco. Neste processo uma tonelada de escória consome aproximadamente 3 m³ de água e a escória contém aproximadamente 30% de água após o tratamento (SHI e QIAN, 2000);
 - peletizada, onde o resfriamento da escória se dá pela ação combinada de ar e água em um tambor rotativo (≈ 300 rpm). O consumo de água é de aproximadamente 1m³/tonelada de escória, sendo a umidade residual na escória de aproximadamente 10% (SHI e QIAN, 2000).

Segundo AÏTCIN (2000), no caso de resfriamento lento, a escória cristaliza e pode ser usada como agregado no concreto, no asfalto ou como lastro de cobertura para construir estradas, mas ela não tem valor hidráulico e não pode ser usada como material cimentício suplementar, mesmo que finamente moída. Contudo, GEYER (2001) constatou a viabilidade de utilização de escória de aciaria proveniente do refino secundário, resfriada lentamente, como adição ao cimento, em teores de até 10%, em massa.

As escórias resfriadas rapidamente apresentam estrutura vítrea (ou amorfa), enquanto que as escórias resfriadas lentamente constituem cristais muito pequenos de minerais definidos (LÚCIO, 1981). Segundo GUMIERI (2002), as escórias obtidas do resfriamento brusco possuem forma vítrea, baixa densidade e boas propriedades hidráulicas. Entretanto, as escórias resfriadas naturalmente ao ar cristalizam, tornando-se inertes.

Termodinamicamente esta capacidade aglomerante das escórias resfriadas bruscamente pode ser explicada pelo fato de que o resfriamento rápido permite reter a energia de cristalização, tornando-as vítreas. Assim, este nível de energia maior do que da escória cristalizada confere um estado reativo ao material, o que não acontece com os compostos hidratados que têm menor nível de energia (como escórias resfriadas lentamente), sendo por isso mais estáveis (JOHN, 1995).

Em estudos realizados com escória de alto-forno, SHI e QIAN (2000) verificaram que o resfriamento lento da escória de alto-forno provoca a cristalização de seus compostos. Assim

a escória de alto-forno cristalizada tem pouco ou nenhum valor como material cimentício, mas exibe propriedades mecânicas semelhantes ao basalto. No entanto, quando a escória aquecida é resfriada rapidamente adquire forma vítrea.

MURPHY et al. (1997) observaram que com resfriamento rápido da escória foi possível obter material predominantemente vítreo, com potencial cimentício. Também constataram que a taxa de resfriamento da escória tem efeito significativo na estrutura final da escória.

Segundo CINCOTTO et al. (1992), a hidráulica de uma escória depende de sua composição química e de sua obtenção em estado sólido vítreo. O resfriamento brusco é essencial para que se obtenha a propriedade hidráulica desejada.

Experiências com escórias de alto-forno têm demonstrado que quanto maior proporção vítrea (estrutura amorfa) maior será a reatividade deste resíduo quando incorporado ao cimento, para a mesma composição química (FU et al., 2000).

Segundo MOURA (2000), a reatividade das escórias depende de sua composição química, do teor da fase vítrea e da sua finura.

A necessidade do resfriamento brusco para adquirir capacidade reativa não é somente exclusividade de escórias. Até mesmo o clínquer de cimento Portland se fosse resfriado lentamente até a temperatura ambiente, seria composto de impurezas como belita e óxido de cálcio calcinado endurecido, sem propriedades hidráulicas. O clínquer deve ser resfriado rapidamente depois de passar pela zona de clinquerização no forno, com o objetivo de estabilizar os silicatos nas respectivas formas. Dois cimentos Portland podem ter exatamente a mesma composição química, mas diferentes microestruturas e comportamentos hidráulicos (AÏTCIN, 2000).

MEHTA e MONTEIRO (1994) também afirmam que as diferenças entre a reatividade de dois compostos de cimento tendo uma composição química similar somente pode ser explicada pelos seus graus de instabilidade estrutural.

Em pesquisa realizada sobre caracterização da escória de aço inoxidável, proveniente de resfriamento lento, ZETTERMANN (2001) observou que aquela escória normalmente apresenta estrutura cristalina, com poucas indicações de amorfismo.

O resfriamento brusco, além de conferir à escória uma condição favorável, quanto à reatividade (pela sua estrutura vítrea), também estabiliza seu potencial expansivo, o que não acontece com as escórias resfriadas lentamente.

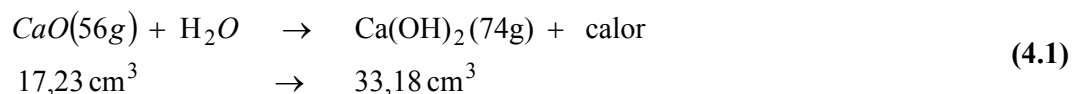
MASUERO (2001) comprovou que através da *granulação* (resfriamento brusco), as escórias de aciaria elétrica (escórias do refino oxidante e redutor) podem ser estabilizadas quanto às suas propriedades expansivas, assumindo estrutura vítrea (amorfa), ideal para sua utilização como adição ao cimento, além de permitir significativa recuperação de fase metálica.

Os compostos expansivos que possivelmente surgiriam no resfriamento lento são neutralizados apresentando uma organização molecular diferenciada, após resfriamento brusco. Segundo MASUERO (2001), a alteração do processo de resfriamento lento para rápido, faz com que a organização molecular da escória passe de uma estrutura cristalina para amorfa. Verificou que através do resfriamento brusco da escória, os teores de óxido de cálcio livre foram muito baixos, não implicando em problemas de desintegração e que após resfriamento brusco, o óxido de magnésio não se encontrava na forma cristalina de periclásio (MgO livre), assim não representava risco de expansão. Além disso, constatou que o resfriamento brusco neutraliza possíveis problemas de expansão decorrentes da transformação do silicato dicálcico da fase β para γ .

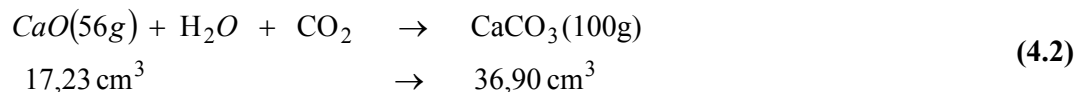
Quando as escórias são resfriadas lentamente, avaliar e quantificar suas reações expansivas e em alguns casos, o potencial de oxidação do ferro, são práticas imprescindíveis para a aceitação ou não de sua aplicação como matéria-prima na construção civil.

4.1.1.1 Reações Expansivas

O grande problema das escórias resfriadas lentamente, dependendo da composição química, é a possibilidade de expansão volumétrica, onde, a cal livre contida nas mesmas, na presença de água, reage gerando produtos expansivos. Na reação de hidratação de 1 cm^3 de CaO produz-se $1,926 \text{ cm}^3$ de Ca(OH)_2 e $2,14 \text{ cm}^3$ de CaCO_3 (GARCÍA et al., 1999):

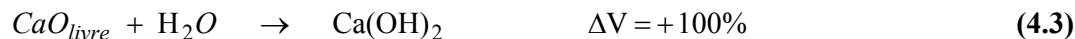


Mas esta reação está vinculada a uma reação com o CO_2 :



VIKLUND et al. (1999) em estudo realizado na Suécia sobre métodos de tratamento de escórias da produção de aço, avaliaram que a instabilidade volumétrica das escórias é resultado de três mecanismos:

– hidratação da cal livre:



– hidratação do MgO livre:



– desintegração do silicato dicálcico:



A cal livre origina-se da cal residual não dissolvida ou da dissociação do silicato tricálcico (C_3S), como segue:



O magnésio livre resulta de escórias antigas não dissolvidas ou da presença de MgO saturado em escórias. Os óxidos de cálcio e magnésio livres hidratam em contato com o ar formando o hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, como mostram a Equação 4.3 e Equação 4.4. A hidratação resulta em grande expansão volumétrica da escória e posterior desintegração. O processo de hidratação do magnésio livre é muito mais lento do que da cal livre, conseqüentemente, a presença de óxidos de magnésio livres é muito mais grave, pois é impossível prever quando tais reações ocorrerão (VIKLUND et al., 1999).

Normalmente a existência de cal residual é dominante em escórias LD, também conhecidas como BOF (Forno de Oxigênio Básico), sendo que a soma de cal livre pode chegar a 20% do peso de escória (VIKLUND et al., 1999).

Segundo MOTZ e GEISELER (2001), quando o propósito é a utilização de escórias de aciaria na construção civil, o conteúdo de cal e magnésio livres é uma característica muito importante, pois está diretamente relacionado com sua estabilidade volumétrica. Em contato com água suas fases minerais reagirão formando hidróxidos. Dependendo da taxa de cal e

magnésio livres, estas reações causam incremento de volume da escória combinado principalmente com sua desintegração em pedaços e menor resistência. Por isso a estabilidade volumétrica é um critério indispensável para o uso de escórias na construção civil.

MURPHY et al. (1997) relatam que a reciclagem de escória de aciaria no mundo tem sido principalmente como agregado para pavimentação de estradas. Além disso, escórias de aciaria têm sido usadas também em mistura asfáltica, representando substancial taxa de reciclagem. O critério de decisão do uso em construção de estradas é a estabilidade volumétrica em uso. Infelizmente, o alto conteúdo de cal livre e magnésio geralmente resultam em reduzida estabilidade volumétrica do agregado de escória de aciaria. Desde que a escória de aciaria seja invariavelmente básica com fluxo substancial de cal ou dolomita, o desempenho da escória como agregado pode ser insatisfatório. Dessa forma, segundo os autores, experiências em relação ao ineficaz desempenho de pavimentos com escória de aciaria, através de uma série de patologias apresentadas na superfície de pavimentos, verificando-se a falta de qualidade quando comparado com agregado natural, vem prejudicando o seu uso como agregado na construção de estradas.

Fica, portanto, evidente que escórias expansivas devem estar estabilizadas antes do seu emprego, não só como agregado para base e sub-base de pavimentos, mas para qualquer outra forma de utilização, onde propriedades estáveis são imprescindíveis para o bom desempenho em uso do material.

Quanto aos métodos de ensaio para avaliação do grau de expansão em escórias resfriadas lentamente, de acordo com a aplicação conferida ao material, determinado ensaio deve ser utilizado para simular, o mais próximo possível da realidade, o seu comportamento em uso. MASUERO (2001) e MANCIO (2002) apresentam uma listagem de diferentes ensaios físicos de expansão, desenvolvidos para avaliar o potencial expansivo de materiais em distintas situações de uso.

MANCIO (2002), utilizou o ensaio da ASTM D4792 (1995), que avalia o potencial de expansão de agregados a partir de reações de hidratação, para avaliação da expansão de agregados de escória de aciaria elétrica como uso em base e sub-base de estradas, por apresentar como vantagem um longo histórico de resultados experimentais relacionados com o desempenho em uso de escórias. Segundo MANCIO (2001), este ensaio utiliza amostras do material compactadas em cilindros metálicos, simulando o *comportamento do material confinado no pavimento*, com sobrecarga, sob condições que aceleram reações de hidratação

dos elementos expansivos. As amostras ficam imersas em água a temperatura de $70 \pm 3^\circ\text{C}$, durante no mínimo 7 dias. A norma ASTM D2940 (1992) estabelece limite máximo de 0,5% de expansão, aos 7 dias, para utilização de escórias em base e sub-base de auto-estradas ou pistas de aeroportos.

Na execução do ensaio da ASTM D4792 (1995), MANCIO (2001) constatou que devido ao fato de que esta norma não estabelece uma distribuição granulométrica padrão para o material de ensaio, a falta de frações finas nos agregados de escória de aciaria elétrica, prejudicava a compactação das amostras ensaiadas, onde a acomodação existente nos vazios deixados entre os grãos de agregado, provavelmente mascarava os resultados de potencial de expansão daquela escória. Desta forma, ajustou a composição granulométrica e energia de compactação às especificações do DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, atualmente DNIT), obtendo resultados superiores de expansão nesta nova situação de correção da granulometria do material de estudo (escória de aciaria elétrica), quando comparado com as amostras ensaiadas sem a execução deste ajuste, reproduzindo melhor a realidade do potencial expansivo deste material.

Na Alemanha, e em muitos países mais industrializados, o uso de escórias de alto-forno e aciaria como agregado para a construção civil, uso na metalurgia e fertilizantes para agricultura tem uma longa tradição. Dependendo da respectiva aplicação de campo, a adequação da escória deve ser verificada através da determinação das propriedades técnicas, bem como da compatibilidade ambiental. Por esta razão testes são utilizados para avaliar a estabilidade volumétrica e o comportamento ambiental como contínuo controle de qualidade MOTZ e GEISELER (2001).

Segundo MOTZ e GEISELER (2001), o teste do vapor desenvolvido na Alemanha pelos autores, é utilizado para verificar a expansão volumétrica de agregados usados na construção de estradas, sendo os resultados de laboratório, comparados com comportamento das escórias de aciaria em condições práticas. Este ensaio consiste basicamente em submeter amostras de escória a um fluxo de vapor em torno de 100°C , que passa através dos agregados de escória, previamente compactados com adequada composição granulométrica em cilindros, sobre pressão ambiente. Dessa forma a umidade necessária para as reações de hidratação da cal livre e magnésio livre é continuamente fornecida para as amostras.

Quando o uso for no concreto, não existe método normalizado específico para avaliação de expansibilidade de escórias. Utilizam-se ensaios adaptados como o de barras prismáticas

de argamassa (ASTM C1260/1994), visto que a expansão ocorre no material aglomerante e não com o agregado graúdo (quando a escória for utilizada em substituição ao cimento). O ensaio consiste na moldagem de amostras em barras prismáticas de argamassa, utilizando-se a escória moída como substituição de parte do cimento, ou como agregado miúdo (dependendo da aplicação que se deseja analisar). Após a moldagem, as amostras são curadas em câmara úmida durante 24 horas, e posteriormente submersas em água a $80 \pm 2^\circ\text{C}$, onde são submetidas a um processo acelerado de hidratação. O acompanhamento da expansão é realizado ao longo do tempo, até que esta estabilize, medindo-se o comprimento longitudinal da barra (MANCIO, 2001). O ensaio pode ser realizado mensalmente, por exemplo, assim pode-se definir o tempo (em meses) que a escória (através de uma amostragem representativa) leva para estabilizar.

Cabe salientar que ensaios de avaliação da expansão de escórias resultantes do resfriamento lento, em função do uso conferido às mesmas, representam, atualmente, um desafio para a pesquisa científica, onde a escassez de dados de campo para relacionar com resultados de laboratório, limita a aplicação deste resíduo. A exploração do potencial de utilização da escória, certamente, depende de esforços dos pesquisadores para que, através de consenso, determinem e classifiquem os ensaios apropriados para cada tipo de aplicação conferida à escória. Uma normalização adequada para este “novo material” pode ser o passo inicial para transformar, o que é no presente um resíduo, em um futuro produto aceito comercialmente.

4.1.1.2 Potencial de Oxidação do Ferro

Embora durante o processo de beneficiamento das escórias resfriadas lentamente ocorra a separação da parte metálica, uma porcentagem ainda continua presente na escória.

Uma questão importante é avaliar em que fase o ferro encontra-se na escória, se estável ou não. Caso esteja instável poderá formar óxidos expansivos.

MACHADO (2000) verificou transformações volumétricas na escória de aciaria resfriada lentamente pelas diferenças de volume molar dos produtos de oxidação e corrosão em relação à forma metálica (Fe^0), chegando a valores de expansão de 77% (variação de volume na mudança de fase do Fe^0 para FeO) a 329% (variação de volume na mudança de

fase do Fe^0 para Fe_2O_3). Neste cálculo, baseou-se apenas na diferença a partir do volume e da densidade absoluta das espécies químicas isoladas.

O potencial de oxidação do ferro em escórias ainda é um tema pouco explorado. Os mecanismos, bem como métodos de ensaio devem ser adequadamente investigados, buscando a melhor forma de obter em laboratório resultados que reproduzam a realidade do fenômeno.

4.1.2 Utilização de Escórias Ativadas

Embora considera-se que a escória granulada de alto-forno tenha propriedades cimentantes, quando esta é colocada em contato com a água, a hidratação ocorre muito lentamente. Entretanto, quando disposta em contato com água de pH elevado, aumenta sua velocidade de dissolução, formando-se produtos hidratados estáveis (JOHN, 1995). Segundo DRON e LOU apud JOHN (1995), a dissolução da escória ocorre por ataque hidroxílico (ataque pelos íons OH^-), enquanto que a dissolução do clínquer acontece pelo ataque hidrolítico (ação das moléculas de água). Dessa forma, os ativadores promovem a elevação do pH da água de hidratação das escórias.

JOHN (1995), em estudo sobre utilização de cimento de escória granulada de alto-forno ativada com silicato de sódio e cal hidratada, observou crescimento da resistência à compressão, com a utilização destes ativadores. Além disso, verificou que a velocidade de carbonatação do cimento com escória, apresentou-se similar a do cimento Portland, para a mesma resistência.

Conforme FU et al. (2000), a mistura de escória granulada de alto-forno ao clínquer proporciona desenvolvimento lento das resistências do cimento em idades iniciais. Sendo assim, as características de cimentos com larga soma de escória granulada de alto-forno, podem ser melhoradas com a utilização de ativadores.

Segundo CINCOTTO et al. (1992), as características físico-químicas da escória granulada de alto-forno conferem-lhe propriedades ligantes de cimento hidráulico desde que moída e ativada. Para que a escória apresente adequada reatividade, além de estar no estado vítreo, é necessário que a escória seja solúvel, ou seja, atacável pela água, para que os elementos formadores dos compostos hidráulicos sejam liberados. Esta solubilidade é favorecida pelo teor de óxido de cálcio presente na escória. Dessa forma, a reação é lenta, mas em meio fortemente alcalino ou através da ação de sulfatos ou de ambos, ou seja, sob ação de

ativadores, torna-se acelerada, sendo a velocidade de reação ainda favorecida pela finura da escória.

Na América do Norte, segundo SHI e QIAN (2000), muitas escórias metalúrgicas têm sido usadas como agregados para diferentes aplicações, e somente uma pequena porção da escória granulada de alto-forno é usada como substituição parcial do cimento Portland. O lento desenvolvimento de resistência do cimento nas primeiras idades, provavelmente tem induzido a este tipo de aplicação menos nobre. Entretanto, segundo os autores, a presença de ativador pode acelerar as reações de hidratação da escória. Muitos resultados de pesquisas indicam que escórias ativadas apresentam maiores resistências, estrutura densa e melhor durabilidade quando comparadas com cimento Portland.

BAKHAREV et al. (2000) investigaram o efeito da incorporação de escórias ativadas com álcalis sobre a resistência do concreto, além do efeito de diferentes aditivos superplastificantes na trabalhabilidade do concreto. Os ativadores utilizados foram silicato de sódio líquido (4 a 7% Na, em relação à massa de escória) e um ativador composto por NaOH + Na₂CO₃ (8% Na, em relação à massa de escória). Constataram que concretos ativados com silicato de sódio líquido apresentaram as melhores resistências.

Em recentes pesquisas sobre o desenvolvimento de materiais cimentantes de alto desempenho, baseados na ativação de escórias tais como escória de alto-forno, escórias de aciaria, escórias de cobre, SHI e QIAN (2000), utilizaram estas escórias ativadas. Observaram que estas escórias, quando ativadas, exibem não só elevadas resistências nas primeiras idades e em idades mais avançadas, como também melhor resistência à corrosão do que o cimento Portland comum. Segundo os autores, a ativação das propriedades pozolânicas ou cimentantes latentes das escórias deveria ser o principal tópico para os investidores de materiais de construção.

4.2 BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS

No emprego como base e sub-base de pavimentos, o material reciclável tem que satisfazer exigências mínimas de desempenho em função das cargas do tráfego. Para isso deve apresentar bons resultados em relação à resistência a abrasão, impactos e desgaste, deformação, capacidade suporte, durabilidade, composição granulométrica, classificação ambiental de acordo com normas de regulamentação. No Brasil, o DNIT (Departamento

Nacional de Infra-estrutura de Transportes, antigo DNER) possui normas bem definidas para avaliação das propriedades dos materiais empregados em pavimentação. No caso da utilização de escórias, estudos devem ser elaborados enquadrando este material dentro das especificações do DNIT, através da elaboração e classificação de ensaios apropriados para cada tipo de aplicação conferida à escória.

Além disso, aspectos importantes de durabilidade, no que diz respeito a características expansivas de algumas escórias, especialmente as escórias resfriadas lentamente, merecem especial atenção, onde o controle da expansão volumétrica deste material é imprescindível para viabilizar sua aplicação.

ROHDE (2002), em estudo sobre utilização de escória de aciaria elétrica resfriada lentamente em camadas granulares de pavimentos, verificou que após correção da granulometria da escória, esta apresentou módulos de resiliência superiores aos dos materiais granulares tradicionais. Além disso, avaliou a possibilidade de melhorar as características de resistência e trabalhabilidade do agregado através da adição de cinza pesada e cal de carbureto (ambos resíduos industriais), obtendo resultados satisfatórios ao uso proposto. Entretanto, é importante salientar que a possibilidade de aplicação desta escória (escória de aciaria elétrica resfriada lentamente), ao uso proposto (base e sub-base de pavimentos), está vinculado a um período prévio de estabilização de suas propriedades expansivas.

KOUDA (1996) avaliou a utilização de escória granulada como material para base de pavimento e revestimento asfáltico. Tentativas de laboratório foram realizadas com agregado de escória em mistura asfáltica e como material de base com proporções entre 25 e 50%. Testes de resistência e de estabilidade da mistura asfáltica (ensaio Marshall) foram executados para avaliar o conteúdo ótimo de escória granulada, obtendo qualidade comparável ao do concreto asfáltico convencional com conteúdo de 25% de escória, sendo esta mistura testada em um pavimento experimental. Os estudos de durabilidade confirmaram que o desempenho do pavimento experimental é comparável com o pavimento de concreto asfáltico convencional.

4.3 AGREGADO GRAÚDO EM REVESTIMENTO ASFÁLTICO

Misturas asfálticas com agregados de escórias de aciaria têm sido usadas em países como Estados Unidos, Japão, Inglaterra e Canadá, particularmente em áreas com concentração de produção de ferro e aço (ALI et al., 1992).

ALI et al. (1992) relatam que experiências no sul de Ontário, desde 1970, têm mostrado que misturas de escórias de aciaria em concreto asfáltico apresentam excelente qualidade. Entre as vantagens do uso de escória de aciaria em mistura asfáltica tem-se:

- escórias de aciaria apresentam excelente resistência à abrasão;
- misturas com escória de aciaria possuem boa resistência ao calor;
- normalmente apresentam boa capacidade suporte.

No entanto, desvantagens das misturas asfálticas com escória de aciaria devem ser avaliadas, entre elas (ALI et al., 1992):

- quando em contato com a umidade, escórias de aciaria possuem um potencial expansivo natural de até 10%, atribuído à hidratação do óxido de cálcio (CaO) e magnésio (MgO) livres;
- misturas asfálticas com escória de aciaria apresentam elevada massa unitária, o que incrementa custos de transporte;
- características como superfície específica irregular e elevada porosidade das escórias de aciaria requer maior conteúdo de material asfáltico.

Em estudo sobre uso das escórias de aciaria em concreto asfáltico, ALI et al. (1992) elaboraram testes com oito diferentes misturas asfálticas. Quatro destas misturas contendo agregados de escória de Forno Elétrico a Arco (FEA), em proporções diferentes, uma com escória OH (proveniente do “*Open-Hearth Furnace*”), também conhecida por escória SM (processo Siemens-Martin, em desuso) e três misturas de concreto asfáltico convencional, comumente usadas na região de Nova Escócia, Canadá. Resultados de laboratório mostraram que misturas asfálticas contendo agregados de escória de aciaria apresentam características superiores às convencionais. No entanto, a “mistura A”, contendo 100% de escória de FEA, empregou 16% a 33% mais asfalto que as misturas convencionais. Isto se deve, provavelmente, à porosidade destas escórias.

Como exemplos de aplicação de escórias de FEA, VIKLUND et al. (1999) citam que na Dinamarca, uma construtora de estradas – Tarco Vej A/S - tem usado escórias de FEA por mais de 20 anos na produção de asfaltos chamados “stalfalt”. Eles verificaram que asfaltos

produzidos com escória de FEA possuem uma vida útil 30% maior do que asfaltos com pedra natural.

4.4 AGREGADOS EM CONCRETO

Dependendo da granulometria da escória beneficiada, pode-se optar por substituir o agregado miúdo ou o agregado graúdo no concreto. Importante atenção deve ser dada ao possível aumento de massa específica do concreto com agregados de escória, em função da porcentagem de ferro presente. Dependendo do tipo de aplicação conferida ao concreto, maior massa específica pode ser uma propriedade desejada.

Segundo GARCÍA et al. (1999), a reciclagem de escórias de FEA pode ser realizada como substituição parcial dos agregados naturais do concreto, desde que não represente aumento significativo da sua massa específica pelo ferro. Além disso, é muito importante analisar sua estabilidade volumétrica. O uso destas escórias têm sido limitado devido à possibilidade da presença de cloretos ou elementos estranhos de refratários provenientes da “limpeza do forno elétrico”. Os autores ainda concluem que a utilização, como agregados em concreto, de grãos de escória entre 0 e 6mm deve ser evitada e aspectos de durabilidade avaliados ao longo do tempo.

No Japão, MORINO e IWATSUKI (1999) avaliaram o desempenho de concretos com quatro tipos de agregados de escória de FEA, resultantes de diferentes processos de resfriamento, tais como, escória granulada com ar (resfriamento rápido), escória granulada com água (resfriamento semi-rápido), escória resfriada ao ar (resfriamento lento) e “escória melhorada” (remoção de ferro e resfriamento semi-rápido). Os ensaios de durabilidade mostraram que concretos com agregados de escória de FEA granulada com ar (resfriamento rápido) não apresentam características expansivas. Concretos com agregados de escórias de FEA granuladas com água (resfriamento semi-rápido) e resfriadas lentamente apresentaram pequena expansão, onde o incremento de expansão estabilizou após três anos. O coeficiente de expansão do concreto ficou em torno de 0,03%. Quanto à análise da resistência no concreto, não houve diferença significativa entre concretos com agregados de escória de FEA e de agregado natural.

MOURA (2000) pesquisou o uso de escória de cobre como agregado miúdo no concreto e concluiu que, a utilização de até 40% em volume desta escória, melhora o desempenho do

concreto tanto no estado fresco (trabalhabilidade e massa específica) quanto endurecido (massa específica, propriedades mecânicas e durabilidade).

Segundo CINCOTTO et al. (1992), o emprego de escória como agregado miúdo para argamassas e concreto é bem interessante, pois este subproduto é utilizado sem ser moído, sendo dispensável instalação industrial que consome energia. Contudo, segundo os autores, é importante que se estabeleçam especificações que fixem as características químicas e físicas exigíveis no recebimento deste material e que se corrija, quando necessário, a composição granulométrica, devido à falta de grãos retidos acumulados nas peneiras de menor abertura.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 APRESENTAÇÃO DA APLICAÇÃO PROPOSTA À EGF DE ACORDO COM A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Toda vez que o processo produtivo for otimizado de tal forma que ainda algum resíduo é gerado, a reciclagem ganha papel preponderante na preservação do meio ambiente. Dessa forma, este trabalho pretende avaliar a possibilidade de reciclagem da escória granulada de fundição (EGF), atualmente um resíduo da indústria de fundição, gerado em forno cubilô da produção de ferro fundido, que no presente, não tem aplicação com valor agregado para a empresa geradora, sendo disposto em aterro no final do processo.

Como abordado no capítulo 3, item 3.2, a escória granulada de fundição (EGF) proveniente do forno cubilô pode-se apresentar sob a forma amorfa, com potencial reativo. Como observado no capítulo 4, item 4.1.1, este potencial reativo, proporcionado em parte pelo resfriamento brusco (também chamado granulação) das escórias, pode conferir características pozolânicas e/ou cimentícias às mesmas, como já ocorre com as escórias de alto-forno. Sendo assim, a escória granulada de fundição (EGF), como o nome já diz, que também é obtida através de resfriamento brusco ou rápido, atualmente tratada como resíduo pela indústria de fundição, pode ter aplicação com valor agregado, quando por exemplo, empregada como matéria-prima na construção civil, conforme abordado no capítulo 4, sobre as possibilidades de aplicação já existentes para as demais escórias industriais geradas.

A reciclagem da escória granulada de fundição (EGF), como matéria-prima na construção civil, permitiria então benefícios para ambos setores. A indústria de fundição passaria de geradora de um resíduo para a geração de um subproduto com valor agregado, transitando da condição de agente poluidor para promotor de práticas ambientalmente corretas, deixando, portanto, de ser alvo de penalidades por danos ambientais, sendo provavelmente incentivada por órgãos governamentais, através de incentivos fiscais, a fim de aprimorar cada vez mais a concretização de práticas de qualidade ambiental. Já para a indústria da construção civil, o uso de subprodutos industriais como matéria-prima (como no caso de EGF) permitiria, além da conservação de fontes naturais não renováveis, a redução de impacto ambiental e economia de energia neste setor, como exemplificado no capítulo 2, item 2.2, sobre a significativa redução de emissão de CO₂ e energia com o uso de escória misturada ao cimento.

O concreto é certamente um dos materiais mais consumidos pela indústria da construção civil, onde em nível mundial atingiu o valor de 9 bilhões de toneladas de concreto produzido só no ano de 2000 (MONTEIRO, 2001)³. Este material é constituído basicamente de cimento, agregado miúdo (usualmente areia), agregado graúdo (usualmente brita) e água. Dentro desta constituição simplificada, o cimento é evidentemente o material de constituição do concreto com maior valor comercial, podendo custar 10 vezes ou mais que o agregado (MEHTA e MONTEIRO, 1994), em função do elevado consumo de energia e recursos naturais envolvidos na sua fabricação, bem como mobilização de recursos humanos e materiais relacionados à exploração de suas matérias-primas (basicamente calcário e argila). Como apresentado anteriormente, materiais resfriados bruscamente e com composição química adequada podem apresentar potencial reativo, e conseqüentemente propriedades pozolânicas e/ou cimentantes, o que é essencial quando se objetiva substituir um material, como no caso do cimento Portland, que é altamente reativo. Estudos com escórias siderúrgicas, principalmente as escórias de alto-forno, já mostraram resultados promissores quanto a este uso, como exposto no capítulo 4, item 4.1.

Logo, a EGF, que apresenta estrutura amorfa, preenchendo um dos pré-requisitos para o uso proposto, na substituição de parte do cimento em concreto, também pode apresentar resultados positivos nesta aplicação. Dessa forma, a possibilidade de utilização da escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento na produção do concreto, passa a ser uma alternativa extremamente atrativa do ponto de vista econômico, agregando também significativos benefícios ambientais.

Cabe salientar que neste estudo propôs-se a utilização da EGF em concreto, pois o volume gerado da mesma não supriria as demandas de uma cimenteira. Contudo, as vantagens ambientais e econômicas apontadas na revisão bibliográfica, relacionadas com a utilização de escórias na produção de cimento, adaptam-se também à proposta de uso em concreto. Uma vez que reduzindo cimento e substituindo parte do mesmo por um resíduo, reduz-se a exploração de matérias-primas constituintes do concreto e impactantes à Natureza, como no caso do cimento Portland.

Em função do que foi abordado, organizou-se um projeto experimental, a seguir explanado, para avaliar o efeito da utilização de escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento em concreto, sob o ponto de vista de propriedades

³ Notas de aula. Disciplina de Tópicos Especiais: Tecnologia Avançada do Concreto.

mecânicas. Num primeiro momento, a característica amorfa da EGF foi confirmada, através de análise de difração de raios-x, bem como avaliação de composição química, índice de atividade pozolânica e demais ensaios de caracterização da EGF apresentados no item 5.3.3.2.

5.2 PLANEJAMENTO 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).

Ainda segundo RIBEIRO e CATEN (2000), o projeto experimental objetiva encontrar o ajuste ótimo dos *parâmetros do sistema*⁴, maximizando o desempenho deste sistema (que pode ser um produto, processo ou serviço), minimizando custos e tornando o desempenho do sistema pouco sensível ao efeito de fatores de ruído. Para tanto, deve-se definir uma seqüência de ensaios econômicos e eficientes, através de uma avaliação estatística dos resultados, assegurando respaldo científico e maximizando as informações obtidas.

Os fatores de ruído são responsáveis pela variação inerente ao processo. Normalmente estão diretamente relacionados com as condições do meio, como temperatura e umidade do dia, velocidade do vento, ou outras condições como habilidade, humor ou cansaço do operador, entre outros, sendo portanto, fatores não controláveis. O importante realmente é não ignorar a sua existência, e tentar controlar o processo de tal forma que estes fatores de ruído não interfiram significativamente sobre os resultados. Deve-se evitar o risco de que na interpretação final dos resultados, alguns dos efeitos dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta estejam confundidos com os efeitos provocados pelos fatores de ruído, sobre estas mesmas variáveis de resposta, de tal forma que não se consiga distinguir se a mudança na resposta foi resultado da variação dos níveis dos fatores controláveis ou, da influência dos fatores de ruído. Neste último caso o ensaio ficaria totalmente prejudicado.

⁴ São todos os parâmetros que podem influenciar no desempenho do sistema (produto, processo ou serviço), subdividindo-se em: fatores controláveis, fatores constantes e fatores de ruído (RIBEIRO E CATEN, 2000).

O planejamento experimental inicia com a determinação das *variáveis de resposta* (variáveis dependentes), que são responsáveis pela definição da qualidade do sistema (produto, processo ou serviço), fazendo parte das características de qualidade deste sistema, como por exemplo, desempenho do produto.

Posteriormente escolhem-se os *fatores controláveis* (variáveis independentes), os quais são um subconjunto dos *parâmetros do processo*⁴ que podem exercer influência sobre as variáveis de resposta (RIBEIRO e CATEN, 2000), sendo assim, interessante controlá-los no processo, para avaliar seu efeito na resposta. Dessa forma, são selecionados alguns níveis do intervalo de variação dos fatores controláveis, onde faz sentido analisar o experimento. Tenta-se avaliar qual é o impacto (mudança) perceptível nas variáveis de resposta (desempenho do produto, características de desempenho), quando ocorre a variação de um nível para outro dos fatores controláveis (alguns parâmetros do sistema).

Ainda existem os *fatores constantes*, que também fazem parte do conjunto de parâmetros do processo⁴, mas que não foram escolhidos como prioritários no estudo desenvolvido. Entretanto, estes fatores também influenciam na resposta, sendo necessário mantê-los constantes, para garantir as mesmas condições em todo o experimento. Assim como no caso dos fatores de ruído, deve-se ter certeza que a mudança na resposta foi resultado da variação do nível dos fatores controláveis e não de outros fatores que não são objeto de estudo.

Após a determinação das *variáveis de resposta* que se pretendem avaliar no experimento, bem como determinação dos *fatores controláveis* mais significativos e escolha do intervalo de variação dos mesmos, determina-se o modelo estatístico mais indicado para a situação em análise e monta-se a matriz experimental, definindo-se a ordem dos ensaios.

Com os resultados das medições realizadas do efeito de cada um dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta, bem como do efeito da interação destes fatores controláveis sobre as variáveis de resposta, procede-se a análise estatística dos resultados, através do modelamento individual de cada variável de resposta, definindo uma função de ajuste ótimo para cada variável de resposta, o mais representativa possível do comportamento dos resultados medidos. Com a construção de gráficos dos efeitos dos fatores principais sobre cada variável de resposta, bem como construção de gráficos dos efeitos das interações mais significativas sobre cada variável de resposta em estudo, pode-se verificar a consistência técnica da solução (modelo) encontrada.

5.2.1 Determinação das Variáveis de Resposta do Projeto Experimental

As variáveis de resposta (variáveis dependentes) determinadas como objeto de estudo deste projeto experimental, que representam as características de qualidade do produto, neste caso do concreto, estão relacionadas com as propriedades mecânicas do concreto, sendo as seguintes:

- resistência à compressão uniaxial (f_c);
- resistência à tração na flexão (f_t');
- resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$).

Em função da importância relacionada às propriedades mecânicas do concreto, estas foram priorizadas neste projeto de estudo. Contudo, cabe salientar que as características de qualidade do concreto, as quais definem o desempenho do concreto em uso, não se limitam somente às propriedades mecânicas. Existem as características de desempenho relacionadas com a durabilidade do concreto, onde determinados ensaios tentam simular o desempenho em uso deste concreto ao longo do tempo, frente à ação de agentes agressivos em contato com o mesmo. Entretanto, devido a limitações quanto ao tempo necessário para o desenvolvimento do projeto de pesquisa, elegeram-se as propriedades mecânicas do concreto como objeto de estudo desta proposta de pesquisa, quanto à avaliação de utilização da escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento na produção do concreto. Contudo, esta avaliação de desempenho da EGF na composição do concreto deverá ser completada pela avaliação de durabilidade deste concreto com EGF, estudo este que faz parte do projeto de pesquisa de mestrado de RESCHKE (2002), que encontra-se em desenvolvimento.

5.2.2 Escolha dos Fatores Controláveis do Projeto Experimental

Neste projeto experimental, os fatores controláveis (variáveis independentes) escolhidos, ou seja, subconjunto de parâmetros do processo de efeitos considerados possivelmente significativos sobre as variáveis de resposta, foram:

- teor de substituição do cimento por escória granulada de fundição (TE), onde foram investigados quatro níveis, três teores de substituição do cimento por EGF (10%, 30% e 50%), em volume, e o referência (0%);
- a relação água/aglomerante ($a/agl.$), ou seja, água/(cimento + EGF), onde foram investigados três níveis (0,40; 0,55 e 0,70);

– a idade do concreto, investigando-se três níveis (7, 28 e 91 dias).

Para tornar-se possível a avaliação da influência da substituição de parte do cimento por escória granulada de fundição (EGF), o fator controlável de estudo escolhido, teor de substituição de cimento por EGF, deveria pertencer a uma faixa de variação (intervalo) que cobrisse significativamente o que se pretendia medir. Entretanto, a inexistência de estudos anteriores para esta aplicação (concreto), com este material (EGF), fez com que se optasse por uma faixa de maior abrangência, pela falta de experiências anteriores com este material (EGF).

Tomou-se então por base, o sugerido pela NBR 11578 (1991) para cimento Portland composto, que entre outras especificações, estipula a variação entre 6 a 34% para o teor de escória granulada de alto-forno, constituinte do cimento Portland composto com escória (CP II-E). Assim, o ponto médio (teor médio de substituição de cimento por EGF) de estudo escolhido foi 30%, limitando-se, o intervalo, pela variação de $\pm 20\%$ sobre o ponto médio, resultando no teor de substituição de cimento por EGF igual a 10%, como ponto inferior do intervalo e no teor de 50%, como ponto superior do intervalo de estudo sobre a influência da substituição de parte do cimento por escória granulada de fundição (EGF) no concreto.

Optou-se por apenas três pontos (teores de substituição de cimento por EGF), pois aumentando-se o número de níveis, com a determinação de mais pontos de estudo, o número de combinações conseqüentemente aumentaria, elevando o número de tratamentos (concretagens), bem como a quantidade de material para a realização destas concretagens. Como apontado no capítulo 1, item 1.3 (limitações da pesquisa), o projeto experimental exigia grande quantidade de EGF moída para a confecção de todos os corpos-de-prova de concreto, utilizados na realização dos ensaios mecânicos. Desta forma, a simples inserção de mais um nível (teor de substituição de cimento por EGF) poderia inviabilizar a realização do projeto de pesquisa. Sendo assim, por limitações relacionadas com o tempo estipulado para o projeto de pesquisa, bem como limitações de laboratório (equipamento para moagem), utilizou-se o mínimo de pontos possível para compor uma curva de comportamento do concreto com EGF, necessária para a interpretação final dos resultados.

Como o cimento e a escória granulada de fundição não apresentam a mesma massa específica, conforme apresentado nos itens 5.3.3.1 e 5.3.3.2.2, respectivamente, determinou-se a substituição de cimento por EGF em volume, para que fossem mantidas as mesmas condições de concretagem, em termos de volume de concreto. Assim, calculou-se a massa

equivalente à porcentagem de substituição sobre o volume de cimento, como mostra o item 5.3.5.

A escolha da relação água/aglomerante ($a/agl.$), ou seja, $água/(cimento + EGF)$, como um dos fatores controláveis no projeto de pesquisa, deve-se à fundamental importância que este fator exerce sobre a resistência do concreto, sendo também um dos parâmetros essenciais quando se analisa a durabilidade de concretos. Sabe-se que a relação água/cimento ou água/aglomerante é inversamente proporcional à resistência do concreto. Relações água/cimento ou água/aglomerante menores, normalmente permitem a obtenção de concretos menos porosos e conseqüentemente, mais resistentes e duráveis.

Segundo AITCIN (2000), o conceito de relação água/cimento tem sido o pilar da tecnologia do concreto por anos, entretanto este conceito de relação água/cimento está perdendo muito de seu significado básico desde que muitos materiais cimentícios suplementares e filers mais ou menos reativos estão substituindo parte do cimento nos concretos modernos. Antigamente o concreto era feito usando apenas cimento, logo a expressão “relação água/cimento” era inquestionável. Atualmente, muitos concretos modernos incorporam cinzas volantes, escória de alto-forno, pozolanas naturais, sílica ativa, calcário ou cinza de casca de arroz, sendo que esses materiais finamente moídos podem ser parte de um “cimento composto” ou simplesmente adicionados ao concreto na usina. A expressão “materiais cimentícios suplementares” não inclui todos estes materiais, pois não é claro que um calcário ou um filer qualifique-se como um material cimentício. Assim, o autor prefere utilizar a expressão “relação água/aglomerante” em vez de “relação água/material cimentício”, pois entende que o termo “aglomerante” representa qualquer material finamente moído que é usado na mistura do concreto, tendo como finura próxima ou menor do que a do cimento Portland.

Por concordar com o autor, neste projeto experimental adotou-se a mesma expressão, para referenciar a relação $água/(cimento + EGF)$, identificada a partir de então, como *relação água/aglomerante*.

Na escolha dos níveis da relação água/aglomerante, para a investigação do efeito desta relação água/aglomerante sobre as propriedades mecânicas do concreto com substituição de parte do cimento por EGF, bem como o efeito sobre as propriedades mecânicas do concreto referência, buscou-se alcançar uma faixa abrangente, considerando desde concretos pobres, que possuem elevadas relações água/aglomerante, até concreto ricos, com menores relações

água/aglomerante. Desta forma, definiu-se como ponto intermediário o nível 0,55 para a relação água/aglomerante média, e os níveis 0,40 e 0,70, respectivamente, para os níveis inferior (que corresponde a um traço rico) e superior (correspondendo a um traço pobre).

O efeito da idade (grau de hidratação) do concreto sobre as propriedades mecânicas do mesmo, igualmente é considerado um parâmetro importante para o acompanhamento da evolução da resistência deste concreto, tendo sido também escolhida como fator controlável de estudo.

É de consenso que a incorporação de escória de alto-forno ao concreto promove o desprendimento de calor mais lento nas primeiras idades (CINCOTTO et al.,1992; MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997; COLLINS e SANJAYAN,1999; FU et al.,2000; SHI e QIAN,2000), adquirindo-se uma microestrutura mais densa da pasta de cimento hidratada, o que melhora a resistência a longo prazo, como também a durabilidade do concreto (NEVILLE, 1997). Assim, como o uso de escórias no concreto normalmente está associado ao acréscimo de resistência em idades mais avançadas, optou-se por acompanhar o desenvolvimento das resistências do concreto com escória granulada de fundição (EGF) por um período mais prolongado, até a idade de 91 dias, para verificar se com EGF este comportamento se confirma.

Outros parâmetros do processo que não puderam ser analisados no experimento, mas que também exercem influência sobre as propriedades mecânicas do concreto como: adensamento, trabalhabilidade, condições de cura, tipo de cimento, tipo, forma, textura, composição granulométrica e tamanho dos agregados foram mantidos constantes, para evitar sua interferência sobre os efeitos dos fatores controláveis em estudo.

5.2.3 Modelo Estatístico e Matriz Experimental

O estudo do efeito da utilização de escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento em concretos, sobre as propriedades mecânicas (resistência à compressão uniaxial, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão) destes concretos, foi desenvolvido através da elaboração de uma matriz experimental e utilização de um modelo estatístico adequado às condições existentes.

Como trata-se de um projeto fatorial com três fatores controláveis, o fracionamento⁵ comprometeria a análise do efeito de interações importantes entre os fatores controláveis, portanto este experimento não foi fracionado. O fracionamento do experimento é mais indicado para projetos experimentais constituídos de cinco fatores controláveis ou mais (RIBEIRO e CATEN, 2000). Logo, o modelo estatístico adotado foi um ***Projeto Fatorial Cruzado Completo e com Repetição***.

A utilização de um *projeto fatorial cruzado* permite investigar todas as combinações dos níveis de fatores controláveis (RIBEIRO e CATEN, 2000). Este projeto fatorial é considerado *completo* quando não ocorre fracionamento do mesmo. Além disso, num projeto fatorial, quanto maior o número de repetições, maior será a confiabilidade nas conclusões encontradas.

Neste experimento foram realizadas três repetições, consideradas fundamentais para, além de garantir a confiabilidade desejada, possibilitar a confecção do número de corpos-de-prova necessários para a investigação de cada uma das variáveis de resposta, ou seja, propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão uniaxial, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão).

A matriz experimental formada pela combinação entre os fatores controláveis (teor de substituição de cimento por EGF x relação água/aglomerante x idade) foi composta por 36 combinações (o que equivale a 12 concretagens), que após repetições resultou em 108 tratamentos (observações), o que equivale a 36 concretagens. Em cada concretagem foram moldados corpos-de-prova (CP's) suficientes para investigação de cada uma das variáveis de resposta em estudo, bem como, para cada uma das idades (7, 28 e 91 dias) do concreto. Dessa forma, de cada concretagem foram moldados 3 CP's cilíndricos (9,5 cm x 19 cm), para realização de ensaio de resistência à compressão uniaxial, um para cada idade, mais 3 CP's cilíndricos (9,5 cm x 19 cm), para ensaio de resistência à tração por compressão diametral, sendo também um para cada idade, bem como 3 CP's prismáticos (10 cm x 10 cm x 35 cm), igualmente um para cada idade, totalizando 9 CP's (dos quais 6 cilíndricos e 3 prismáticos) por concretagem. Repetindo-se a matriz experimental três vezes, obtêm-se, conseqüentemente, 3 CP's por idade, para a investigação de cada uma das propriedades mecânicas.

⁵ Só roda (executa) parte dos ensaios.

Como a matriz experimental completa é composta por 12 concretagens (36 combinações diferentes), isto equivale à moldagem de 108 CP's (72 cilíndricos + 36 prismáticos). O Projeto Fatorial Cruzado Completo é composto por 3 repetições, correspondendo a um total de 36 concretagens, totalizando 324 CP's moldados, dos quais 108 prismáticos (10 cm x 10 cm x 35 cm) e 216 cilíndricos (9,5 cm x 19 cm).

A Figura 5.1 mostra a matriz experimental completa do projeto de pesquisa. A seqüência de concretagens foi aleatorizada para execução do experimento.

5.3 METODOLOGIA

A metodologia segue os procedimentos descritos a seguir, iniciando-se pela amostragem e beneficiamento da escória granulada de fundição (EGF), bem como, apresentação de materiais e métodos utilizados.

5.3.1 Amostragem da Escória Granulada de Fundição (EGF)

A escória granulada de fundição (EGF) coletada para a realização deste experimento foi proveniente do processo de fusão em forno cubilô, de uma indústria de fundição. A carga do forno cubilô é composta basicamente de sucata de ferro fundido, sucata de aço, ferro-gusa, retorno (peças refugadas), coque e calcário. Atualmente esta escória não tem aplicação, sendo considerada um resíduo, com disposição final terceirizada pela empresa. No período de coleta, a geração mensal de escória da empresa estava em torno de 16 toneladas/mês.

Imediatamente após o vazamento do ferro fundido, a uma temperatura de aproximadamente 1520°C, como mostra a Figura 5.2, a escória de fundição (que fica sobrenadante ao banho metálico, por apresentar menor densidade) também é vazada em um canal próprio, localizado na lateral do forno cubilô, sendo aproximadamente 1500°C sua temperatura durante o vazamento (Figura 5.3).

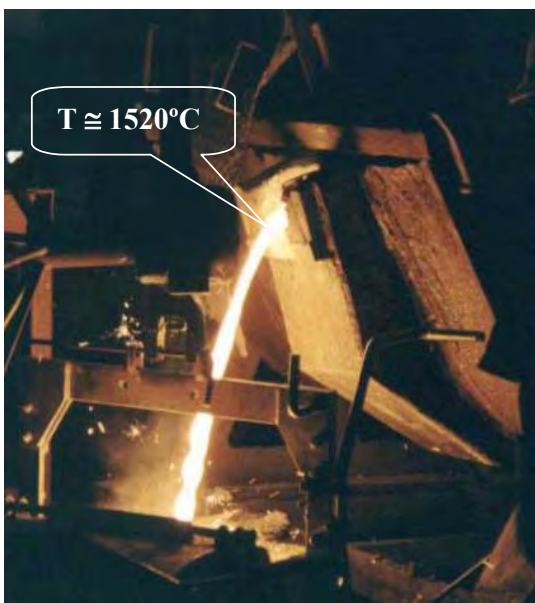


Figura 5.2 Vazamento do ferro fundido líquido em forno cubilô

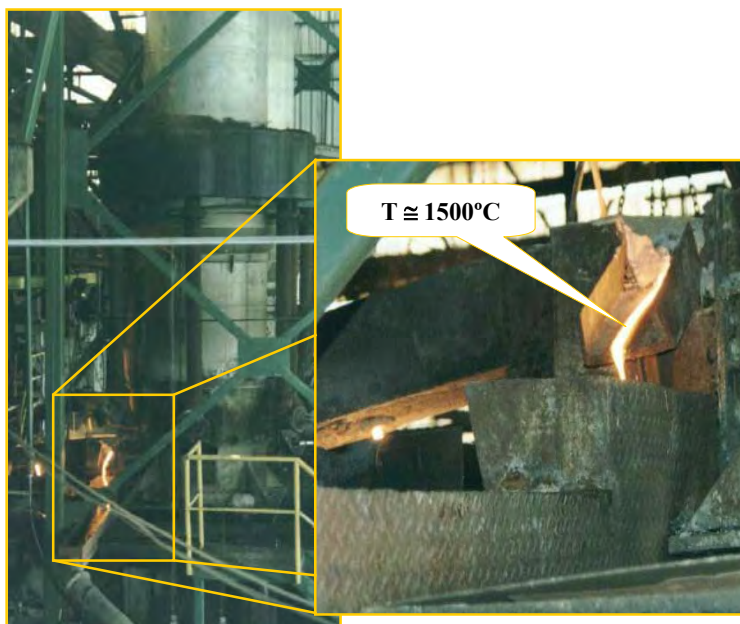


Figura 5.3 Vazamento da escória de fundição do forno cubilô, para o canal de resfriamento

Neste canal, através de um fluxo contínuo d'água, a escória de fundição sofre resfriamento brusco, conforme observa-se na Figura 5.4, o que resulta na sua granulação, desintegrando-se em pequenas partículas semelhantes a uma areia grossa.

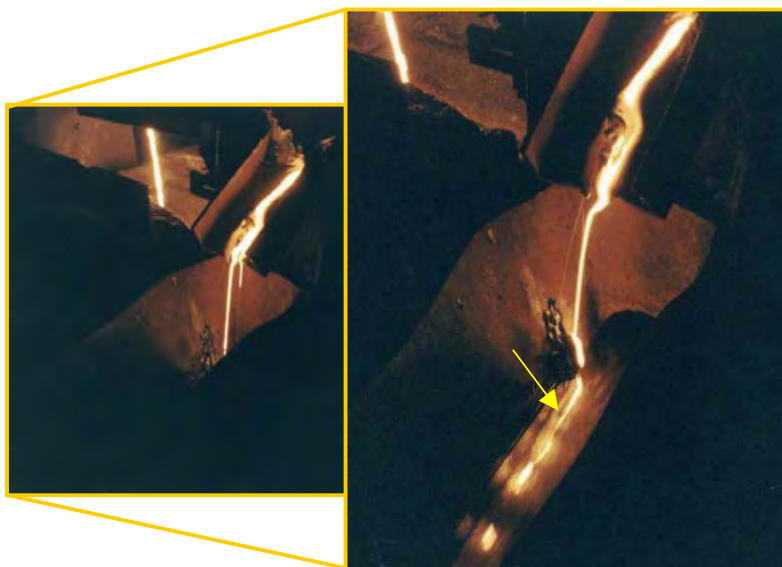


Figura 5.4 Resfriamento brusco da escória de fundição no canal de fluxo d'água contínuo

A escória granulada de fundição fica disposta ao longo do canal d'água de resfriamento, sendo coletada no final de cada dia de operação e depositada em contêineres, para ser

entregue a uma empresa especializada em disposição de resíduos. Desta forma, neste canal vão-se acumulando escórias granuladas de fundição resultantes de várias cargas do cubilô.

Sendo assim, objetivando-se efetuar uma amostragem o mais representativa possível, a coleta foi resultado de aproximadamente 33 cargas do forno cubilô, em cada uma das duas diferentes semanas de realização desta coleta. Como pode ser observado na Figura 5.5, a amostra foi coletada neste canal de água corrente, totalizando aproximadamente 200 kg de amostra de EGF, completamente úmida.



Figura 5.5 Coleta da amostra de escória granulada de fundição (EGF), após resfriamento brusco, no canal de fluxo d'água contínuo

Em laboratório, procedeu-se a secagem da amostra em estufa ($\cong 100^{\circ}\text{C}$). Observou-se a presença de outros materiais juntamente com a escória, como mostra a Figura 5.6a, sendo separados da amostra utilizada para beneficiamento. Também observou-se a existência de pedras maiores (Figura 5.6b), em quantidade muito inferior ao total de amostra, provavelmente resultante do acúmulo de várias partículas menores de EGF, formando esta pedra maior.

A Figura 5.6c mostra o aspecto da escória granulada de fundição após secagem, apresentando forma de grãos pequenos, próximos aos de uma areia grossa. Esta amostra foi bem misturada, onde não se descartou nenhuma quantidade, a não ser os outros materiais alheios a EGF, visto que as concretagens demandavam grande volume de EGF, além da quantidade necessária para os ensaios de caracterização e uma quantidade reserva de EGF, para suprir a necessidade de alguma repetição de ensaio.

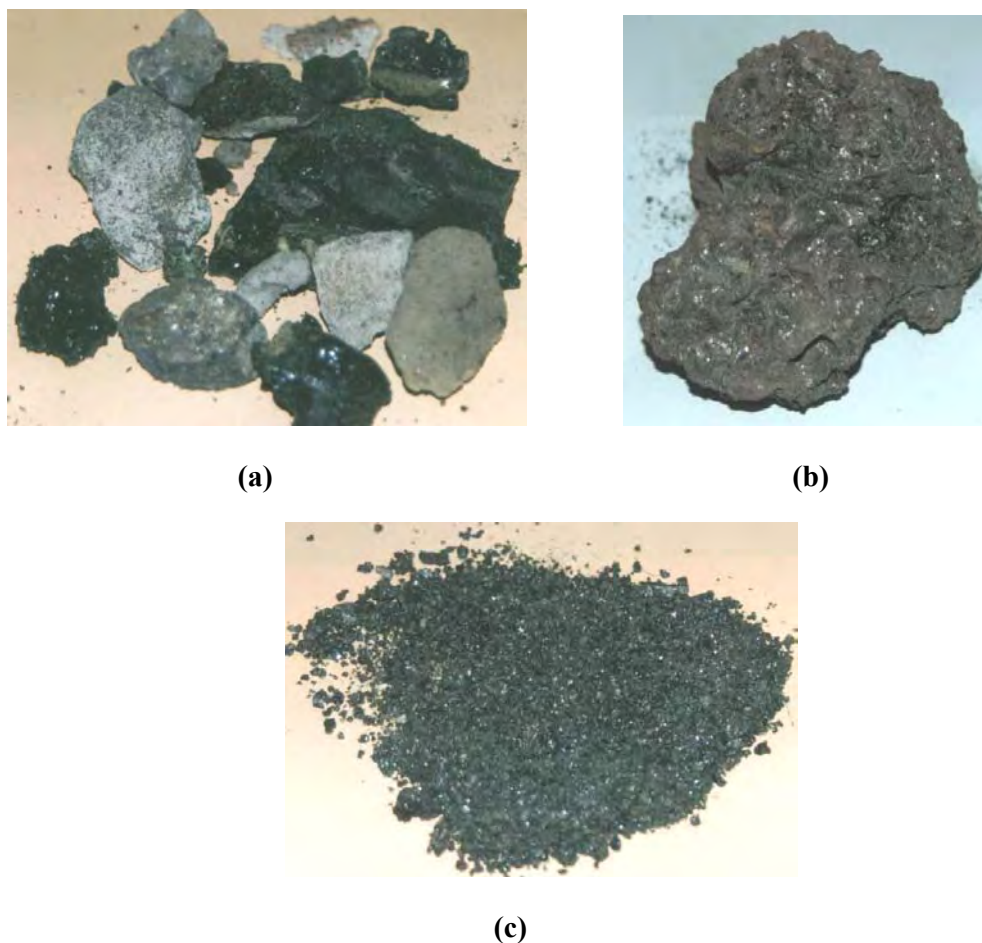


Figura 5.6 Amostras de escória granulada de fundição (EGF) após secagem **a)** outros materiais presentes na EGF **b)** torrão maior de EGF **c)** escória granulada de fundição seca

5.3.2 Beneficiamento da Escória Granulada de Fundição (EGF)

Após a secagem da escória granulada de fundição, até constância de massa, procedeu-se o beneficiamento, preparando-se esta escória para a execução dos ensaios. A moagem da escória foi realizada em moinho de bolas de alumina, marca SERVITECH, modelo ST242, composto por dois jarros, com capacidade de 1000 ml cada um. Na moagem utilizou-se uma relação de 750 gramas de bolas para 500 gramas de EGF em cada jarro. O equipamento utilizado está ilustrado na Figura 5.7.



Figura 5.7 Vista superior do moinho de bolas utilizado para moagem da escória granulada de fundição (EGF)

Conforme argumentações expressas no capítulo 1, item 1.3 (limitações da pesquisa), não foi possível o estudo do tempo ótimo de moagem da escória granulada de fundição, pois este estudo demandaria significativa quantidade de EGF moída. Como já era necessária grande quantidade de escória moída para a confecção de todos os corpos-de-prova de concreto, nos ensaios planejados, ficaria inviável executar os dois projetos experimentais, em função de limitações impostas pelo tempo de projeto de pesquisa e pela pequena capacidade do equipamento de moagem em uso. Sendo assim, utilizou-se como parâmetro de finura para a EGF, o estipulado pela NBR 12653 (1992), que classifica os materiais pozolânicos.

Esta norma (NBR 12653/1992), que estabelece critérios para classificação de materiais pozolânicos, apresenta como uma das exigências físicas, valor máximo de 34% de material retido na peneira #45 μm . Foram selecionados diferentes tempos de moagem (40, 60, 80, 100, 120 minutos) da EGF, no moinho de bolas de capacidade de 1000 ml, sendo determinado o tempo de 40 minutos de moagem da EGF para a execução do projeto experimental. Para este tempo de moagem (40 minutos) da EGF, a porcentagem máxima retida na peneira #45 μm foi de 31,21% , satisfazendo as exigências de norma. Além disso, também obteve-se, para o tempo de 40 minutos de moagem da EGF, tamanho médio dos grãos igual a 26,40 μm . Este percentual, bem como o tamanho médio dos grãos foram obtidos através da análise da distribuição granulométrica da EGF moída, determinada com auxílio de um granulômetro a laser, CILAS, modelo 1064, do Laboratório de Processamento de Minerais (LAPROM), do Centro de Tecnologia da UFRGS. Em anexo (anexo 1 até anexo 6), estão as distribuições granulométricas de cada um dos diferentes tempos de moagem investigados.

É importante acrescentar que também foi verificada a possibilidade de utilização de um moinho de bolas com maior capacidade ($\cong 7,5$ litros), disponível no laboratório. No entanto, verificou-se que para um tempo de moagem de até 3 horas, utilizando-se uma relação de até 8kg de bolas para 2kg de escória granulada de fundição, ainda existiam partículas grosseiras de EGF na amostra moída. Dessa forma, este moinho não foi utilizado no experimento.

Cabe salientar que, através de pesquisas futuras sobre o estudo da finura ótima da EGF, em termos de tamanho médio dos grãos e superfície específica, será possível o aproveitamento máximo de seu potencial para o uso proposto (substituição de parte do cimento em concreto por EGF), chegando-se a melhores resultados quanto ao desempenho da EGF.

A Figura 5.8 ilustra o aspecto da escória granulada de fundição (EGF), moída em moinho de bolas de alumina, com capacidade de 1000 ml, durante o tempo de 40 minutos e, utilizada na execução do projeto experimental.



Figura 5.8 Escória granulada de fundição moída em moinho de bolas (tempo de moagem = 40 minutos), utilizada na realização do projeto experimental

5.3.3 Materiais Utilizados

5.3.3.1 Cimento

Objetivando-se avaliar a influência da substituição de parte do cimento por escória granulada de fundição (EGF) sobre a resistência do concreto, sem a interferência de outras adições pozolânicas, optou-se pela utilização do cimento mais puro e econômico encontrado comercialmente. Desta forma, o cimento utilizado no experimento foi o CP II-F (cimento

Portland Composto com Fíler), que apresenta no máximo 10% de adição de fíler, segundo NBR 11578 (1991).

O cimento CP II-F, classe 32, utilizado apresenta tamanho médio dos grãos igual a 16,67 μm , determinado com auxílio de granulômetro a laser, CILAS, modelo 1064, do Laboratório de Processamento de Minerais (LAPROM), do Centro de Tecnologia da UFRGS. (anexo 7). A Tabela 5.1 apresenta as propriedades físicas e químicas do CP II-F, conforme dados do fabricante.

Tabela 5.1 Propriedades químicas e físicas do CP II-F (cimento Portland Composto com Fíler)

Propriedades Químicas do CP II-F, classe 32		
Principais compostos		Resultados (%)
SiO ₂		19,88
Al ₂ O ₃		4,42
Fe ₂ O ₃		2,73
CaO		64,4
MgO		2,01
SO ₃		2,8
Na ₂ O		0,01
K ₂ O		0,71
CaO Livre		0,92
Perda ao fogo		4,85
Resíduos insolúveis		0,67
Propriedades Físicas do CP II-F, classe 32		
Massa específica (g/cm ³)		3,110
# 325 (%)		15,49
Expansibilidade a quente (mm)		0,00
Tempo de Pega (minutos)	Início	196
	Final	285
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	25,90
	7 dias	31,70
	28 dias	39,70

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante.

A superfície específica do CP II-F, classe 32, foi determinada através do método Blaine (NBR NM 76/1998), pelo laboratório da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), resultando em 3650 cm²/g.

5.3.3.2 Escória Granulada de Fundição (EGF)

A escória granulada de fundição (EGF), obtida através de amostragem descrita no item 5.3.1, proveniente do processo de geração de ferro fundido em forno cubilô, foi caracterizada quanto as suas propriedades físicas, químicas, estrutural, ambiental, bem como avaliação do seu índice de atividade pozolânica, conforme apresentado a seguir.

5.3.3.2.1 Caracterização Química e Estrutural

Composição Química

A composição química da EGF, obtida via fluorescência de Raios-x, realizada com equipamento marca Philips, modelo Simultâneo 2600, é apresentada na Tabela 5.2. O valor de CaO livre, obtido através do ensaio de determinação do óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol (NBR 7227/1989), realizado no Laboratório de Siderurgia (LASID), do Centro de Tecnologia da UFRGS, também encontra-se na Tabela 5.2. O ensaio de perda ao fogo foi realizado de acordo com a NBR 5743 (1977).

Tabela 5.2 Composição química de Escória Granulada de Fundição (EGF)

Principais Compostos (%)	Escória Granulada de Fundição
SiO ₂	49,20
Al ₂ O ₃	10,68
FeO	2,97
CaO	21,78
MgO	11,00
S	0,64
Cr ₂ O ₃	0,05
V ₂ O ₅	0,67
TiO ₂	0,67
MnO	2,81
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

Na Tabela 5.2, observa-se que o somatório das porcentagens de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 está em conformidade com a exigência química determinada pela NBR 12653 (1992), que estabelece no mínimo um somatório igual a 50%, para classificação do material pozolânico e/ou aglomerante (Classe E). Esta mesma norma (NBR 12653/1992) também estabelece como porcentagem máxima de perda ao fogo o valor de 6%, para o material pertencente à Classe E, pozolânico e/ou aglomerante.

Também pode-se observar que predomina maior porcentagem de SiO_2 na composição química da escória, caracterizando-a como ácida. Segundo PIESKE et al. (1980), as escórias são comumente 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. Em fornos cubilô basta considerar a relação CaO/SiO_2 , já que estes óxidos definem o caráter de acidez da escória.

A título ilustrativo, a Tabela 5.3 apresenta um comparativo das composições químicas entre os diferentes materiais cimentícios e/ou pozolânicos. Observa-se que a EGF apresenta alguma semelhança com a escória de alto-forno, com exceção do índice de basicidade.

Tabela 5.3 Comparativo de composições químicas entre diferentes materiais cimentícios e/ou pozolânicos

Principais Compostos (%)	# S Materiais Cimentícios e/ou Pozolânicos									
	Escória Granulada de Fundição - Forno Cubilô	Escória Granulada de Alto-Forno (JOHN, 1995)	Teores observados em Escórias de Alto-Forno (CINCOTTO, 1992)	Silica Ativa (NEVILLE, 1997)	Cinza Volante - Classe F (NEVILLE, 1997)	Escória Granulada de Cobre (MOURA, 2000)	Escória de Aciaria LD Resfriada Lentamente -RL 4 (GUMIERI, 2002)	Escória de Aciaria Granulada - escória de aço carbono (MASUERO, 2001)	Escória de Aciaria (FEA) Redutor Resfriada Lentamente - escória de aço carbono (GEYER, 2001)	Cimento CP I-S (MASUERO, 2001)
SiO ₂	49,20	34,48	30 - 35	93,70	59,40	26,00	13,40	33,50	19,50	19,79
Al ₂ O ₃	10,68	11,49	11 - 18	0,60	22,40	3,30	4,30	8,42	10,51	4,25
Fe ₂ O ₃	-	0,85	0 - 2	0,30	8,90	55,00	-	-	-	2,60
FeO	2,97	-	0 - 2	-	-	-	23,20	0,57	10,63	-
Fe ⁰	-	0,57	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO	2,81	-	-	-	-	0,10	5,20	2,90	-	-
Mn ₂ O ₃	-	1,04	-	-	-	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	0,02	-	-	-	-	-	1,60	0,01	-	-
S	0,64	-	0,5 - 1,5	-	-	-	0,08	0,06	-	-
Cr ₂ O ₃	0,05	-	-	-	-	0,10	0,26	0,40	-	-
V ₂ O ₅	0,67	-	-	-	-	-	-	0,05	-	-
TiO ₂	0,67	0,84	-	-	-	0,50	0,60	0,79	-	-
CaO	21,78	42,72	40 - 45	0,20	2,60	2,00	44,20	45,34	33,33	62,24
MgO	11,00	6,79	2,5 - 9	0,20	1,30	2,70	5,10	8,30	18,58	4,32
Na ₂ O	-	0,28	-	0,20	2,20	1,10	<0,01	0,001	0,05	-
K ₂ O	-	0,42	-	0,50	-	0,60	0,09	0,06	0,32	-
SO ₃	-	0,02	-	-	2,40	-	-	-	0,32	2,47
Fe ₃ O ₄	-	-	-	-	-	7,00	-	-	-	-
CuO	-	-	-	-	-	1,40	-	-	-	-
ZnO	-	-	-	-	-	1,00	-	-	-	-
As ₂ O ₃	-	-	-	-	-	0,10	-	-	-	-
SnO ₂	-	-	-	-	-	0,10	-	-	-	-
MnO ₃	-	-	-	-	-	0,40	-	-	-	-
PbO	-	-	-	-	-	0,10	-	-	-	-
CaF ₂	-	-	-	-	-	-	1,60	-	-	-
CaSO ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	0,54	-
Resíduo Insolúvel	-	0,22	-	-	-	-	-	-	-	0,52
CaO livre	-	-	-	-	-	-	1,70	-	0,80	2,69
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	62,85	46,82	≠ 46,00	94,60	90,70	84,30	40,90	42,49	40,64	26,64
(%CaO) / (%SiO ₂)	0,4427	1,2390	≠ 1,30	0,0021	0,0438	0,0769	3,2985	1,3534	1,7092	3,1450

Difração de Raios-x

A Figura 5.9 apresenta o difratograma de raios-x da EGF (escória granulada de fundição utilizada nesta pesquisa), obtido através de um difratômetro marca SIEMENS, modelo D5000, realizado no Instituto de Física da UFRGS. Pode-se observar que a EGF apresenta estrutura amorfa (vítrea), resultante do resfriamento brusco (também chamado de granulação) que sofreu durante seu vazamento para o canal com fluxo de água.

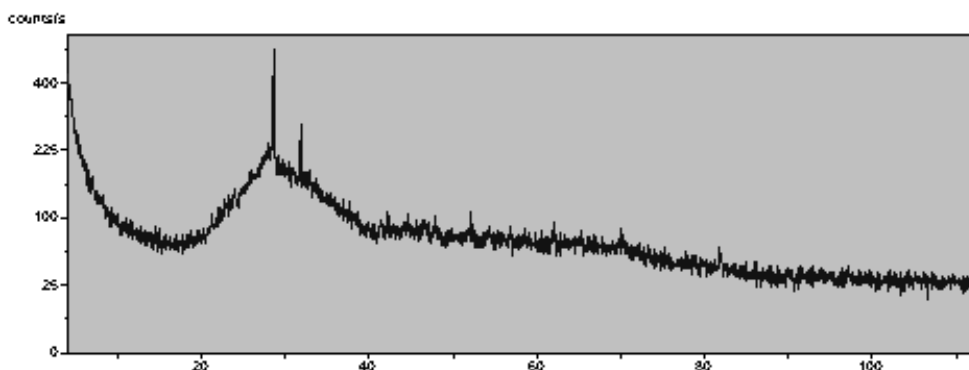


Figura 5.9 Difratograma de raios-x da escória granulada de fundição (CECCATTO et al., 2002)

Índice de Vitrificação

O grau de vitrificação da escória granulada de fundição foi obtido segundo o método “Mac Master”, sendo realizado pelo laboratório da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). O resultado do grau de vitrificação da EGF foi de 97% (anexo 8).

Através da verificação do grau de vitrificação, com microscópio óptico de luz transmitida, pode-se indicar o potencial hidráulico do material, sendo sua tonalidade importante, pois quanto mais escuro, menor será sua potencialidade hidráulica, e conseqüentemente menor será o índice de vitrificação. Também destaca-se, nesta análise, a compacidade do material, visto que quanto mais poroso, mais vítreo e portanto mais reativo será (CINCOTTO et al., 1992).

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) por Elétrons Secundários

Realizou-se análise microestrutural de amostras de escória granulada de fundição não beneficiada e beneficiada (moída). A análise de microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários foi realizada em microscópio eletrônico de marca PHILIPS, modelo XL200, com espectrômetro por dispersão de energia (EDS – Energy Dispersive Spectrometry)) acoplado. Este equipamento localiza-se no Laboratório de Metalurgia Física

(LAMEF) da Escola de Engenharia da UFRGS. Nesta análise, as amostras foram coladas em base metálica e recobertas com carbono. A Figura 5.10 apresenta as micrografias da escória granulada de fundição não beneficiada. Na Tabela 5.4, pode-se observar a composição química indicativa obtida via EDS, das regiões identificadas na Figura 5.10.

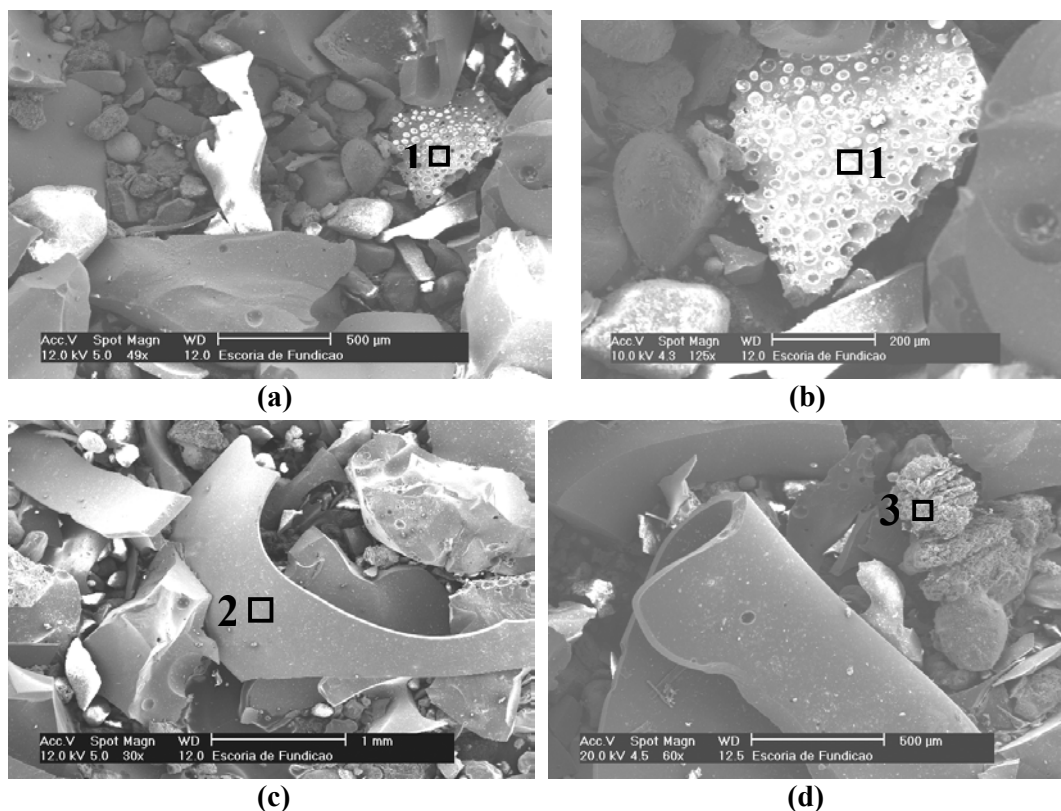


Figura 5.10 Micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários da escória granulada de fundição não beneficiada **a)** magnitude de 50x **b)** 125x **c)** 30x **d)** 60x. Os números 1, 2 e 3 mostram as áreas submetidas à análise por EDS.

Tabela 5.4 Análise indicativa por EDS da amostra de escória granulada de fundição não beneficiada (Figura 5.10)

Elemento	Composição Química (%)		
	Área 1	Área 2	Área 3
O	48,62	45,34	32,33
Mg	9,42	8,85	-
Al	8,37	7,87	9,52
Si	24,26	21,64	23,64
Ca	6,88	5,42	1,18
Mn	-	2,48	-
Fe	2,46	8,39	30,91
K	-	-	2,43
Total	100	100	100

De acordo com Figura 5.10, observa-se que a escória granulada de fundição não beneficiada apresenta aspecto bastante heterogêneo, com grãos de diferentes formas e tamanhos. A composição química indicativa para os diferentes tipos de grãos apresentou relativa variação entre as regiões de análise, indicadas na Figura 5.10.

As micrografias da escória granulada de fundição beneficiada estão ilustradas na Figura 5.11. A Tabela 5.5 apresenta a composição química indicativa obtida via EDS, das regiões 4 e 5 apontadas na Figura 5.11.

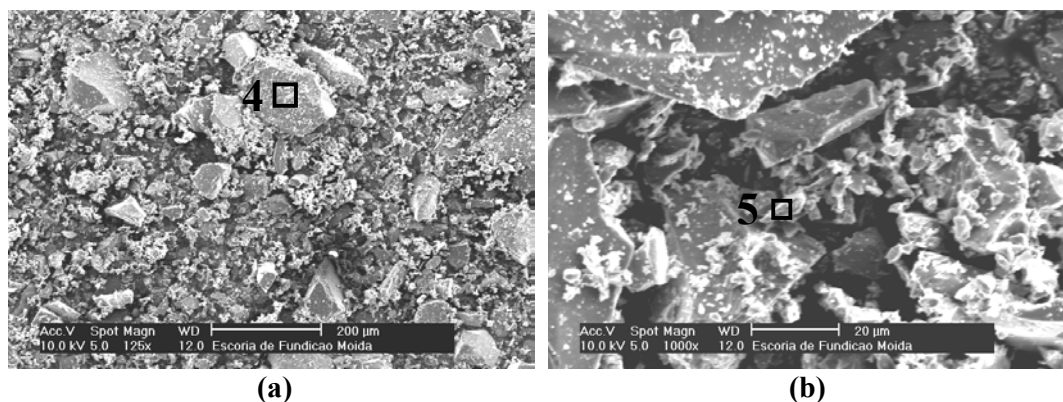


Figura 5.11 Micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários da escória granulada de fundição beneficiada **a)** magnitude de 125x **b)** 1000x. Os números 4 e 5 mostram as áreas submetidas à análise por EDS.

Tabela 5.5 Análise indicativa por EDS da amostra de escória granulada de fundição beneficiada (Figura 5.11)

Elemento	Composição Química (%)	
	Área 4	Área 5
O	32,2	27,68
Mg	8,44	8,71
Al	7,75	9,77
Si	22,59	31,94
Ca	9,2	16,18
Mn	6,17	2,16
Fe	13,64	3,57
Total	100	100

A Figura 5.11 mostra uma maior homogeneidade na distribuição de grãos da amostra moída, quando comparado com a amostra de escória granulada de fundição não beneficiada,

apresentada na Figura 5.10. Entretanto, as composições químicas indicativas das regiões 4 e 5 também apresentam variação em alguns elementos destas regiões de análise.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) por Elétrons Retroespalhados

A análise de microscopia eletrônica de varredura por elétrons retroespalhados foi realizada em amostras de escória granulada de fundição não beneficiada. Nesta análise também utilizou-se microscópio eletrônico de marca PHILIPS, modelo XL200, com espectrômetro por dispersão de energia (EDS) acoplado. As amostras foram embutidas em resina e recobertas com carbono.

Observa-se, conforme Figura 5.12a, que a escória granulada de fundição apresenta pequenas microfissuras ao longo de toda a amostra. Estas microfissuras resultam provavelmente do resfriamento brusco ao qual esta escória foi submetida, durante seu vazamento na calha com fluxo contínuo de água. A presença de microfissuras, observadas através de análise microestrutural da EGF, pode explicar sua característica friável, o que facilita seu processo de moagem. A Tabela 5.6 apresenta pequena variação na composição química indicativa dos elementos localizados nas regiões 6 e 7, conforme Figura 5.12b.

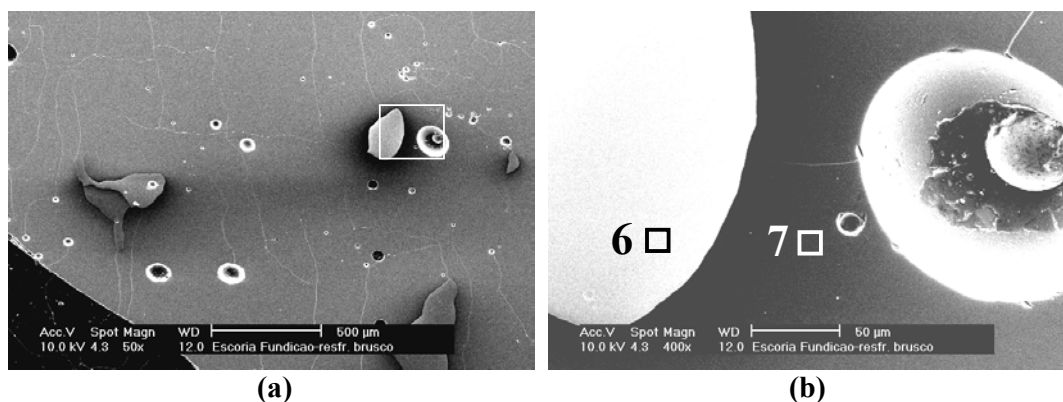


Figura 5.12 Micrografia eletrônica de varredura por elétrons retroespalhados da escória granulada de fundição não beneficiada **a)** magnitude de 50x **b)** 400x. Os números 6 e 7 mostram as áreas submetidas à análise por EDS.

Tabela 5.6 Análise indicativa por EDS da amostra de escória granulada de fundição não beneficiada (Figura 5.12)

Elemento	Composição Química (%)	
	Área 6	Área 7
O	34,17	27,58
Mg	4,38	9,01
Al	7,89	12,44
Si	34,87	34,93
Ca	18,69	16,05
Total	100	100

5.3.3.2.2 Caracterização Física

Composição Granulométrica

A composição granulométrica da escória granulada de fundição (EGF) não beneficiada, bem como, módulo de finura e dimensão máxima característica foram obtidos através da realização do ensaio prescrito pela NBR 7217 (1987), sendo apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 Composição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima característica da escória granulada de fundição (EGF)

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)		4,8
Módulo de finura		3,84

O módulo de finura é definido como a soma das porcentagens retidas acumuladas em cada uma das peneiras da série normal, sendo a soma dividida por 100. Sabe-se que o valor do módulo de finura é tanto maior quanto mais graúdo for o agregado (NEVILLE, 1997). Segundo a NBR 7211 (1983), que classifica os agregados de acordo com a faixa

granulométrica a qual pertencem, observa-se que a escória granulada de fundição não beneficiada possui dimensões granulométricas próximas a uma areia grossa (Zona 4).

Massa Específica Absoluta

A massa específica absoluta da escória granulada de fundição (EGF) foi determinada para duas situações: para a EGF não beneficiada e para EGF beneficiada, ou seja moída, conforme apresentado no item 5.3.2.

Como a escória granulada de fundição não beneficiada apresentou dimensões granulométricas próximas a uma areia grossa, utilizou-se para o ensaio de sua massa específica, o mesmo ensaio utilizado para areia, conforme especificado pela NBR 9776 (1987). Já para a EGF beneficiada (moída), utilizou-se o ensaio prescrito pela NBR 6474 (1984), que determina a massa específica do cimento Portland e outros materiais em pó. Os resultados são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 Resultados de massa específica absoluta da escória granulada de fundição (EGF) não beneficiada e beneficiada

Amostra	Massa específica absoluta (g/cm³)
Escória granulada de fundição não beneficiada	2,769
Escória granulada de fundição beneficiada	2,830

Observa-se que o valor de massa específica absoluta da EGF não beneficiada é ligeiramente inferior à massa específica absoluta da EGF beneficiada. A diferença entre os resultados das duas amostras (não-beneficiada e beneficiada) de escória granulada de fundição deve-se à existência de poros no material não beneficiado (não moído). Neste caso uma massa menor deste material ocupa o mesmo volume que o material onde ocorreu o beneficiamento (moagem), resultando num valor de massa específica absoluta ligeiramente inferior ao da escória granulada de fundição moída. Dependendo da aplicação dada ao material (se em pó ou na sua granulometria original), a determinação da massa específica absoluta do material deve expressar sua real condição de uso, ou seja, se como material beneficiado ou não.

Massa Específica Aparente ou Massa Unitária

A massa específica aparente ou unitária consiste na massa de partículas de material que ocupam uma unidade de volume, considerando-se os espaços vazios existentes entre as mesmas. Seu valor é relativo ao volume ocupado por ambas partículas do material e vazios (MEHTA e MONTEIRO, 1994). O resultado de massa específica aparente ou unitária é comumente utilizado para cálculos onde o volume ocupado pelas partículas soltas pode ser significativo, como no caso de transporte ou depósito de materiais. A massa específica aparente ou unitária da escória granulada de fundição (EGF) não beneficiada foi determinada conforme prescrição da NBR 7251 (1982), resultando em $1,314 \text{ g/cm}^3$.

Superfície Específica

A superfície específica da escória granulada de fundição (EGF) beneficiada foi determinada através do método Blaine (NBR NM 76/1998), pelo laboratório da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). O resultado obtido foi de $2280 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Tamanho Médio dos Grãos

Conforme discutido no item 5.3.2, o tamanho médio dos grãos da escória granulada de fundição (EGF) beneficiada (moída) foi determinado através da análise da distribuição granulométrica, com auxílio de um granulômetro a laser, CILAS, modelo 1064, do Laboratório de Processamento de Minerais (LAPROM), do Centro de Tecnologia da UFRGS, resultando em $26,40 \text{ }\mu\text{m}$ (tempo de moagem = 40 minutos), o que consta no anexo 1.

5.3.3.2.3 Caracterização Ambiental

De acordo com o item 2.4, é fundamental a análise da classificação ambiental de um resíduo antes de sua aplicação, bem como a classificação ambiental do produto onde este resíduo foi empregado, a fim de verificar a migração de elementos prejudiciais ao meio ambiente. Atualmente, a classificação ambiental é um grande limitador quando analisam-se as possibilidades de reciclagem de um determinado resíduo.

Embora no item 2.4 tenham sido apresentadas algumas limitações dos ensaios de avaliação ambiental utilizados tradicionalmente, estes ensaios (NBR 10005/1987 e NBR 10006/1987) são atualmente reconhecidos pelos órgãos ambientais de fiscalização, no Brasil, como os ensaios determinantes da classificação ambiental do resíduo ou produto. Sendo assim, consideram-se estes ensaios (neste projeto de pesquisa), de solubilização prescrito pela NBR 10006 (1987) e de lixiviação, especificado pela NBR 10005 (1987), cujos limites máximos admitidos nos extratos lixiviados e solubilizados estão expressos pela NBR 10004 (1987), que classifica os resíduos sólidos.

Segundo laudo realizado por empresa credenciada junto a FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental) e contratada pela empresa (onde realizou-se a coleta das amostras para esta pesquisa), a escória granulada de fundição (EGF) é classificada ambientalmente, de acordo com NBR 10004 (1987), como resíduo inerte (Classe III), o que representa grande vantagem na sua aplicação em um novo produto. O laudo com análise completa encontra-se no anexo 9.

5.3.3.2.4 Índice de Atividade Pozolânica

Atividade Pozolânica – Método Físico

A partir do ensaio de índice de atividade pozolânica, prescrito pela NBR 5752/1992 (materiais pozolânicos: determinação da atividade pozolânica com cimento Portland), pode-se verificar a potencialidade da reação da escória granulada de fundição com o cimento Portland, objetivando sua utilização como substituição de parte do cimento em argamassas ou concretos.

O ensaio consiste basicamente na preparação de corpos-de-prova cilíndricos (50mm x 100mm) de argamassas, produzindo-se dois traços diferentes de argamassa, sendo um deles referência, somente com cimento Portland comum, e outro com 35% do volume de cimento substituído por material pozolânico, sendo que no caso deste projeto de pesquisa, utilizou-se escória granulada de fundição. As quantidades de materiais estão especificadas na NBR 5752 (1992), e a quantidade de água é determinada por tentativas, até a mistura atingir consistência igual a 225 ± 5 mm, obtida conforme NBR 7215 (1996).

Os materiais utilizados neste ensaio (NBR 5752/1992), para a moldagem das argamassas, foram: cimento Portland comum, CP I, conforme prescrito na NBR 5732 (1991);

areia normal, de acordo com a NBR 7214 (1990), comercializada pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo) e escória granulada de fundição beneficiada, ou seja, moída durante 40 minutos, como apresentado no item 5.3.2. A mistura dos materiais segue as recomendações prescritas pela NBR 7215 (1996).

Após a moldagem das argamassas, estas são curadas, ainda nos moldes, durante 24 horas, em câmara úmida à temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$. Posteriormente é feita a desmoldagem, e as argamassas são dispostas em recipientes hermeticamente fechados, acondicionados à temperatura de $38\pm 2^{\circ}\text{C}$, durante 27 dias. Após este período executa-se a ruptura destas argamassas, seguindo as recomendações da NBR 7215 (1996), para verificação da resistência à compressão das mesmas.

O índice de atividade pozolânica da EGF é obtido pela relação em porcentagem das resistências médias, aos 28 dias de idade, de corpos-de-prova de argamassa com EGF mais cimento Portland e de corpos-de-prova de argamassa somente com cimento Portland (argamassa referência). Os resultados são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 Resultados do ensaio de índice de atividade pozolânica da escória granulada de fundição (EGF) com cimento Portland

	Argamassa Referência (somente com CP I)	Argamassa com CP I + EGF (35% em volume)	Especificações NBR 12653 (1992)
água/aglomerante (a/agl.)	0,474	0,486	-
Consistência (mm)	221,0	223,5	225 ± 5
Água requerida (%)	100	99,3	<110
Resistência média aos 28 dias (MPa)	42,91	38,10	-
Índice de atividade pozolânica (%)	100	88,8	≥ 75

De acordo com a NBR 12653 (1992), que classifica os materiais pozolânicos, o índice de atividade pozolânica mínimo é de 75%. Como pode ser observado na Tabela 5.9, a escória granulada de fundição beneficiada apresentou índice de atividade pozolânica igual a 88,8%, satisfazendo este critério físico determinado pela NBR 12653 (1992).

Atividade Pozolânica – Método Químico

O método químico de ensaio da atividade pozolânica é estabelecido pela NBR 5753 (1991), que prescreve o método de determinação da atividade pozolânica em cimento Portland pozolânico. Adaptando-se este ensaio para o caso da escória granulada de fundição, a amostra utilizada no ensaio foi obtida misturando-se 35% de escória granulada de fundição com 65% de cimento Portland comum, em volume. Segundo a NBR 5753 (1991), a relação entre o teor óxido de cálcio (CaO) da solução em contato com o cimento (milimoles CaO/litro) e a alcalinidade total da solução em contato com o cimento hidratado (milimoles OH⁻/litro), expressa a atividade pozolânica do material.

Este ensaio foi realizado pela CIENTEC/RS (Fundação de Ciência e Tecnologia), sendo que a amostra foi considerada não pozolânica. O relatório deste ensaio encontra-se no anexo 10. Cabe salientar que este ensaio deve ser testado também com a EGF após estudo do tempo ótimo de moagem (ver item 1.3).

Algumas controvérsias ainda existem no meio científico quanto à eficácia deste ensaio de avaliação do índice de atividade pozolânica (método químico). MASUERO (2001), por exemplo, na pesquisa com escória de aciaria elétrica como adição ao cimento, ao abordar o ensaio de avaliação do índice de atividade pozolânica pelo método químico, cita autores como Massazza, Takemoto e Uchikama, Regourd et al. que lançam críticas a respeito deste método. Segundo Massazza (1974), Takemoto e Uchikama (1980) apud METHA (1987) não existe relação entre dados dos testes de avaliação do índice de atividade pozolânica pelo método químico e método físico, visto que a resistência das argamassas está diretamente relacionada à microestrutura da pasta de cimento hidratada, podendo inclusive, conforme Regourd et al. (1981) apud METHA (1987), existirem duas pozolanas com mesma capacidade de fixação de óxido de cálcio, sem, contudo, apresentarem microestrutura similar.

5.3.3.3 Agregados

Os concretos foram confeccionados utilizando agregados miúdo (areia) e graúdo (brita) da região. A composição granulométrica, módulo de finura, bem como dimensão máxima característica da areia foram obtidos através da realização do ensaio prescrito pela NBR 7217 (1987). A mesma norma (NBR 7217/1987) também prescreve o método para determinação da composição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima característica da brita. Os

resultados destes ensaios, da areia e brita, encontram-se na Tabela 5.10 e Tabela 5.11, respectivamente. A brita utilizada nas concretagens foi peneirada, empregando-se apenas o material passante na peneira de abertura de 19 mm.

De acordo com a NBR 7211 (1983), a areia é classificada como areia de graduação média, (Zona 3). A graduação da brita foi classificada, conforme a mesma norma (NBR 7211/1983), como brita 1.

A massa específica da areia, obtida conforme especificações da NBR 9776 (1987), resultou em $2,626 \text{ g/cm}^3$. Quanto à brita, segundo prescrição da NBR 9937 (1987), obtiveram-se neste ensaio, o valor de $2,81 \text{ g/cm}^3$ e 1,67%, como resultados de sua massa específica e absorção, respectivamente.

Tabela 5.10 Composição granulométrica e características físicas da areia

Peneira (mm)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)
4,80	0	0
2,40	5	5
1,20	16	21
0,60	31	52
0,30	40	92
0,15	8	100
< 0,15	0	100
Dimensão máxima característica (mm)		4,80
Módulo de finura		2,69

Tabela 5.11 Composição granulométrica e características físicas da brita

Peneira (mm)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)
19	0	0
12,5	61	61
9,5	28	89
6,3	9	98
4,8	1	99
< 4,80	1	100
< 0,15	0	100
Dimensão máxima característica (mm)		19,00
Módulo de finura		6,88

5.3.4 Ajuste da Curva de Dosagem

Utilizou-se o método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992), na elaboração da dosagem experimental deste projeto de pesquisa. Neste método, o diagrama de dosagem (constituído por quatro eixos representados pela resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade, relação água/aglomerante, traço unitário e consumo de cimento) é obtido através da determinação experimental de pelo menos três pontos da curva de dosagem.

Desta forma, foram selecionados três traços, representantes dos três pontos da curva de dosagem, sendo eles: um traço intermediário, $1:5$ (cimento : agregados secos totais, em massa); um traço rico em cimento, $1:3,5$ (cimento : agregados secos totais, em massa) e um traço pobre em cimento, $1:6,5$ (cimento : agregados secos totais, em massa).

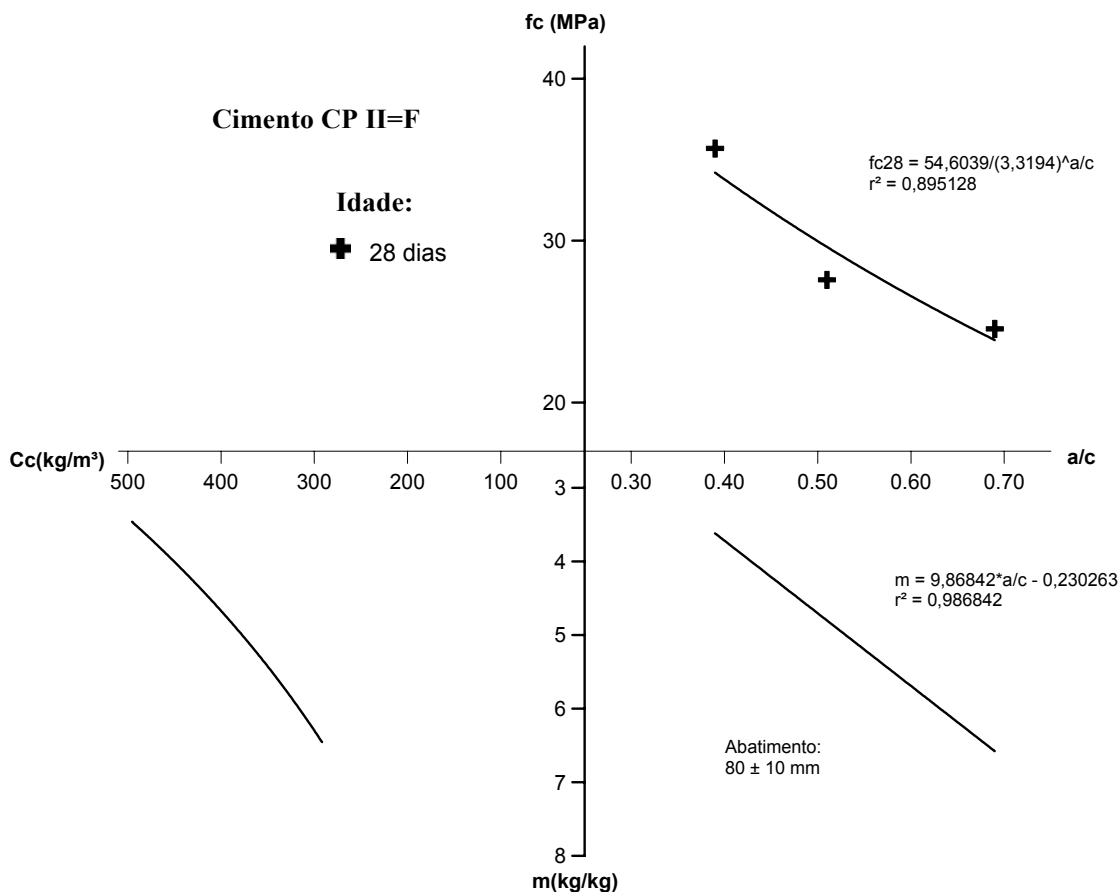
O teor ideal de argamassa foi então determinado experimentalmente, utilizando-se os materiais descritos no item 5.3.3 (cimento, agregados e água), seguindo-se o procedimento recomendado pelo método IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992). Através do traço intermediário $1:5$, define-se, por tentativas e observações práticas, o teor de argamassa que proporciona o melhor acabamento. A determinação do teor mínimo de argamassa no concreto produz uma mistura adequada para lançamento na fôrma, com menos riscos de fissuração de origem térmica ou retração por secagem (HELENE e TERZIAN, 1992).

Fixou-se a consistência do concreto em 80 ± 10 mm, medido através do ensaio de abatimento do tronco de cone (NBR 7223/1992). O teor de argamassa encontrado experimentalmente para este projeto foi de 53%, resultando numa relação água/cimento igual a 0,51.

Sabendo-se o valor do teor de argamassa (igual a 53%), e considerando-se o mesmo abatimento de 80 ± 10 mm, determinou-se a relação água/cimento para os traços auxiliares, $1:3,5$ e $1:6,5$. Após a concretagem de cada um dos traços, intermediário ($1:5$) e auxiliares ($1:3,5$ e $1:6,5$), foram moldados corpos-de-prova cilíndricos (9,5 cm x 19 cm) de concreto (2 corpos-de-prova para cada traço), obtendo-se as resistências à compressão aos 28 dias, de cada um dos traços executados, a fim de completar o diagrama de dosagem. A Tabela 5.12 apresenta, resumidamente, os resultados obtidos neste ajuste da curva de dosagem. O diagrama de dosagem pode ser observado na Figura 5.13.

Tabela 5.12 Resultados do ajuste da curva de dosagem experimental

Traço unitário (<i>l:m</i>) (kg/kg)	Relação água/cimento (a/c)	fc ₂₈ Médio (MPa)	Consumo _{cimento} (kg/m ³)
1:3,5	0,39	35,69	495,5
1:5	0,51	27,58	371,9
1:6,5	0,69	24,55	291,8

**Figura 5.13** Diagrama de dosagem

5.3.5 Determinação dos Traços e Quantidade de Materiais Utilizados na Produção dos Concretos

Conforme apresentado no item 5.2.3 (modelo estatístico e matriz experimental), através do projeto fatorial cruzado completo, determinaram-se as diferentes combinações entre os fatores controláveis, definindo-se a matriz experimental do projeto de pesquisa.

Sendo assim, a matriz experimental completa pode ser executada através da realização de 12 concretagens. Cada uma das 12 concretagens apresenta traço unitário distinto, resultante

das diferentes combinações entre a relação água/aglomerante e teor de substituição de cimento por EGF. Nas repetições, estes 12 traços unitários são reproduzidos integralmente, totalizando 36 concretagens, para o projeto experimental completo.

Após o ajuste da curva de dosagem, conforme item 5.3.4, através do diagrama de dosagem, foi possível a determinação dos traços (proporcionamento da mistura) dos concretos utilizados neste projeto experimental, para a investigação das propriedades mecânicas dos mesmos. A Figura 5.14 e Figura 5.15 apresentam os traços desdobrados para cada uma das 12 concretagens, bem como a quantidade de material utilizado em cada uma destas concretagens.

Durante a execução dos traços de concreto (produção dos concretos), observou-se em alguns traços que para a quantidade de água calculada, o abatimento superava o intervalo estipulado como constante, de 80 ± 10 mm, sendo necessário reduzir a água utilizada na concretagem para respeitar este critério. Sendo assim, como pode ser observado na Figura 5.14 e Figura 5.15, colunas hachuradas, a relação a/c (água/cimento) ou $a/agl.$ (água/aglomerante) mudou nestes casos. Esta situação pode ter sido causada por diferenças climáticas, de temperatura e umidade, entre os dias de ajuste da curva de dosagem e de produção dos concretos para os ensaios mecânicos. Desta forma, para os casos onde houve redução de fatores a/c ou $a/agl.$, as repetições foram executadas mantendo este valor alterado, para garantir a exata reprodução dos traços. No anexo 11 encontram-se as tabelas utilizadas no planejamento e execução das moldagens dos concretos, realizadas durante o decorrer de um mês.

A substituição de cimento por escória granulada de fundição (EGF), como especificado no item 5.2.2, 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 seguinte:

$$m_{EGF} = \gamma_{EGF} \cdot TE \cdot \frac{m_c}{\gamma_c} \quad (5.1)$$

onde:

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

γ_{EGF} = massa específica da escória granulada de fundição (kg/dm^3);

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

m_c = massa de cimento (kg);

γ_c = massa específica do cimento (kg/dm^3).

Cálculo dos Traços:

Curva de Desagum: $m = 9,86842$ (a/c) - 0,230263 (para CP II - F)

m_c (CP II-F) = $3,110 \text{ g/cm}^3$

m_e (EGF) = $2,830 \text{ g/cm}^3$

$m_{areia} = 2,626 \text{ g/cm}^3$

$m_{brita} = 2,81 \text{ g/cm}^3$

Teor de Argamassa = 53% (obtido experimentalmente)

Referência - 0% de EGF

a/c	m	Traço Unitário			Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita Peneirada 19mm (kg)	Água (kg)	Consumo Cimento (kg/m³)	a/c
		cimento	a	p						
0,40	3,72	1	1,50	2,22	11,73	17,59	26,00	4,6909	475,791	0,40
0,55	5,20	1	2,28	2,91	8,93	20,39	26,00	4,9094	363,622	0,502
0,70	6,68	1	3,07	3,61	7,21	22,11	26,00	5,0437	290,237	0,664

10% de EGF

a/agl	m	Traço Unitário			Cimento (kg)	EGF (kg)	Areia (kg)	Brita Peneirada 19mm (kg)	Água (kg)	Consumo Material Aglomerante (kg/m³)	Consumo EGF (kg/m³)	Consumo Cimento (kg/m³)	Água (kg)	a/agl.
		cimento	EGF	a										
0,40	3,72	0,9	0,09100	1,50	2,22	10,55	1,07	17,59	26,00	4,6487	43,607	435,605	4,4720	0,385
0,55	5,20	0,9	0,09100	2,28	2,91	8,03	0,81	20,39	26,00	4,8652	33,028	329,934	4,4866	0,507
0,70	6,68	0,9	0,09100	3,07	3,61	6,48	0,66	22,11	26,00	4,9983	26,311	262,835	4,7380	0,664

Figura 5.14 Traços e quantidades de materiais utilizados na produção dos concretos referência e com 10% de substituição de cimento por EGF (a/c = relação água/cimento; a/agl. = relação água/aglomerante; EGF = escória granulada de fundição)

Cálculo dos Traços:

Curva de Dosagem

$$m = 9,86842 \cdot (a/c) - 0,230263 \quad (\text{para CP II - F})$$

$$m_c (\text{CP II-F}) = 3,110 \text{ g/cm}^3$$

$$m_e (\text{EGF}) = 2,830 \text{ g/cm}^3$$

$$m_{\text{areia}} = 2,626 \text{ g/cm}^3$$

$$m_{\text{brita}} = 2,81 \text{ g/cm}^3$$

Teor de Argamassa = 53% (obtido experimentalmente)

30% de EGF

a/agl.	m	Traço Unitário			Cimento (kg)	EGF (kg)	Areia (kg)	Brita Peneirada 19mm (kg)	Água (kg)	Consumo Material Aglomerante (kg/m ³)	Consumo EGF (kg/m ³)	Consumo Cimento (kg/m ³)	Água (kg)	a/agl.
		cimento	a	p										
0,40	3,72	0,7	0,27299	1,50	2,22	17,59	26,00	4,5642	476,018	129,948	346,070	4,5608	0,399	
0,55	5,20	0,7	0,27299	2,28	2,91	20,39	26,00	4,7768	361,780	98,763	263,018	4,4880	0,516	
0,70	6,68	0,7	0,27299	3,07	3,61	22,11	26,00	4,9074	287,567	78,503	209,064	4,7964	0,683	

50% de EGF

a/agl.	m	Traço Unitário			Cimento (kg)	EGF (kg)	Areia (kg)	Brita Peneirada 19mm (kg)	Água (kg)	Consumo Material Aglomerante (kg/m ³)	Consumo EGF (kg/m ³)	Consumo Cimento (kg/m ³)	Água (kg)	a/agl.
		cimento	a	p										
0,40	3,72	0,5	0,45498	1,50	2,22	5,34	26,00	4,4798	479,441	218,138	261,303	4,3160	0,384	
0,55	5,20	0,5	0,45498	2,28	2,91	4,06	26,00	4,6884	357,384	162,604	194,780	4,7030	0,55	
0,70	6,68	0,5	0,45498	3,07	3,61	3,28	26,00	4,8166	266,168	130,202	155,966	4,8320	0,7	

Figura 5.15 Traços e quantidades de materiais utilizados na produção dos concretos com 30% e 50% de substituição de cimento por EGF (a/agl. = relação água/aglomerante; EGF = escória granulada de fundição)

5.3.6 Produção dos Concretos (referência e com EGF)

A mistura dos materiais constituintes de cada traço de concreto foi realizada através da utilização de uma betoneira de eixo vertical, com capacidade de até 30 litros, previamente imprimada com argamassa. A consistência do concreto (*slump*) foi mantida constante e igual a 80 ± 10 mm (medida através do método de abatimento do tronco de cone, NBR 7223/1992), como fator de controle dos concretos referência e concretos com EGF como substituição de parte do cimento.

Os materiais utilizados em cada concretagem (betonada) foram (conforme item 5.3.3):

- concretos Referência: brita, areia, cimento, água;
- concretos com EGF: brita, areia, cimento, escória granulada de fundição (EGF) em diferentes teores, água.

A ordem de colocação dos materiais na betoneira seguiu o procedimento seguinte, sendo primeiramente colocada toda a quantidade de brita, em seguida aproximadamente metade da quantidade de água, após adicionou-se o cimento ou cimento e escória granulada de fundição (para os traços que possuem substituição de parte do cimento por EGF), juntamente com o restante de água, e por fim areia.

Após a mistura destes materiais, realizou-se a verificação da consistência (*slump*) do concreto, conforme ilustrado na Figura 5.16a (NBR 7223/1992). A fluidez do concreto é uma característica importante para permitir o lançamento do concreto fresco. Segundo NEVILLE (1997), é essencial que a consistência da mistura de concreto seja tal que o mesmo possa ser transportado, lançado, adensado e acabado com suficiente facilidade e sem segregação. Além disso, a resistência do concreto também é influenciada pelo grau de adensamento do concreto.

O adensamento do concreto foi efetuado utilizando um vibrador de imersão, como ilustrado na Figura 5.16b, seguindo os procedimentos prescritos pela NBR 5738 (1994).

Após aproximadamente 24 horas, quando os corpos-de-prova (CP's) cilíndricos e prismáticos já podiam ser desformados, estes foram acondicionados em câmara úmida, com temperatura igual a $23\pm 1^\circ\text{C}$ e umidade $\geq 95\%$, onde permaneceram curando até a idade correspondente de ensaio mecânico de cada um dos CP's.

Conforme detalhado no item 5.2.3, a matriz experimental é composta por 12 concretagens, que após as repetições resultam num total de 36 concretagens. Em cada

concretagem foram moldados 9 corpos-de-prova (CP's), dos quais 6 cilíndricos (9,5 cm x 19 cm) e 3 prismáticos (10 cm x 10 cm x 35 cm). Devido ao elevado número de concretagens, estas foram subdivididas em blocos de 6 concretagens, realizadas num turno do dia. A Figura 5.17 ilustra a quantidade de corpos-de-prova cilíndricos (9,5 cm x 19 cm) e prismáticos (10 cm x 10 cm x 35 cm) equivalente a 6 concretagens, produzidos num turno.



Figura 5.16 a) medição da consistência do concreto através do ensaio de abatimento do tronco de cone b) adensamento dos corpos-de-prova de concreto, utilizando-se vibrador de imersão



Figura 5.17 Corpos-de-prova produzidos durante a execução de 6 diferentes traços de concreto (6 concretagens)

5.3.7 Métodos de Ensaio

5.3.7.1 Propriedades Mecânicas

Os ensaios mecânicos foram realizados em uma prensa de marca SHIMADZU, modelo UH2000kN, com capacidade entre 40 a 2000kN (4 a 200 toneladas), localizada no LEME (Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais) da Escola de Engenharia da UFRGS.

5.3.7.1.1 Resistência à Compressão Uniaxial

O método de ensaio de resistência à compressão do concreto segue as determinações da norma NBR 5739 (1994), e consiste basicamente na aplicação controlada de uma carga vertical centrada na face do corpo-de-prova (CP) cilíndrico de concreto, de dimensões 9,5 cm x 19 cm, sendo este CP disposto entre os pratos de compressão da máquina de ensaio.

Previamente à execução do ensaio, o corpo-de-prova (CP) é capeado com enxofre, conforme prescrição da NBR 5738 (1994), garantindo-se uma superfície lisa e livre de saliências que possam concentrar tensões durante a ruptura, prejudicando o ensaio. A Figura 5.18 ilustra a realização do ensaio de resistência à compressão uniaxial, em um dos 108 corpos-de-prova cilíndricos (9,5 cm x 19 cm) de concreto submetidos a este ensaio.

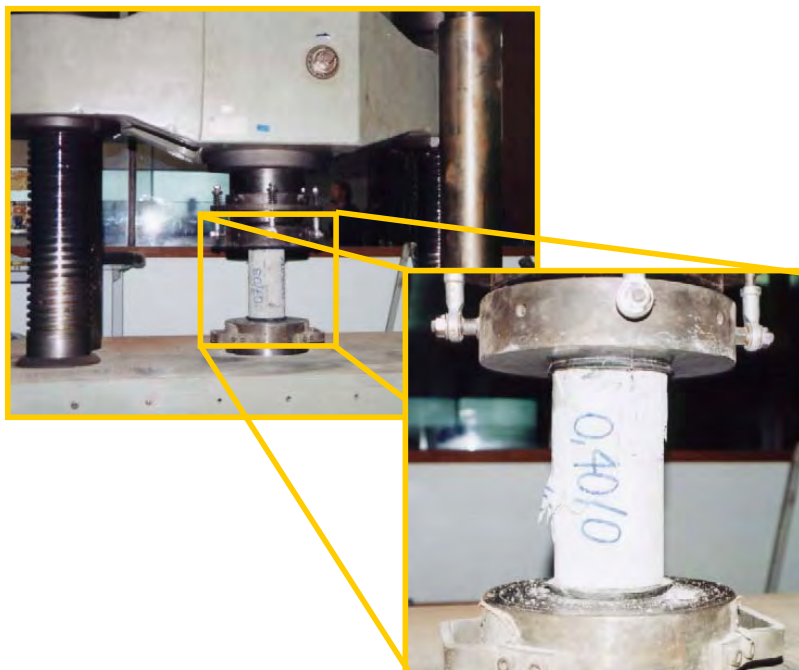


Figura 5.18 Ensaio de resistência à compressão uniaxial, em um corpo-de-prova cilíndrico (9,5 cm x 19 cm) de concreto

Após a realização de cada ensaio lê-se a carga máxima atingida por CP, e dividindo-se pela área de seção transversal do CP, obtém-se o valor da resistência.

Os corpos-de-prova foram mantidos em processo de cura úmida até a idade de ensaio. Para cada idade de 7, 28 e 91 dias foi ensaiado um corpo-de-prova à compressão por betonada, resultando num total de 3 CP's, por idade, após repetição.

5.3.7.1.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Após a moldagem de corpos-de-prova cilíndricos de 9,5 cm x 19 cm, respeitando-se o tempo de cura úmida para cada idade (7, 28 e 91 dias), procede-se a determinação da resistência à tração por compressão diametral do concreto, de acordo com a prescrição da norma NBR 7222 (1994).

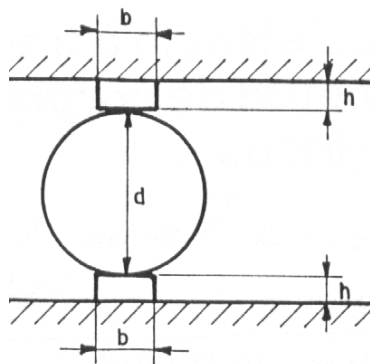


Figura 5.19 Esquema do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (d = diâmetro do corpo-de-prova; $b=(0,15\pm 0,01)d$; $h=(3,5\pm 0,5)$ mm)

Conforme pode ser observado na Figura 5.19 acima, o contato entre o corpo-de-prova (CP) e os pratos da máquina de ensaio deve ocorrer somente ao longo das duas geratrizes diametralmente opostas do corpo-de-prova.

Para cada idade de 7, 28 e 91 dias ensaiou-se um corpo-de-prova à tração por compressão diametral por betonada, resultando num total de 3 CP's, por idade, após repetição.

A resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$) é calculada conforme a seguinte expressão:

$$f_t'D = 0,85 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot L} \quad (5.2)$$

onde:

$f_t'D$ = resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = carga máxima obtida no ensaio (N);

d = diâmetro do corpo-de-prova (mm);

L = altura do corpo-de-prova (mm).

Segundo SÜSSEKIND (1985), como as tensões de tração não são constantes em toda a seção transversal do cilindro, um coeficiente corretivo tem que ser aplicado a esta expressão para compensar o fato de existência de compressão, próximo aos bordos carregados, na direção normal à do carregamento, sendo portanto utilizado o coeficiente *0,85*, na expressão de cálculo da resistência à tração por compressão diametral. Também MEHTA e MONTEIRO (1994) afirmam que comparando com o ensaio de tração direta, o ensaio de tração por compressão diametral sabidamente superestima a resistência à tração do concreto de 10 a 15%, o que justifica a utilização deste coeficiente de minoração.

A Figura 5.20 ilustra a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, em um dos 108 corpos-de-prova cilíndricos (9,5 cm x 19 cm) de concreto submetidos a este ensaio.

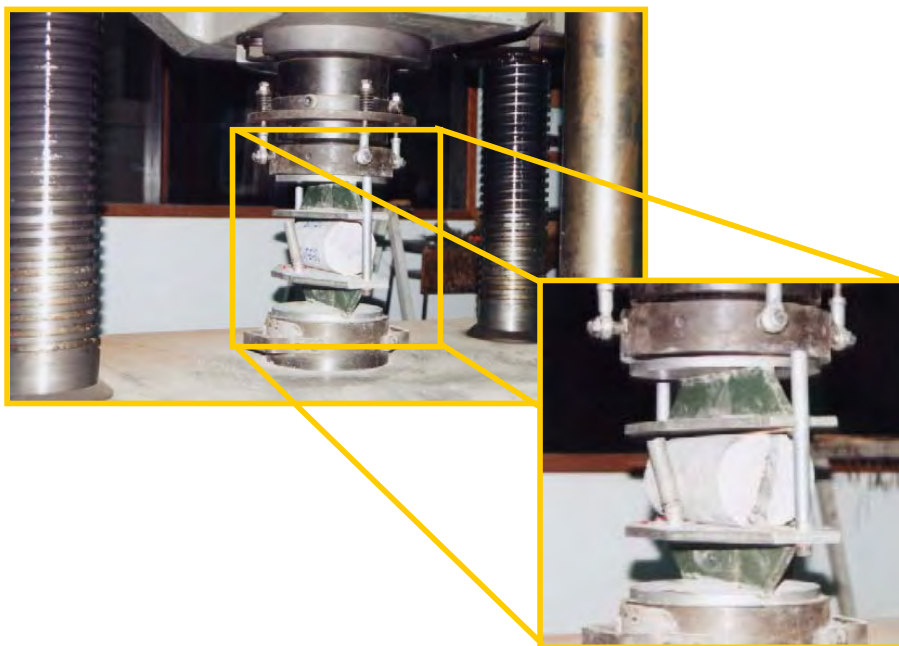


Figura 5.20 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral, em um corpo-de-prova cilíndrico (9,5 cm x 19 cm) de concreto

5.3.7.1.3 Resistência à Tração na Flexão

Este ensaio é realizado de acordo com a norma NBR 12142 (1994). Conforme esta norma, a resistência à tração na flexão foi medida em corpos-de-prova (CP's) prismáticos de concreto, de dimensões 10 cm x 10 cm x 35 cm (largura x altura x comprimento), sendo aplicada uma carga concentrada a 1/3 de cada um dos elementos de apoio do CP (Figura 5.21).

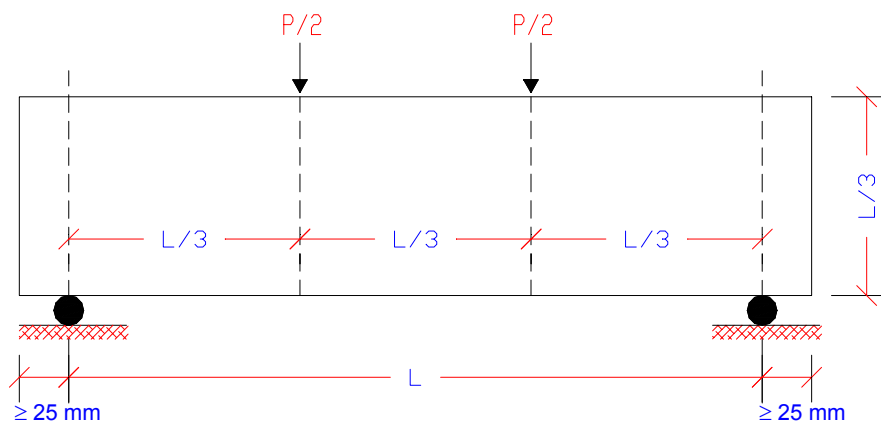


Figura 5.21 Esquema do ensaio de resistência à tração na flexão (P=carga aplicada; L=distância entre cutelos de suporte)

Neste ensaio os corpos-de-prova também foram mantidos em processo de cura úmida até a idade de ensaio. Para cada idade de 7, 28 e 91 dias foram ensaiados um corpo-de-prova à tração na flexão por betonada, resultando num total de 3 CP's, por idade, após repetição.

A resistência à tração na flexão ($f_t'F$) foi calculada conforme a seguinte expressão (válida para o caso em que a ruptura acontece no terço médio da distância entre os elementos de apoio):

$$f_t'F = \frac{P \cdot L}{b \cdot d^2} \quad (5.3)$$

onde:

$f_t'F$ = resistência à tração na flexão (MPa);

P = carga máxima aplicada (N);

L = distância entre cutelos de suporte (mm);

b = largura média do corpo-de-prova, na seção de ruptura (mm);

d = altura média do corpo-de-prova, na seção de ruptura (mm).

A Figura 5.22 ilustra a realização do ensaio de resistência à tração na flexão, em um dos 108 corpos-de-prova prismáticos (10 cm x 10 cm x 35 cm) de concreto submetidos a este ensaio.

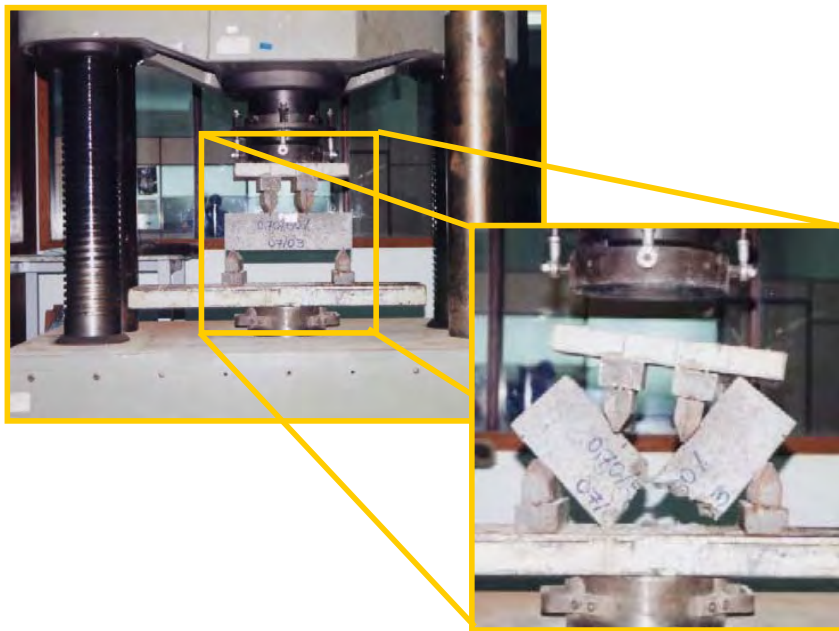


Figura 5.22 Ensaio de resistência à tração na flexão, em um corpo-de-prova prismático (10 cm x 10 cm x 35 cm) de concreto

5.3.7.2 Avaliação da Microestrutura de Concretos Referência e com EGF

Visando avaliar a influência da escória granulada de fundição sobre a interface pasta-agregado, realizou-se investigação microestrutural de amostras de concretos referência (sem EGF) e com EGF substituindo parte do cimento, através de análise de microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários.

Da mesma forma que foi descrito no item 5.3.3.2.2 (para o caso de amostras de escória granulada de fundição não beneficiada e beneficiada), esta análise foi realizada em microscópio eletrônico de marca PHILIPS, modelo XL200, com espectômetro por dispersão de energia (EDS) acoplado. O equipamento localiza-se no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), da Escola de Engenharia da UFRGS. Nesta análise, as amostras foram coladas em base metálica e recobertas com carbono.

5.3.7.3 Caracterização Ambiental dos Concretos Referência e com EGF

Como detalhado no item 2.4, a caracterização ambiental é essencial quando objetiva-se definir uma aplicação para um determinado resíduo. Da mesma forma que é importante a caracterização ambiental da escória granulada de fundição (EGF), apresentado no item 5.3.3.2.3, também é importante caracterizar ambientalmente o produto resultante da sua aplicação, no caso dos concretos com EGF. Mesmo que a EGF seja classificada como resíduo inerte (classe III), conforme disposto no item 5.3.3.2.3, é aconselhável avaliar ambientalmente o produto (concreto), pois algumas vezes reações do resíduo com os materiais no qual este resíduo é adicionado, podem resultar em um produto de classificação ambiental diferente do resíduo.

O ensaio foi realizado em amostras de concreto de relação água/aglomerante igual a 0,70. Esta escolha foi determinada por representar a pior condição, ou seja, onde o concreto estaria mais suscetível a permitir a migração de elementos indesejáveis ao meio, por apresentar uma estrutura menos densa. Sendo assim, a caracterização ambiental do concreto foi realizado para uma amostra de concreto com 50% de substituição de cimento por EGF, relação água/aglomerante igual a 0,70 e idade de 28 dias, bem como para uma amostra de concreto referência (sem EGF), relação água/aglomerante igual a 0,70 e idade de 28 dias, como parâmetro de comparação.

Os ensaios utilizados na caracterização ambiental destas amostras de concreto foram: ensaio de lixiviação, segundo NBR 10005 (1987) e ensaio de solubilização prescrito pela NBR 10006 (1987). Os limites máximos admitidos nos extratos lixiviados e solubilizados são especificados pela NBR 10004 (1987), que classifica os resíduos sólidos.

O ensaio de lixiviação foi realizado no LACOR (Laboratório de Corrosão), da Escola de Engenharia da UFRGS, e o ensaio de solubilização foi realizado no NORIE (Núcleo Orientado à Inovação na Edificação), também da Escola de Engenharia da UFRGS. Os extratos lixiviados e solubilizados foram analisados em dois laboratórios diferentes (Laboratório de Geoquímica, do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da UNISINOS e Laboratório de Análises, da Faculdade de Agronomia da UFRGS), em função da limitação de detecção dos equipamentos utilizados em cada laboratório, a fim de que fosse possível a comparação dos resultados obtidos com os limites estipulados pela NBR 10004 (1987).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados primeiramente os resultados e discussão relativos ao estudo das propriedades mecânicas (resistência à compressão uniaxial (f_c), resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$) e resistência à tração na flexão ($f_t'F$)) de concretos com substituição de parte do cimento por escória granulada de fundição (EGF), bem como do concreto referência. Também será feita uma abordagem sobre a avaliação da microestrutura e caracterização ambiental de concretos referência e com EGF.

6.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

O modelo do comportamento das resistências do concreto foi obtido através de *análise de regressão linear múltipla*, com auxílio do programa estatístico Statgraphics.

Com os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica dos concretos (anexo 12), através da análise estatística, pode-se estudar o efeito da utilização de escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento em concretos, sobre as propriedades mecânicas (resistência à compressão uniaxial, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão) dos mesmos.

Esta análise permitiu obter o melhor ajuste, ou seja, o modelamento do comportamento do concreto (em termos de propriedades mecânicas) com substituição de parte do cimento por escória granulada de fundição (EGF), bem como do concreto referência (sem EGF), para cada uma das três variáveis de resposta de estudo. Dessa forma, foi possível construir para cada um dos efeitos principais dos fatores controláveis e interações significativas dos mesmos, gráficos mostrando o comportamento das propriedades mecânicas destes concretos, frente à mudança de um nível para outro dos fatores controláveis.

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 do ensaio é explicado pela equação ajustada para cada variável de resposta (RIBEIRO e CATEN, 2000). Desta forma, quanto maior o valor do R^2 (coeficiente de determinação) obtido em determinado modelo matemático, mais próximo do ajuste ótimo se está trabalhando, ou ainda, mais representativo do comportamento dos resultados medidos está o modelo obtido.

Durante a análise estatística dos resultados, também é importante trabalhar com o maior *nível de confiança* possível, assim, maior será a confiança de que determinada variação no

resultado da variável de resposta é proveniente da mudança de nível dos fatores controláveis, e não de outros fatores que não são objeto de estudo do experimento.

Na análise estatística dos resultados deste projeto de pesquisa, através do auxílio do programa Statgraphics, buscou-se atingir o maior valor possível de R^2 , objetivando-se alcançar o melhor ajuste do modelo de comportamento das resistências do concreto, bem como maior *nível de confiança*, determinando-se o nível de confiança $\geq 95\%$ na avaliação do efeito dos fatores controláveis e suas interações sobre as propriedades mecânicas do concreto.

Como faz parte deste projeto experimental mais de um fator controlável e, além disso, o intervalo de variação entre os fatores controláveis não é o mesmo, como apresentado no item 5.2.2, deve-se realizar a codificação dos níveis destes fatores controláveis para a execução da análise estatística. O intervalo de codificação determinado para este projeto experimental foi entre 0,5 e 1,5. A Figura 6.1 apresenta os respectivos valores dos níveis codificados (obtidos por interpolação) para cada nível real dos fatores controláveis (teor de substituição do cimento por escória granulada de fundição (TE); relação água/aglomerante (a/agl.); idade do concreto). A Figura 6.2 (a, b, c) apresenta a relação completa de dados, utilizados na análise estatística, com os valores dos níveis codificados e reais dos fatores controláveis, e os respectivos resultados de resistência mecânica obtidos para cada combinação de fatores controláveis. A variação observada nos valores de resistência medidos (Figura 6.2 (a, b, c)) está provavelmente associada à moldagem e capeamento dos corpos-de-prova.

água/aglomerante (a/agl.)	
Nível Real	Nível Codificado
0,384	0,5
0,385	0,503
0,399	0,547
0,4	0,551
0,502	0,873
0,507	0,889
0,516	0,918
0,55	1,025
0,651	1,345
0,664	1,386
0,683	1,446
0,7	1,5

Teor de substituição de cimento por EGF (TE)	
Nível Real (%)	Nível Codificado
0	0,5
10	0,7
30	1,1
50	1,5

Idade (ID)	
Nível Real (dias)	Nível Codificado
7	0,5
28	0,75
91	1,5

Figura 6.1 Níveis codificados para cada um dos fatores controláveis

Níveis Reais			Níveis Codificados											
a/agl.	TE (%)	idade (dias)	fc (MPa)	fc médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	ft'D (MPa)	ft'D médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	ft'F (MPa)	ft'F médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
0,40	0	7	34,28				3,03				4,05			
0,40	0	7	24,69	30,24	4,97	16,43	2,56	2,69	0,29	10,90	3,72	4,15	0,49	11,75
0,40	0	7	31,74				2,49				4,68			
0,40	0	28	39,36				2,25				5,01			
0,40	0	28	33,93	37,41	3,02	8,08	2,05	2,61	0,80	30,59	4,64	4,77	0,21	4,42
0,40	0	28	38,94				3,52				4,65			
0,40	0	91	38,37				3,07				5,03			
0,40	0	91	49,17	40,56	7,75	19,11	3,79	3,21	0,53	16,48	5,43	4,97	0,50	10,03
0,40	0	91	34,14				2,76				4,44			
0,385	10	7	33,44				3,12				4,01			
0,385	10	7	30,90	32,19	1,27	3,95	3,01	3,00	0,13	4,36	3,96	4,01	0,06	1,37
0,385	10	7	32,24				2,86				4,07			
0,385	10	28	32,59				3,04				4,83			
0,385	10	28	38,09	37,13	4,14	11,15	3,04	3,20	0,23	7,18	4,40	4,90	0,54	11,09
0,385	10	28	40,70				3,46				5,48			
0,385	10	91	49,94				3,10				4,85			
0,385	10	91	37,88	45,54	6,66	14,62	3,19	3,12	0,07	2,14	4,98	5,24	0,57	10,92
0,385	10	91	48,81				3,06				5,90			
0,399	30	7	18,98				2,05				3,90			
0,399	30	7	20,46	20,81	2,03	9,77	1,68	1,89	0,19	10,11	3,20	3,61	0,37	10,15
0,399	30	7	23,00				1,95				3,74			
0,399	30	28	28,22				2,23				4,88			
0,399	30	28	28,92	28,87	0,62	2,15	1,93	2,27	0,36	15,72	4,25	4,51	0,33	7,30
0,399	30	28	29,46				2,64				4,40			
0,399	30	91	35,48				2,70				5,30			
0,399	30	91	35,62	33,95	2,77	8,15	2,83	2,62	0,25	9,68	4,62	4,85	0,39	8,10
0,399	30	91	30,76				2,34				4,62			
0,384	50	7	15,52				1,50				2,52			
0,384	50	7	14,74	15,07	0,40	2,68	1,42	1,56	0,18	11,73	2,96	2,66	0,26	9,90
0,384	50	7	14,95				1,77				2,49			
0,384	50	28	21,30				2,43				3,81			
0,384	50	28	20,03	21,82	2,09	9,60	2,22	2,31	0,11	4,62	4,38	4,12	0,29	6,98
0,384	50	28	24,12				2,29				4,16			
0,384	50	91	28,64				2,88				4,32			
0,384	50	91	26,31	28,05	1,53	5,46	3,00	2,98	0,09	3,08	4,50	4,42	0,09	2,05
0,384	50	91	29,20				3,06				4,43			

(a)

Níveis Reais			Níveis Codificados								
a/agl.	TE (%)	idade (dias)	fc (MPa)	fc médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	ft D (MPa)	ft F (MPa)	ft F médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
0,502	0	7	24,76	23,59	1,63	6,90	2,41	3,68	3,43	0,38	10,97
0,502	0	7	21,73	20,59	1,63	6,90	1,96	3,00	3,43	0,38	10,97
0,502	0	7	24,27	23,59	1,63	6,90	2,55	3,62	3,43	0,38	10,97
0,502	0	28	32,87	29,30	3,32	11,33	2,65	4,71	4,04	0,62	15,27
0,502	0	28	26,31	29,30	3,32	11,33	2,43	3,50	4,04	0,62	15,27
0,502	0	28	28,71	29,30	3,32	11,33	1,21	3,90	3,90	0,00	0,00
0,502	0	91	31,32	29,34	6,30	21,48	2,85	4,10	3,71	0,46	12,47
0,502	0	91	22,29	29,34	6,30	21,48	2,77	3,20	3,71	0,46	12,47
0,502	0	91	34,42	29,34	6,30	21,48	2,80	3,84	3,71	0,46	12,47
0,507	10	7	20,67	18,93	1,67	8,80	2,23	2,85	3,08	0,22	7,16
0,507	10	7	17,36	18,93	1,67	8,80	1,66	3,09	3,08	0,22	7,16
0,507	10	7	18,76	18,93	1,67	8,80	1,57	3,29	3,08	0,22	7,16
0,507	10	28	30,05	25,58	4,07	15,91	3,07	4,32	3,85	0,54	14,01
0,507	10	28	22,08	25,58	4,07	15,91	2,43	3,26	3,85	0,54	14,01
0,507	10	28	24,62	25,58	4,07	15,91	2,32	3,96	3,85	0,54	14,01
0,507	10	91	30,47	28,22	1,96	6,96	3,19	3,65	3,78	0,42	11,00
0,507	10	91	26,88	28,22	1,96	6,96	2,02	4,25	3,78	0,42	11,00
0,507	10	91	27,30	28,22	1,96	6,96	2,71	3,45	3,78	0,42	11,00
0,516	30	7	15,66	13,87	1,92	13,81	1,30	2,97	2,89	0,07	2,35
0,516	30	7	11,85	13,87	1,92	13,81	1,23	2,87	2,89	0,07	2,35
0,516	30	7	14,11	13,87	1,92	13,81	1,42	2,84	2,89	0,07	2,35
0,516	30	28	20,67	19,07	1,40	7,35	1,66	3,65	3,54	0,29	8,12
0,516	30	28	18,48	19,07	1,40	7,35	1,98	3,21	3,54	0,29	8,12
0,516	30	28	18,06	19,07	1,40	7,35	1,53	3,75	3,54	0,29	8,12
0,516	30	91	26,03	23,11	2,54	10,97	2,13	3,87	3,62	0,71	19,76
0,516	30	91	21,87	23,11	2,54	10,97	2,05	2,81	3,62	0,71	19,76
0,516	30	91	21,44	23,11	2,54	10,97	2,34	4,17	3,62	0,71	19,76
0,55	50	7	8,04	7,27	0,81	11,18	0,82	1,80	1,89	0,15	7,96
0,55	50	7	6,42	7,27	0,81	11,18	0,70	2,06	1,89	0,15	7,96
0,55	50	7	7,34	7,27	0,81	11,18	0,79	1,80	1,89	0,15	7,96
0,55	50	28	12,34	12,66	0,36	2,87	1,35	2,73	2,49	0,37	14,91
0,55	50	28	12,56	12,66	0,36	2,87	0,94	2,06	2,49	0,37	14,91
0,55	50	28	13,05	12,66	0,36	2,87	0,85	2,67	2,49	0,37	14,91
0,55	50	91	17,42	16,72	0,61	3,67	1,65	3,42	2,98	0,38	12,77
0,55	50	91	16,44	16,72	0,61	3,67	1,96	2,81	2,98	0,38	12,77
0,55	50	91	16,29	16,72	0,61	3,67	1,29	2,72	2,98	0,38	12,77

(b)

Níveis Reais				Níveis Codificados				ft'F (MPa)	ft'D (MPa)	fc (MPa)	ft'F (MPa)	
a/agl.	TE (%)	idade (dias)	fc (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	ft'D (MPa)	ft'F médio (MPa)					Desvio Padrão (MPa)
0,651	0	7	13,47	12,81	0,91	7,07	1,75	2,25	17,94	2,33	0,11	4,64
0,651	0	7	11,78	12,81	0,91	7,07	1,42	2,45	0,26	2,33	0,11	4,64
0,651	0	7	13,19	12,81	0,91	7,07	1,23	2,28	0,36	2,87	0,08	2,82
0,651	0	28	23,98	18,90	4,62	24,43	1,90	2,88	19,77	2,94	0,26	8,46
0,651	0	28	14,95	18,90	4,62	24,43	1,45	2,78	0,40	3,10	0,26	8,46
0,651	0	28	17,78	18,90	4,62	24,43	2,17	2,94	0,15	2,88	0,04	1,63
0,651	0	91	21,02	19,80	2,88	14,55	1,93	3,39	19,72	2,37	0,04	1,63
0,651	0	91	21,87	19,80	2,88	14,55	1,65	3,39	0,11	2,37	0,04	1,63
0,651	0	91	16,51	19,80	2,88	14,55	1,45	2,88	0,11	2,37	0,04	1,63
0,664	10	7	12,56	11,10	1,42	12,77	1,45	2,30	0,15	2,33	0,04	1,63
0,664	10	7	11,00	11,10	1,42	12,77	1,21	2,31	0,15	2,33	0,04	1,63
0,664	10	7	9,73	11,10	1,42	12,77	1,18	2,37	0,11	2,33	0,04	1,63
0,664	10	28	15,45	15,33	0,54	3,52	1,47	2,55	7,84	2,80	0,40	14,14
0,664	10	28	14,74	15,33	0,54	3,52	1,26	2,60	0,11	2,80	0,40	14,14
0,664	10	28	15,80	15,33	0,54	3,52	1,41	3,26	0,36	2,57	0,23	8,76
0,664	10	91	19,40	19,35	0,15	0,75	2,34	2,58	17,37	2,34	0,23	8,76
0,664	10	91	19,47	19,35	0,15	0,75	2,14	2,34	0,36	2,57	0,23	8,76
0,664	10	91	19,19	19,35	0,15	0,75	1,65	2,79	0,16	2,79	0,33	20,97
0,683	30	7	7,83	7,66	0,25	3,23	0,67	1,35	20,72	1,59	0,33	20,97
0,683	30	7	7,48	7,66	0,25	3,23	0,90	1,82	0,16	1,82	0,33	20,97
0,683	30	28	12,06	11,54	0,57	4,95	1,02	2,87	0,20	2,87	0,47	17,62
0,683	30	28	10,93	11,54	0,57	4,95	1,41	2,93	0,20	2,93	0,47	17,62
0,683	30	28	11,64	11,54	0,57	4,95	1,17	2,09	16,39	2,09	0,47	17,62
0,683	30	91	16,01	16,04	0,88	5,49	1,60	3,39	0,11	3,39	0,22	6,80
0,683	30	91	15,17	16,04	0,88	5,49	1,53	2,96	0,11	3,17	0,22	6,80
0,683	30	91	16,93	16,04	0,88	5,49	1,74	3,15	0,48	3,15	0,22	6,80
0,700	50	7	4,44	4,54	0,64	14,12	0,48	1,23	7,27	1,06	0,14	12,97
0,700	50	7	5,22	4,54	0,64	14,12	0,52	1,07	0,04	1,06	0,14	12,97
0,700	50	7	3,95	4,54	0,64	14,12	0,45	0,96	0,07	0,96	0,14	12,97
0,700	50	28	8,32	7,69	0,56	7,23	0,79	1,85	7,68	1,86	0,25	13,43
0,700	50	28	7,27	7,69	0,56	7,23	0,91	1,62	0,07	1,86	0,25	13,43
0,700	50	28	7,48	7,69	0,56	7,23	0,90	2,12	0,87	1,86	0,25	13,43
0,700	50	91	10,44	10,77	0,83	7,67	1,21	1,94	1,16	2,08	0,32	15,36
0,700	50	91	11,71	10,77	0,83	7,67	1,17	1,86	0,06	2,08	0,32	15,36
0,700	50	91	10,16	10,77	0,83	7,67	1,09	2,45	0,06	2,08	0,32	15,36

(c)

Figura 6.2 (a, b, c) Relação completa de dados, utilizados na análise estatística, com os valores dos níveis codificados e reais dos fatores controláveis, e os respectivos resultados de resistência mecânica obtidos para cada combinação de fatores controláveis (a/agl. = relação água/aglomerante; TE = teor de substituição de cimento por EGF; fc = resistência à compressão uniaxial; ft'D = resistência à tração por compressão diametral; ft'F = resistência à tração na flexão)

6.1.1 Resistência à Compressão Uniaxial

O modelo do comportamento da resistência à compressão uniaxial (f_c) do concreto com substituição de parte do cimento por escória granulada de fundição (EGF), bem como do concreto referência (sem EGF), obtido através de análise de regressão linear múltipla (programa estatístico Statgraphics) foi o seguinte, conforme equação 6.1:

$$f_c = -215,576 - 25,3684 \cdot \frac{1}{(a/agl.)^{1,2}} + 224,691 \cdot \frac{1}{(TE)^{0,1}} - 0,820909 \cdot \frac{1}{(idade)^3} + 30,1479 \cdot \frac{1}{(a/agl. + TE)} + 40,5266 \cdot \frac{(idade)^{0,1}}{(a / agl.)} - 17,1615 \cdot \frac{(idade)^{0,1}}{(TE)} \quad (6.1)$$

O coeficiente de determinação para o ajuste desta função foi $R^2 = 93,0537\%$, o que significa que 93,0537% da variabilidade nos resultados da resistência à compressão uniaxial (f_c) é devido ao efeito dos fatores controláveis e suas interações. Para este modelo chegou-se a um *nível de confiança* de 99%, assim tem-se estatisticamente que há diferenças significativas entre níveis dos fatores controláveis com 99% de confiança. O anexo 13 apresenta o resumo da análise estatística de regressão linear múltipla, realizada para obtenção do modelo de f_c representado pela equação 6.1.

Como pode ser observado na equação 6.1, os fatores controláveis, teor de substituição do cimento por escória granulada de fundição (TE), relação água/aglomerante (a/agl.) e idade do concreto (ID) exercem efeito significativo sobre a variável de resposta (f_c), bem como as interações de 1ª ordem destes fatores controláveis (a/agl. x TE; TE x ID; a/agl. x ID), também exercem efeito significativo sobre f_c .

Além disso, é importante esclarecer que este modelo do comportamento da resistência à compressão uniaxial de concretos com e sem EGF, é válido para o intervalo de estudo, pois segundo RIBEIRO e CATEN (2000), num experimento deseja-se formular uma lei que represente o comportamento do fenômeno, objetivando-se encontrar uma equação que passe pela maioria dos pontos resultantes do experimento, dentro do intervalo pesquisado. DAL MOLIN (1995) determinou o modelo de previsão de resistência à compressão para concretos de alta resistência com e sem adição de sílica ativa, para as condições experimentais do trabalho e válido para idades de até 91 dias. LEITE (2001) ajustou o modelo de resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição, para os níveis codificados dos fatores controláveis do experimento.

6.1.1.1 Efeito Isolado da Relação Água/aglomerante (a/agl.) sobre a Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto

Utilizando-se o modelo que descreve o comportamento do concreto com e sem EGF em relação à resistência à compressão uniaxial (f_c), descrito no item 6.1.1, pode-se determinar o efeito isolado do fator controlável, água/aglomerante (a/agl.), sobre esta variável de resposta (f_c).

O efeito de um fator controlável é definido como a mudança média que aparece na resposta quando muda-se o nível deste fator (RIBEIRO e CATEN, 2000).

Através da construção de gráficos dos efeitos principais dos fatores controláveis sobre cada variável de resposta, bem como construção de gráficos dos efeitos das interações mais significativas sobre cada variável de resposta em estudo, pode-se verificar a consistência técnica da solução (modelo) encontrada.

A Tabela 6.1 apresenta os resultados de f_c , onde são mostrados os valores dos níveis codificados dos fatores controláveis (Tabela 6.1a), necessários para a utilização do modelo, e os respectivos valores dos níveis reais dos fatores controláveis (Tabela 6.1b), utilizados na construção do gráfico mostrado na Figura 6.3. A Figura 6.3 apresenta o efeito isolado da relação água/aglomerante (a/agl.) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c) do concreto. Este gráfico foi obtido variando os valores codificados da relação água/aglomerante (a/agl.) e mantendo os demais fatores controláveis no ponto médio de seu intervalo de codificação (equação 6.1).

Tabela 6.1 Resultados de resistência à compressão uniaxial (f_c) em função do efeito isolado da relação água/aglomerante (a/agl.) **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

(a)		(b)	
$ID = 0,75$		$ID = 28$	
$TE = 1,1$		$TE = 30\%$	
a/agl	f_c (MPa)	a/agl	f_c (MPa)
0,551	27,74	0,40	27,74
1,025	17,86	0,55	17,86
1,5	12,13	0,70	12,13

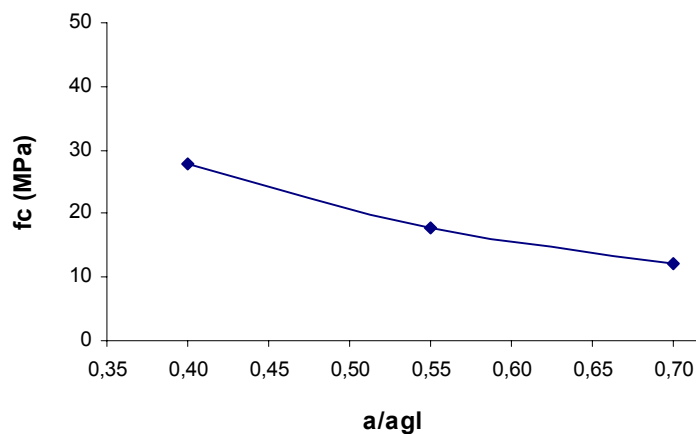


Figura 6.3 Efeito isolado da relação água/aglomerante (a/agl.) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c)

Neste gráfico observa-se que a resistência à compressão uniaxial do concreto vai diminuindo à medida que a relação a/agl. aumenta. Este comportamento é esperado, pois existe uma relação inversa entre resistência do concreto e relação a/agl. Isto deve-se ao fato de que com o aumento da relação a/agl., a porosidade do concreto aumenta (a não ser que sejam utilizados materiais de preenchimento de vazios do concreto ou adições minerais), enfraquecendo a zona de transição pasta-agregado, bem como toda a matriz cimentícia, e conseqüentemente diminuindo a resistência deste concreto.

6.1.1.2 Efeito Isolado do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) sobre a Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto

A Figura 6.4 mostra o efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF (TE) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c). Este gráfico foi obtido variando os valores codificados do teor de substituição de cimento por EGF (TE) e mantendo os demais fatores controláveis no ponto médio de seu intervalo de codificação, utilizando-se a equação 6.1. Na Tabela 6.2 são mostrados os resultados de f_c , em função dos níveis codificados dos fatores controláveis (Tabela 6.2a), e os respectivos níveis reais destes fatores controláveis (Tabela 6.2b).

Tabela 6.2 Resultados de resistência à compressão uniaxial (f_c) em função do efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

(a)		(b)	
$a/agl. = 1,025$		$a/agl. = 0,55$	
$ID = 0,75$		$ID = 28$	
Teor de Substituição de Cimento por EGF	f_c (MPa)	Teor de Substituição de Cimento por EGF (%)	f_c (MPa)
0,5	23,50	0	23,50
0,7	22,77	10	22,77
1,1	17,86	30	17,86
1,5	12,85	50	12,85

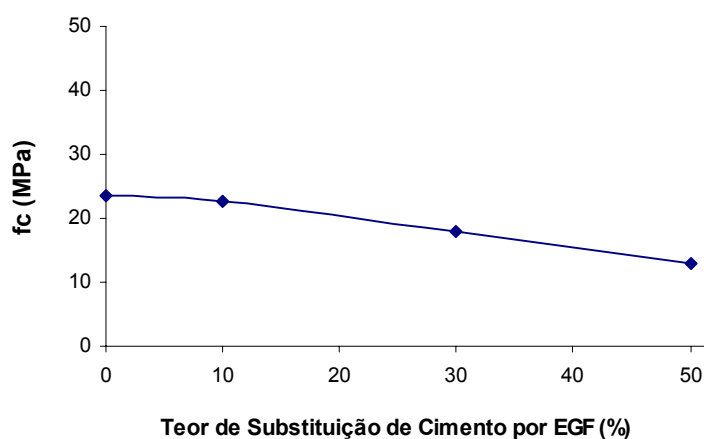


Figura 6.4 Efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c)

Como pode ser observado no gráfico do efeito isolado do fator controlável teor de substituição de cimento por EGF (TE), sobre a variável de resposta (f_c), f_c diminui à medida que TE aumenta. Entretanto, como este gráfico foi construído utilizando os níveis médios dos intervalos de codificação de $a/agl.$ e ID , não é possível afirmar que este comportamento se mantenha para os demais níveis destes fatores controláveis estudados. Percebe-se que o valor de $TE=10\%$ apresenta um desempenho, em termos de f_c , quase similar ao concreto referência ($TE=0\%$). Uma análise mais apurada do comportamento da resistência à compressão uniaxial do concreto poderá ser obtida na verificação da influência da interação de TE com os demais fatores controláveis de estudo, como apresentado nos itens 6.1.1.4 e 6.1.1.5.

6.1.1.3 Efeito Isolado da Idade (ID) sobre a Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto

O efeito isolado do fator controlável idade do concreto (ID), sobre a variável de resposta (f_c), é mostrado na Figura 6.5. Na Tabela 6.3 observam-se os resultados de f_c , obtidos através da equação 6.1, onde variou-se os valores dos níveis codificados da idade (ID) e manteve-se os demais fatores controláveis no ponto médio de seu intervalo de codificação.

Tabela 6.3 Resultados de resistência à compressão uniaxial (f_c) em função do efeito isolado da idade **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

(a)		(b)	
$a/agl. = 1,025$		$a/agl. = 0,55$	
$TE = 1,1$		$TE = 30\%$	
Idade	f_c MPa)	Idade (dias)	f_c MPa)
0,5	12,31	7	12,31
0,75	17,86	28	17,86
1,5	21,23	91	21,23

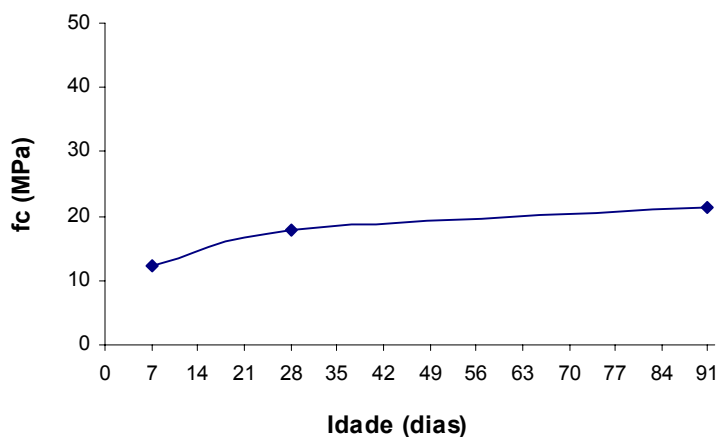


Figura 6.5 Efeito isolado da idade sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c)

Observa-se que a resistência à compressão uniaxial (f_c) cresce com o aumento da idade do concreto. Este comportamento já era esperado, pois as reações de hidratação da pasta de cimento vão se processando ao longo do tempo, resultando, conseqüentemente, no aumento da resistência à compressão uniaxial do concreto com o passar do tempo.

A avaliação da resistência à compressão com o tempo é de grande interesse para tecnologistas e engenheiros de estruturas (MEHTA e MONTEIRO, 1994; DAL MOLIN, 1995). Segundo NEVILLE (1997), é importante o conhecimento da relação tempo-resistência

quando se deve colocar uma estrutura em serviço, submetendo-a ao carregamento pleno, neste caso, podendo-se considerar no projeto o aumento da resistência após os 28 dias.

6.1.1.4 Efeito da Interação da Relação Água/aglomerante (a/agl.) e do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) sobre a Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto

O efeito da interação de 1ª ordem da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (TE) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c) é apresentado na Figura 6.6, Figura 6.7 e Figura 6.8. O gráfico, representado pela Figura 6.6, foi obtido através da equação de modelamento de f_c , descrita no item 6.1.1, variando-se os valores codificados do teor de substituição de cimento por EGF (TE) para cada valor codificado da relação água/aglomerante (a/agl.), e mantendo os demais fatores controláveis no ponto médio de seu intervalo de codificação. Os gráficos da Figura 6.7 e Figura 6.8 também foram obtidos da mesma forma, contudo, no caso da Figura 6.7, o fator controlável idade (ID) foi mantido com valor codificado igual a 0,5, o que equivale a idade de 7 dias, enquanto que na Figura 6.8, o fator controlável idade (ID) foi mantido com valor codificado igual a 1,5, o que equivale a idade de 91 dias.

A Tabela 6.4, Tabela 6.5 e Tabela 6.6 expressam os valores de resistência à compressão uniaxial (f_c), relacionados aos valores dos níveis codificados, bem como níveis reais dos fatores controláveis. Os níveis codificados foram utilizados como valores de entrada na equação 6.1, de modelamento de f_c , utilizando-se os respectivos níveis reais na elaboração dos gráficos.

Analisando-se as três figuras, Figura 6.6, Figura 6.7 e Figura 6.8, observa-se a evolução do crescimento da resistência à compressão ao longo da idade, onde destaca-se o comportamento do concreto com 10% de substituição de cimento por EGF. Aos 7 dias este concreto (TE=10%) apresentava f_c igual a 98,34% do f_c do concreto referência, para a relação água/aglomerante (a/agl.) de 0,70 (Figura 6.9a), apresentando resistência à compressão próxima ao concreto referência para as demais relações água/aglomerante, considerando esta idade (7 dias). Na Figura 6.9a fica evidente o efeito filler proporcionado pela utilização de EGF como substituição de parte do cimento em concretos. Para a mesma idade inicial, de 7 dias (Figura 6.9a), o maior empacotamento da matriz cimentícia é perceptível especialmente

para relações água/aglomerante ($a/agl.$) mais elevadas, onde ocorreu maior crescimento de f_c , sendo portanto, foi mais pronunciado o efeito filer.

Na idade de 28 dias, o concreto com 10% de substituição de cimento por EGF, apresentou f_c quase que equivalente ao f_c do concreto referência, sendo que para $a/agl.=0,70$, chegou a 101,21% do f_c do concreto referência (Figura 6.9b). Já na idade de 91 dias, percebe-se claramente a contribuição oferecida pela substituição de cimento por EGF (para TE=10%), em termos de resistência à compressão, visto que, como ilustra a Figura 6.9c, a resistência à compressão do concreto com 10% de substituição de cimento por EGF resultou em 105,18% do f_c do concreto referência, para $a/agl.= 0,70$, e 99,81% do f_c do concreto referência, para $a/agl.= 0,55$.

Sabe-se que concretos com adições pozolânicas tendem a desenvolver maiores resistências em idades mais avançadas. Esta característica, inerente ao processo de reação pozolânica, deve-se à reação da pozolana, que quando finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio (um dos produtos da hidratação do cimento), para formar compostos com propriedades cimentantes (MEHTA e MONTEIRO, 1994). A reação pozolânica configura-se por ser uma reação lenta, onde a taxa de liberação de calor e de desenvolvimento de resistência são, conseqüentemente, mais lentas (MEHTA e MONTEIRO, 1994, NEVILLE, 1997). Isto pode explicar o fato do concreto com substituição de parte do cimento por EGF apresentar maiores resistências à compressão após um período mais longo, na idade de 91 dias.

Tabela 6.4 Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação $a/agl.$ x TE **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

(a)						(b)					
<i>ID = 0,75</i>						<i>ID = 28</i>					
Teor de Substituição de Cimento por EGF						Teor de Substituição de Cimento por EGF (%)					
		0,5	0,7	1,1	1,5			0	10	30	50
$a/agl.$	0,551	38,23	35,20	27,74	21,42	$a/agl.$	0,40	38,23	35,20	27,74	21,42
	1,025	23,50	22,77	17,86	12,85		0,55	23,50	22,77	17,86	12,85
	1,5	15,68	15,87	12,13	7,83		0,70	15,68	15,87	12,13	7,83

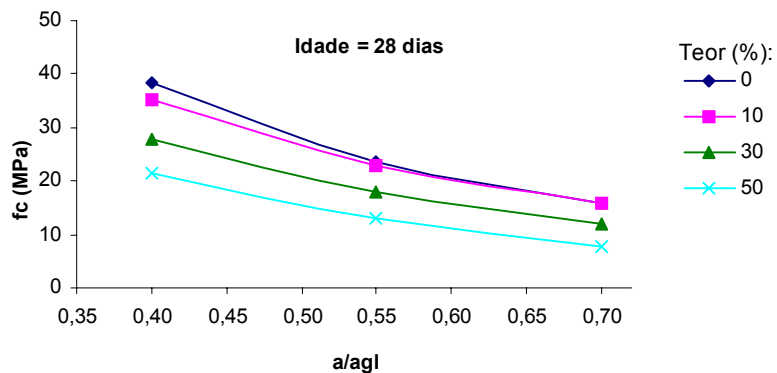


Figura 6.6 Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF sobre a resistência à compressão uniaxial (fc)

Tabela 6.5 Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE, para a idade de 7 dias **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		<i>ID = 0,5</i>				<i>ID = 7</i>				
		Teor de Substituição de Cimento por EGF				Teor de Substituição de Cimento por EGF (%)				
		0,5	0,7	1,1	1,5	0	10	30	50	
a/agl	0,551	32,09	28,69	20,88	14,40	0,40	32,09	28,69	20,88	14,40
	1,025	18,68	17,57	12,31	7,15	0,55	18,68	17,57	12,31	7,15
	1,5	11,34	11,15	7,07	2,61	0,70	11,34	11,15	7,07	2,61

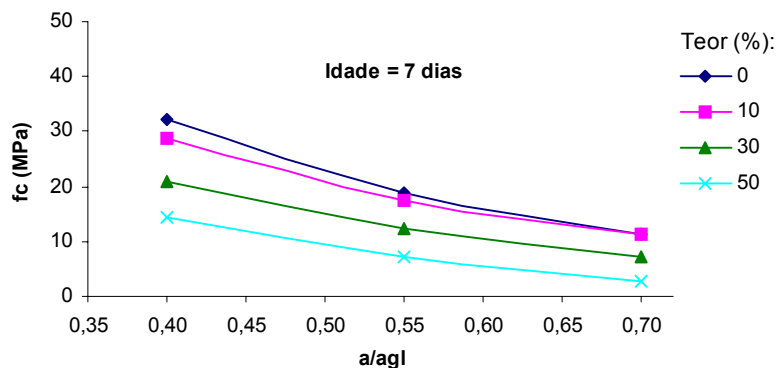


Figura 6.7 Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (para a idade de 7 dias) sobre a resistência à compressão uniaxial (fc)

Tabela 6.6 Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE, para a idade de 91 dias **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a) <i>ID = 1,5</i> Teor de Substituição de Cimento por EGF				(b) <i>ID = 91</i> Teor de Substituição de Cimento por EGF (%)			
		0,5	0,7	1,1	1,5				
a/agl	0,551	42,67	40,32	33,48	27,45				
	1,025	25,57	25,52	21,23	16,52				
	1,5	16,87	17,74	14,63	10,62				
a/agl	0,40	42,67	40,32	33,48	27,45				
	0,55	25,57	25,52	21,23	16,52				
	0,70	16,87	17,74	14,63	10,62				

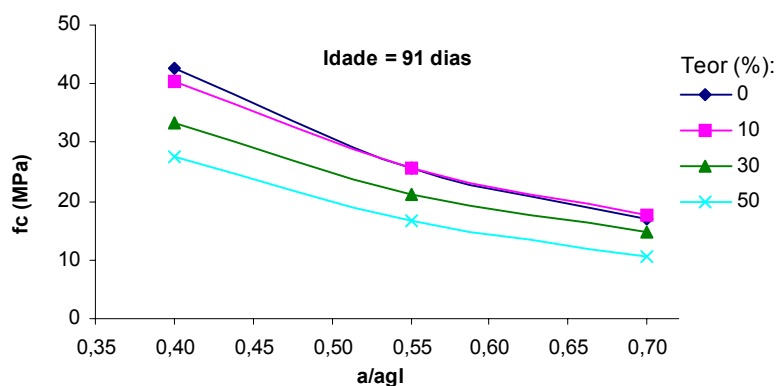
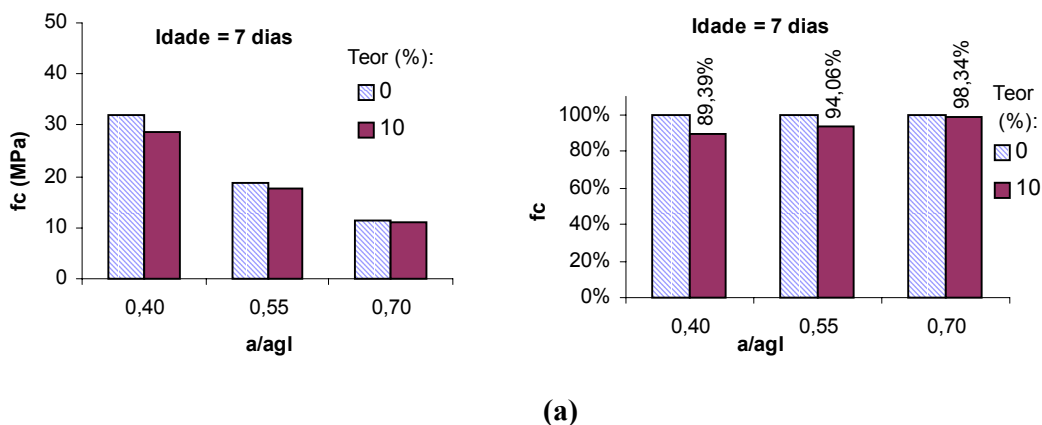


Figura 6.8 Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (para a idade de 91 dias) sobre a resistência à compressão uniaxial (fc)



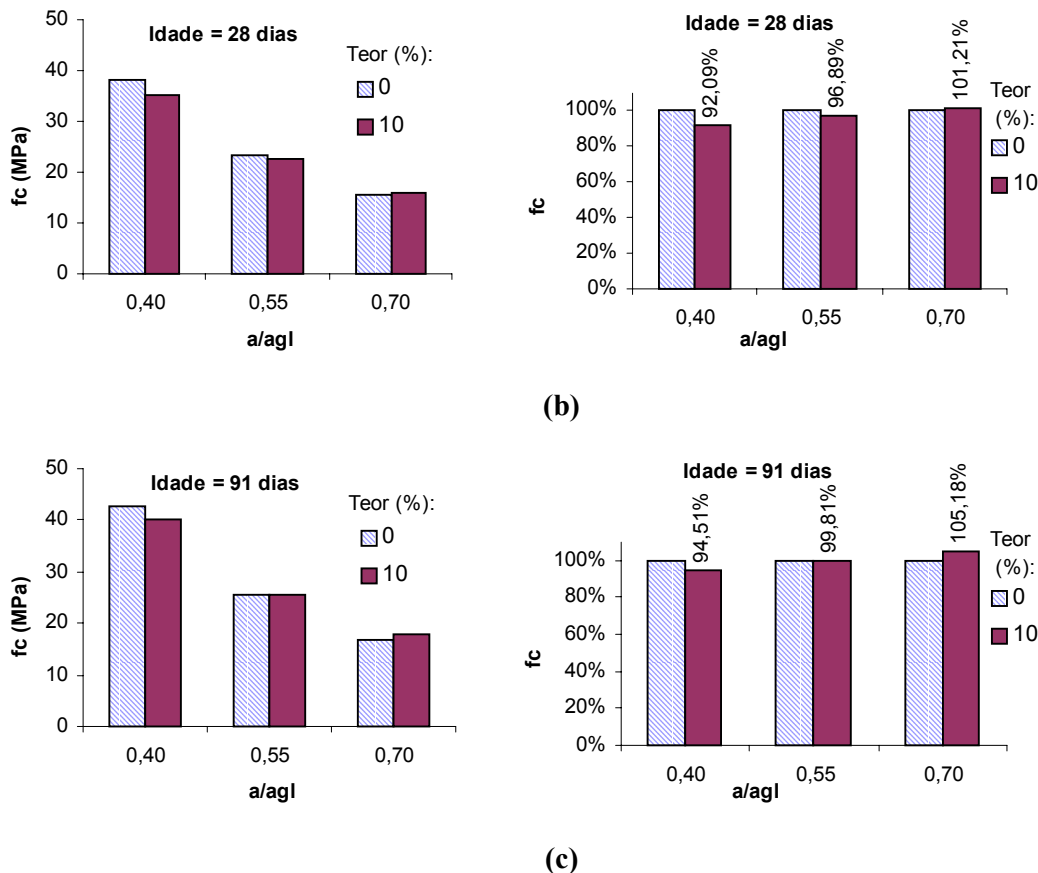


Figura 6.9 Comparação entre os efeitos das interações $a/agl. \times TE = 10\%$ e $a/agl. \times TE = 0\%$ (referência) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c) **a)** ID = 7 dias **b)** ID = 28 dias **c)** ID = 91 dias

6.1.1.5 Efeito da Interação do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) e da Idade (ID) sobre a Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto

A Figura 6.10, Figura 6.11 e Figura 6.12 mostram o efeito da interação de 1ª ordem do teor de substituição de cimento por EGF e da Idade (grau de hidratação) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c) do concreto. Os gráficos apresentados nestas figuras foram obtidos variando os valores codificados de ID para cada valor codificado de TE e, no caso da Figura 6.10, manteve-se o fator controlável $a/agl.$ no ponto médio de seu intervalo de codificação. Na Figura 6.11 o fator controlável $a/agl.$ foi mantido com valor codificado igual a $0,551$, o que equivale a relação água/aglomerante (a/agl) igual a $0,40$, sendo que na Figura 6.12, o fator controlável $a/agl.$ foi mantido com valor codificado igual a $1,5$, o que equivale a relação água/aglomerante (a/agl) igual a $0,70$.

A Tabela 6.7, Tabela 6.8 e Tabela 6.9 apresentam os valores de f_c , obtidos através da equação 6.1, relacionados aos valores dos níveis codificados dos fatores controláveis e aos respectivos valores reais dos fatores controláveis.

Observando-se as três figuras (Figura 6.10, Figura 6.11 e Figura 6.12), conforme apresentado no item 6.1.1.4, mais uma vez fica evidente que os valores das resistências à compressão uniaxial do teor de 10% de substituição de cimento por EGF aproximam-se dos valores do referência (sem EGF) à medida que a relação água/aglomerante aumenta (de 0,40 para 0,70). Também, como esperado, verifica-se que a resistência à compressão é diretamente proporcional ao grau de hidratação (idade) do concreto.

Tabela 6.7 Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação TE x ID **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a)			(b)			
		$a/agl. = 1,025$			$a/agl. = 0,55$			
Teor de Substituição de Cimento por EGF		Idade			Idade (dias)			
		0,5	0,75	1,5	7	28	91	
Teor de Substituição de Cimento por EGF (%)	0,5	18,68	23,50	25,57	0	18,68	23,50	25,57
	0,7	17,57	22,77	25,52	10	17,57	22,77	25,52
	1,1	12,31	17,86	21,23	30	12,31	17,86	21,23
	1,5	7,15	12,85	16,52	50	7,15	12,85	16,52

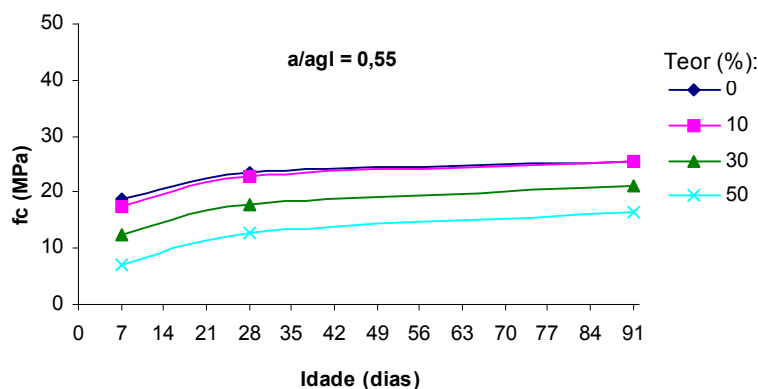


Figura 6.10 Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c)

Tabela 6.8 Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação TE x ID, para relação água/aglomerante igual a 0,40 **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a)			(b)			
		<i>a/agl. = 0,551</i>			<i>a/agl. = 0,40</i>			
		Idade			Idade (dias)			
		0,5	0,75	1,5	7	28	91	
Teor de Substituição de Cimento por EGF	0,5	32,09	38,23	42,67	0	32,09	38,23	42,67
	0,7	28,69	35,20	40,32	10	28,69	35,20	40,32
	1,1	20,88	27,74	33,48	30	20,88	27,74	33,48
	1,5	14,40	21,42	27,45	50	14,40	21,42	27,45

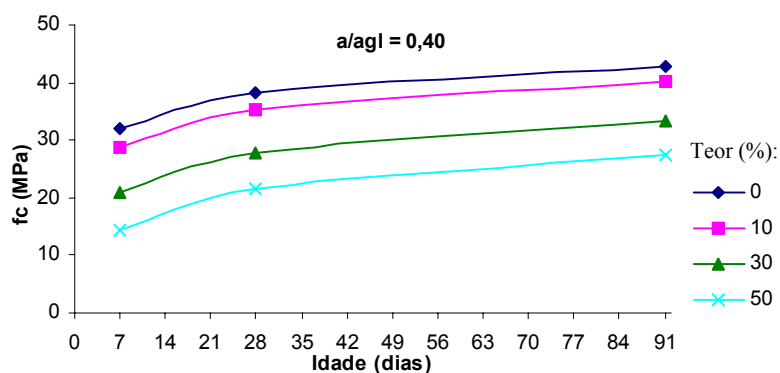


Figura 6.11 Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade (para relação água/aglomerante igual a 0,40) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c)

Tabela 6.9 Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação TE x ID, para relação água/aglomerante igual a 0,70 **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a)			(b)			
		<i>a/agl. = 1,5</i>			<i>a/agl. = 0,70</i>			
		Idade			Idade (dias)			
		0,5	0,75	1,5	7	28	91	
Teor de Substituição de Cimento por EGF	0,5	11,34	15,68	16,87	0	11,34	15,68	16,87
	0,7	11,15	15,87	17,74	10	11,15	15,87	17,74
	1,1	7,07	12,13	14,63	30	7,07	12,13	14,63
	1,5	2,61	7,83	10,62	50	2,61	7,83	10,62

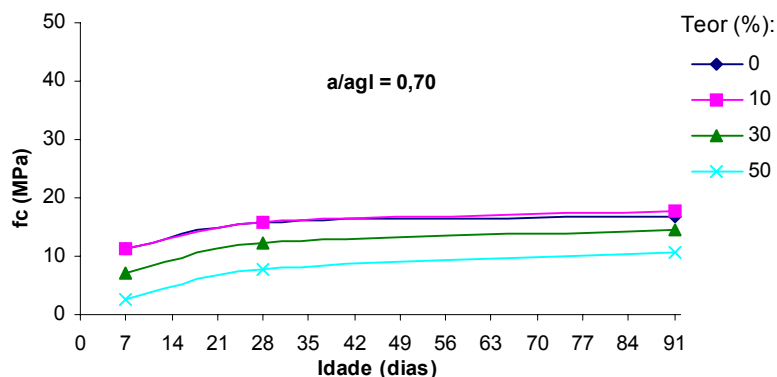


Figura 6.12 Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade (para relação água/aglomerante igual a 0,70) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c)

Percebe-se que houve uma maior contribuição da substituição de cimento por EGF para as relações água/aglomerante mais elevadas, como no caso de $a/agl = 0,55$ (Figura 6.10 e Figura 6.13b) e $a/agl = 0,70$ (Figura 6.12 e Figura 6.13c), onde as curvas do concreto referência e do concreto com TE=10% praticamente se sobrepõem (Figura 6.10 e Figura 6.12). Comparando-se o desempenho, neste caso quanto à resistência à compressão uniaxial do concreto, observa-se que enquanto aos 91 dias de idade, o concreto com 10% de substituição de cimento por EGF, no caso de $a/agl = 0,40$ (Figura 6.13a), apresentava f_c igual a 94,51% do f_c do concreto referência, já aos 28 dias de idade, para $a/agl = 0,70$, a resistência à compressão do concreto com TE=10% ultrapassava o valor do f_c do concreto referência, chegando a 105,18% do f_c do concreto referência, aos 91 dias de idade (Figura 6.13c).

Uma explicação para este comportamento de concretos com EGF, em relação a maior contribuição para as resistências à compressão, no caso de relações água/aglomerantes maiores, pode ser devido ao processo de refinamento dos poros associado ao efeito fíler e à reação pozolânica, com o aumento do C-S-H (silicato de cálcio hidratado), responsável pela resistência da pasta de cimento hidratada. Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), os produtos da reação pozolânica são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares grandes, melhorando assim a resistência e impermeabilidade do sistema. Como, de forma geral, é exatamente nos concretos com elevadas relações água/cimento que a porosidade é maior, compreendendo uma zona de transição pasta-agregado também mais porosa e mais fraca, a utilização de adições pozolânicas e materiais de preenchimento, nestes concretos, contribui de forma efetiva no maior fechamento dos espaços vazios na configuração existente.

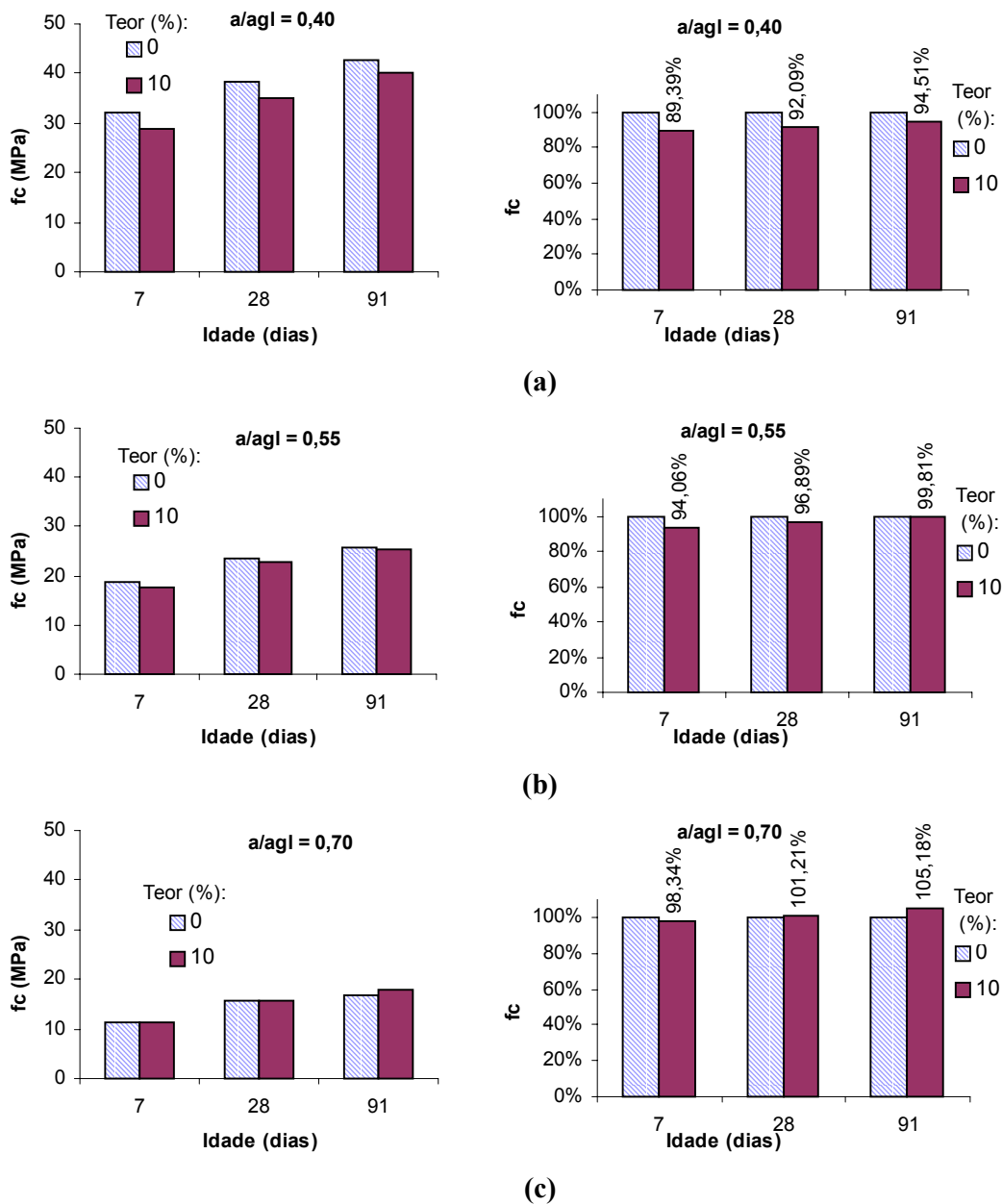


Figura 6.13 Comparação entre os efeitos das interações ID x TE= 10% e ID x TE= 0% (referência) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c) **a)** a/agl. = 0,40 **b)** a/agl. = 0,55 **c)** a/agl. = 0,70

6.1.1.6 Efeito da Interação da Relação Água/aglomerante (a/agl.) e da Idade (ID) sobre a Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto

O efeito da interação de 1ª ordem da relação água/aglomerante (a/agl.) e idade (ID) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c) do concreto é apresentado na Figura 6.14, Figura 6.15, Figura 6.16 e Figura 6.17. O gráfico da Figura 6.14 foi construído variando os valores codificados de ID para cada valor codificado de a/agl., mantendo-se o fator

controlável TE no ponto médio de seu intervalo de codificação. O mesmo procedimento foi utilizado na construção dos gráficos representados na Figura 6.15, Figura 6.16 e Figura 6.17. Entretanto na Figura 6.15, manteve-se o fator controlável TE com valor codificado igual a 0,5, o que equivale a um teor de substituição de cimento por EGF (TE) igual a 0% (concreto referência), já na Figura 6.16, o fator controlável TE foi mantido com valor codificado igual a 0,7, o que equivale a um teor de substituição de cimento por EGF (TE) igual a 10% e finalmente na Figura 6.17, manteve-se TE com valor codificado igual a 1,5, o que equivale a um teor de substituição de cimento por EGF (TE) igual a 50%.

Os valores da resistência à compressão uniaxial (f_c), para cada um dos níveis do fator controlável TE, foram obtidos utilizando a equação de modelamento de f_c , conforme item 6.1.1, sendo expressos na Tabela 6.10, Tabela 6.11, Tabela 6.12 e Tabela 6.13, em função dos valores dos níveis codificados dos fatores controláveis, relacionados aos seus respectivos níveis reais.

Na Figura 6.14 a Figura 6.17, observa-se, como esperado, maior crescimento de f_c para relações água/aglomerantes menores. Além disso, houve ganho significativo de resistência à compressão aos 28 dias, independentemente da relação água/aglomerante, mantendo esta tendência evolutiva até idade mais avançadas de 91 dias (comportamento provavelmente associado à reação pozolânica e ao efeito filer). No caso do concreto com 10% de substituição de cimento por EGF, os resultados de f_c mantêm-se muito próximos e em alguns casos superiores aos resultados de f_c do concreto referência, conforme discutido nos itens 6.1.1.4 e 6.1.1.5.

Tabela 6.10 Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

(a)					(b)				
$TE = 1,1$					$TE = 30\%$				
Idade					Idade (dias)				
0,5					7				
0,75					28				
1,5					91				
a/agl	0,551	20,88	27,74	33,48	0,40	20,88	27,74	33,48	
	1,025	12,31	17,86	21,23	0,55	12,31	17,86	21,23	
	1,5	7,07	12,13	14,63	0,70	7,07	12,13	14,63	

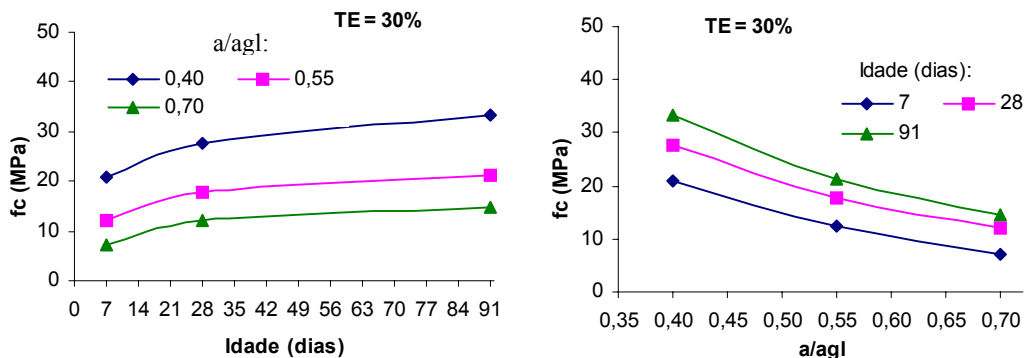


Figura 6.14 Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c)

Tabela 6.11 Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para o concreto referência) **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		TE = 0,5					TE = 0%			
		Idade					Idade (dias)			
a/agl		0,5	0,75	1,5		7	28	91		
		0,551	32,09	38,23	42,67		0,40	32,09	38,23	42,67
		1,025	18,68	23,50	25,57		0,55	18,68	23,50	25,57
	1,5	11,34	15,68	16,87		0,70	11,34	15,68	16,87	

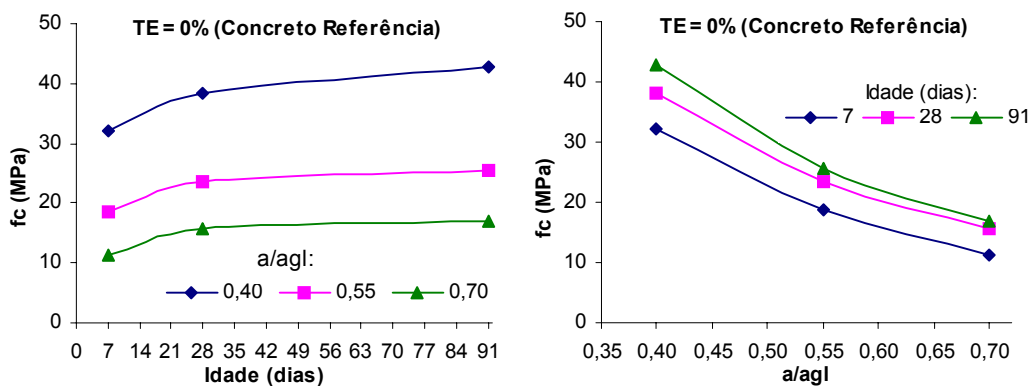


Figura 6.15 Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para o concreto referência) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c)

Tabela 6.12 Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para TE igual a 10%) **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		TE = 0,7					TE = 10%		
		Idade					Idade (dias)		
		0,5	0,75	1,5			7	28	91
a/agl	0,551	28,69	35,20	40,32	a/agl	0,40	28,69	35,20	40,32
	1,025	17,57	22,77	25,52		0,55	17,57	22,77	25,52
	1,5	11,15	15,87	17,74		0,70	11,15	15,87	17,74

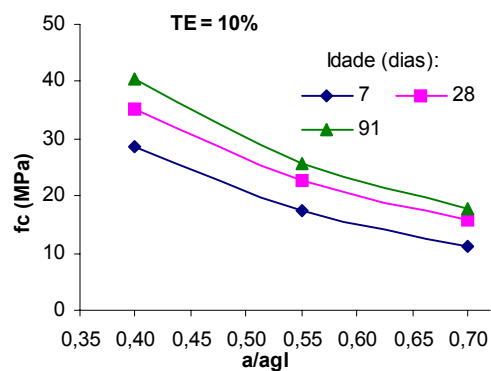
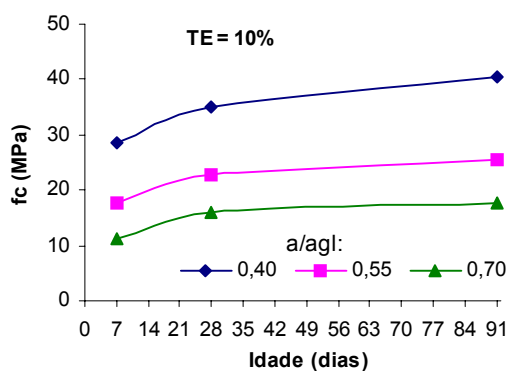


Figura 6.16 Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para teor de substituição de cimento por EGF igual a 10%) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c)

Tabela 6.13 Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para TE igual a 50%) **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		TE = 1,5					TE = 50%		
		Idade					Idade (dias)		
		0,5	0,75	1,5			7	28	91
a/agl	0,551	14,40	21,42	27,45	a/agl	0,40	14,40	21,42	27,45
	1,025	7,15	12,85	16,52		0,55	7,15	12,85	16,52
	1,5	2,61	7,83	10,62		0,70	2,61	7,83	10,62

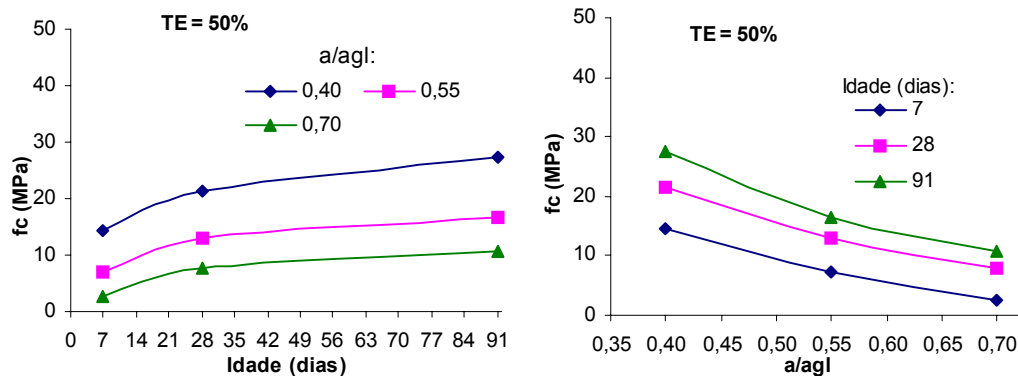


Figura 6.17 Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para teor de substituição de cimento por EGF igual a 50%) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c)

6.1.1.7 Percentual de Hidratação do Concreto

Como pode ser observado na Figura 6.18, Figura 6.19 e Figura 6.20, calculou-se o percentual de hidratação do concreto em relação à idade de 28 dias, para o efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF (TE) e da idade (ID) sobre a resistência à compressão uniaxial do concreto (f_c). Estes gráficos foram obtidos variando os valores codificados de ID para cada valor codificado de TE, mantendo o fator controlável água/aglomerante (a/agl.) com valor codificado igual a 0,551, o que equivale a relação água/aglomerante (a/agl) igual a 0,40, representado pela Figura 6.18, bem como, mantendo o fator controlável a/agl. com valor codificado igual a 1,025, o que equivale a relação água/aglomerante (a/agl) igual a 0,55, como mostra a Figura 6.19 e também, conforme Figura 6.20, mantendo o fator controlável a/agl. com valor codificado igual a 1,5, o que equivale a relação água/aglomerante (a/agl) igual a 0,70.

Conforme discutido no item 6.1.1.4, normalmente a adição de materiais pozolânicos ao concreto, está associado ao desenvolvimento mais lento das resistências em idades iniciais e ao acréscimo de resistência em idades mais avançadas, quando comparado a concretos produzidos sem adições pozolânicas. Percebe-se exatamente a ocorrência deste comportamento ao observar a Figura 6.18, Figura 6.19 e Figura 6.20, comparando-se os concretos com EGF com o concreto referência. Na Figura 6.20, a diferença na evolução de f_c dos concretos com EGF em relação ao concreto referência mostra-se mais acentuada, onde, por exemplo, enquanto que aos 7 dias de idade, o concreto referência atingia 72,32% da resistência à compressão aos 28 dias de idade, o concreto com TE=10% atingia 70,27%, o

concreto com TE=30% atingia 58,27% e o concreto com TE=50% atingia apenas 33,30% da resistência à compressão aos 28 dias de idade. Entretanto, o crescimento de f_c dos concretos com EGF em idades mais avançadas é bem perceptível, quando observa-se que para a idade de 91 dias, o concreto com TE=50% atingiu 135,62% da resistência à compressão aos 28 dias de idade, o concreto com TE=30% chegou a 120,60%, o concreto com TE=10% alcançou 111,83%, enquanto que o concreto referência obteve, aos 91 dias, apenas 107,61% da resistência à compressão aos 28 dias de idade.

As reações de hidratação dos compostos de cimento Portland são exotérmicas, desta forma, o processo de reação do cimento com água é acompanhado pela liberação de energia na forma de calor (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Sendo assim, o desenvolvimento lento das reações de hidratação de materiais aglomerantes compostos por adições pozolânicas (conseqüentemente com menor f_c nas primeiras idades), pode representar grande vantagem em termos de tecnologia do concreto, por exemplo, em estruturas de concreto massa (onde o elevado calor de hidratação pode desencadear fissuração por retração térmica), ou por outro lado, pode representar um problema quando necessita-se de rápida desfôrma em estruturas de concreto armado. Desta forma, concretos com lento desenvolvimento das reações de hidratação, que apresentam crescimento de resistência em idades mais avançadas, podem ser mais indicados ou não, dependendo do tipo de aplicação e do prazo relacionado à determinada obra.

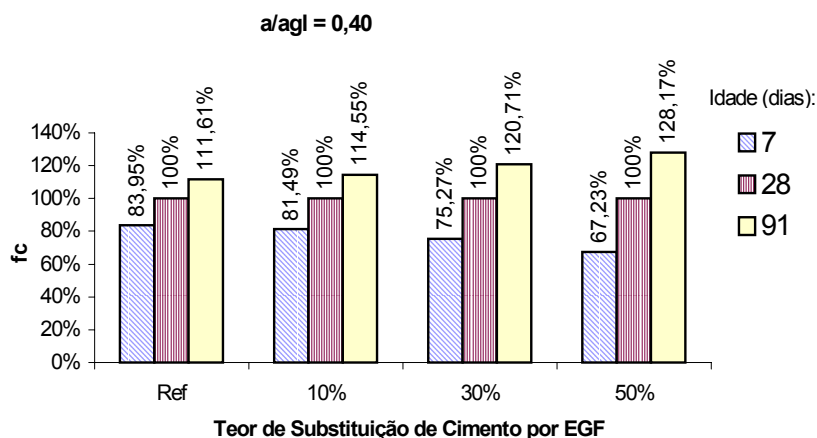


Figura 6.18 Percentual de hidratação do concreto com fator água/aglomerante igual a 0,40, em relação a resistência à compressão aos 28 dias

Além disso, nota-se que os concretos com relações água/aglomerante menores apresentaram maior crescimento das resistências à compressão nas primeiras idades (Figura 6.18) do que os concretos com relações água/aglomerante mais elevados (Figura 6.20).

Segundo NEVILLE (1997), a relação água/aglomerante tem influência sobre a velocidade de aumento da resistência do concreto, onde misturas com relação água/aglomerante baixas têm aumento de resistência mais rápido, expresso em porcentagem de resistência a longo prazo, do que as misturas com relação água/aglomerante menor.

Este comportamento deve-se a menor quantidade de água disponível, no caso de concretos com a/agl. menores, o que juntamente com a maior aproximação existente entre as partículas de aglomerante, possibilita a ocorrência de reações de hidratação numa velocidade bem maior do que no caso de concretos com relações água/aglomerante maiores.

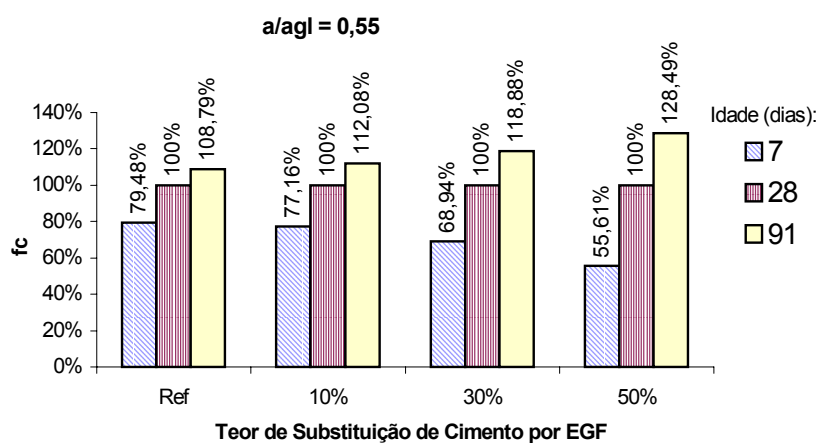


Figura 6.19 Percentual de hidratação do concreto com fator água/aglomerante igual a 0,55, em relação a resistência à compressão aos 28 dias

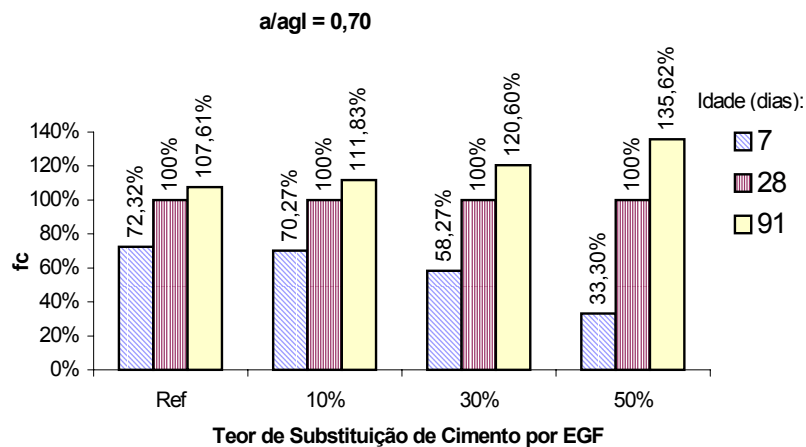


Figura 6.20 Percentual de hidratação do concreto com fator água/aglomerante igual a 0,70, em relação a resistência à compressão aos 28 dias

6.1.1.8 Estimativa do Consumo de Cimento (CC)

A viabilidade econômica representada pela estimativa do consumo de cimento (CC) em termos de resistência à compressão, pode ser útil na verificação da existência ou não de vantagens técnicas e econômicas do uso de materiais alternativos no concreto, como no caso de concretos com escória granulada de fundição (EGF). Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), no proporcionamento dos materiais constituintes do concreto é importante reconhecer que cimento custa muito mais que agregado (10 vezes ou mais), e portanto, todo o empenho possível deve ser feito no sentido de reduzir o consumo de cimento numa certa mistura, sem, naturalmente, sacrificar as propriedades desejadas do concreto, especialmente a durabilidade e a resistência.

A representação da estimativa de consumo de cimento (CC), para este projeto de pesquisa, foi realizada através da construção de gráficos obtidos do ajuste das curvas de dosagem para cada teor de substituição de cimento por EGF, incluindo o referência. A Tabela 6.14 apresenta os resultados dos consumos de cimento (CC) calculados para cada um dos 12 traços do projeto de pesquisa, em função da resistência à compressão média das três repetições da matriz experimental (aos 28 dias de idade dos concretos). O diagrama de dosagem dos concretos referência e com EGF, para as resistências médias dos concretos aos 28 dias de idade, é apresentado na Figura 6.21.

Tabela 6.14 Consumo de cimento para idade de 28 dias dos concretos referência e com EGF

<i>Idade = 28 dias</i>				
a/agl	Teor de substituição de cimento por EGF	Fc₂₈ Médio (MPa)	m (kg/kg)	Consumo_{cimento} (kg/m³)
0,40	Ref	37,41	3,72	475,79
0,385	10%	37,13	3,72	435,61
0,399	30%	28,87	3,72	346,07
0,384	50%	21,82	3,72	261,30
0,502	Ref	29,30	5,2	363,62
0,507	10%	25,58	5,2	329,93
0,516	30%	19,07	5,2	263,02
0,55	50%	12,65	5,2	194,78
0,651	Ref	18,90	6,68	290,24
0,664	10%	15,33	6,68	262,84
0,683	30%	11,54	6,68	209,06
0,70	50%	7,69	6,68	155,97

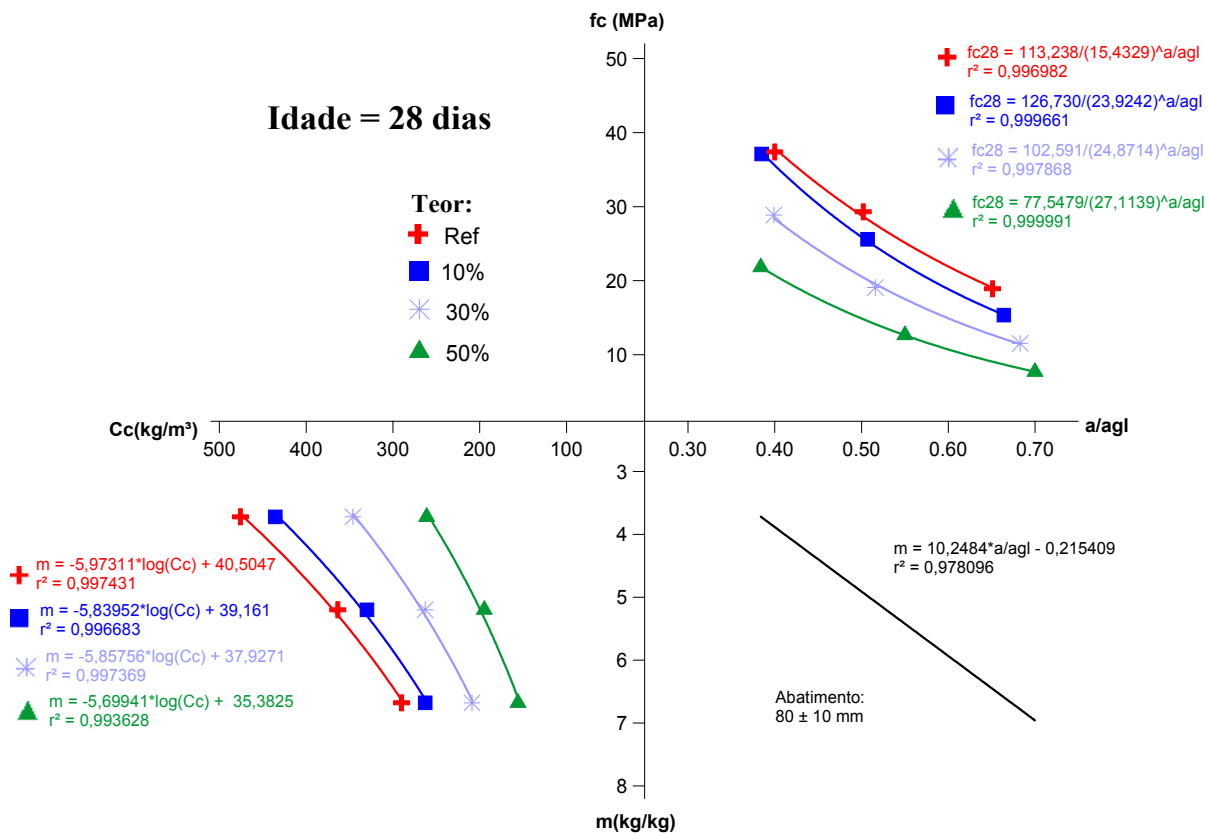


Figura 6.21 Diagrama de dosagem dos concretos referência e com EGF, para a idade de 28 dias

Como discutido nos itens 6.1.1.4, 6.1.1.5 e 6.1.1.7, os concretos com EGF apresentaram maior crescimento de resistência para idade de 91 dias. Desta forma, considerou-se importante apresentar os consumos de cimento, em função das resistências médias à compressão adquiridas nesta idade (91 dias), pois estas resistências representam a real contribuição da EGF quando aplicada no concreto, em comparação com o concreto referência. O diagrama de dosagem dos concretos referência e com EGF, para as resistências médias à compressão dos concretos aos 91 dias de idade, é apresentado na Figura 6.22. A Tabela 6.15 mostra os resultados dos consumos de cimento (CC) calculados para cada um dos 12 traços do projeto de pesquisa, em função da resistência à compressão média das três repetições da matriz experimental, para a idade de 91 dias dos concretos referência e com EGF.

NAWY (1996), ao propor um método de dosagem de concretos de alta resistência, apresentou tabelas onde considera as idades de 28 e 56 dias no proporcionamento dos materiais para as dosagens, pois segundo o autor, como a maioria das estruturas estão sujeitas à carga de serviço após 60 a 90 dias, a escolha da proporção de mistura segundo o modelo de resistência aos 28 dias oferece uma grande margem para os concretos de alta resistência, onde

os resultados de resistência à compressão média excederiam a resistência especificada. Embora este projeto de pesquisa avalie o desempenho mecânico de concretos convencionais, visto que estes concretos com EGF apresentam maiores resistências em idades mais avançadas, adaptar esta sugestão de Nawy para uso de concretos com EGF poderia ser útil, dependendo de cada situação de uso.

Tabela 6.15 Consumo de cimento para idade de 91 dias dos concretos referência e com EGF

<i>Idade = 91 dias</i>				
a/agl	Teor de substituição de cimento por EGF	Fc₉₁ Médio (MPa)	m (kg/kg)	Consumo_{cimento} (kg/m³)
0,40	Ref	40,56	3,72	475,79
0,385	10%	45,54	3,72	435,61
0,399	30%	33,95	3,72	346,07
0,384	50%	28,05	3,72	261,30
0,502	Ref	29,34	5,2	363,62
0,507	10%	28,22	5,2	329,93
0,516	30%	23,11	5,2	263,02
0,55	50%	16,72	5,2	194,78
0,651	Ref	19,8	6,68	290,24
0,664	10%	19,35	6,68	262,84
0,683	30%	16,04	6,68	209,06
0,70	50%	10,77	6,68	155,97

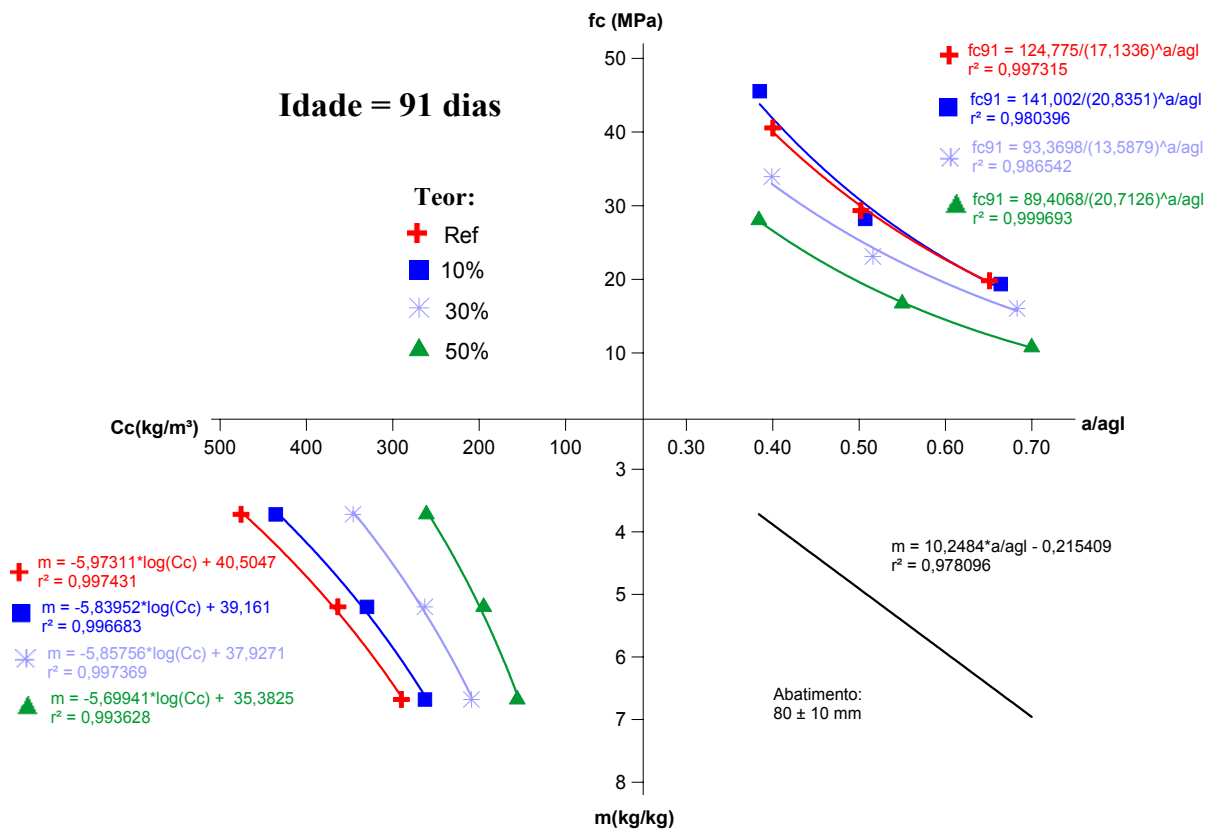


Figura 6.22 Diagrama de dosagem dos concretos referência e com EGF, para a idade de 91 dias

A Figura 6.23 e Figura 6.27 mostram o consumo de cimento em função da resistência à compressão uniaxial, respectivamente para as idades de 28 e 91 dias do concreto. Estes gráficos foram obtidos através do ajuste das curvas de dosagem apresentados na Figura 6.21 e Figura 6.22. A Figura 6.24 e Figura 6.28 expressam o consumo percentual de cimento dos concretos com EGF em comparação ao concreto referência, em termos de resistência à compressão uniaxial, respectivamente para as idades de 28 e 91 dias. Na Tabela 6.16 e Tabela 6.18 encontram-se os valores de consumo de cimento (CC) calculados, em função dos ajustes obtidos para os CC dos concretos referência e com EGF da Figura 6.21 e Figura 6.22, para as respectivas resistências à compressão mostradas na Figura 6.24 e Figura 6.28.

Observando-se a Figura 6.23 e Figura 6.27, percebe-se que, para uma mesma resistência à compressão (f_c), o consumo de cimento fica menor à medida que aumenta-se o teor de substituição de cimento por EGF, o que além de representar ganhos significativos com a economia de cimento, também pode representar ganhos técnicos, minimizando-se prejuízos de durabilidade causados ao concreto durante a hidratação do cimento, quando o consumo de cimento torna-se muito elevado. Isto ocorre, pois como as reações de hidratação dos

compostos do cimento Portland são exotérmicas, concretos com elevados consumos de cimento apresentam maior velocidade de desprendimento de calor nas primeiras idades, e conseqüentemente, possuem maior tendência à fissuração, maiores retrações química e térmica (NEVILLE, 1997).

A Figura 6.25 e Figura 6.26, bem como Figura 6.29 e Figura 6.30 mostram a relação custo/benefício (consumo de cimento para cada MPa de resistência) em função da resistência à compressão uniaxial, respectivamente para as idades de 28 e 91 dias dos concretos referência e com EGF. A Tabela 6.17 e Tabela 6.19 apresentam os valores de relação custo/benefício (expresso em termos de consumo de cimento por MPa) em função da resistência à compressão uniaxial, utilizados na construção dos gráficos apresentados na Figura 6.25, Figura 6.26, Figura 6.29 e Figura 6.30.

Conforme a Figura 6.30, fica bem evidente a contribuição da substituição de cimento por EGF, em termos de consumo de cimento para cada MPa de f_c , para as resistências médias à compressão obtidas nos concretos com 91 dias de idade. Observa-se que, por exemplo, para produzir um concreto com $f_{c91}=25\text{MPa}$, o consumo de cimento por MPa (CC/MPa) para o concreto com TE=10% é 92,41% do CC/MPa do concreto referência, sendo 84,55% no caso do concreto com TE=30%, e chegando a apenas 74,13% do CC/MPa do concreto referência, para o concreto com TE=50%, o que representa uma economia de 25,87%, em termos de cimento consumido por MPa quando utiliza-se 50% de substituição de cimento por EGF, para obter a mesma resistência à compressão de 25MPa, aos 91 dias (Figura 6.30).

AÏTCIN (2000), ao abordar projeções futuras sobre o concreto afirma que, tanto empreiteiros quanto proprietários de companhias de cimento e concreto devem compreender que o importante não é o custo de 1m^3 de concreto, mas muito mais importante é o custo de 1 MPa de concreto ou de 1 ano de vida útil de uma estrutura. Ainda enfatiza que, quando a indústria do cimento e concreto, como também empreiteiros adotarem este princípio, a indústria da construção terá dado um grande passo adiante.

Também pode ser observado na Figura 6.24, Figura 6.26, Figura 6.28 e Figura 6.30, ao se analisar o consumo de cimento para o mesmo nível de resistência à compressão, em idades diferentes (28 e 91 dias), que a vantagem econômica e técnica representada pelo menor consumo de cimento é mais pronunciada para a idade de 91 dias, pois é justamente nesta idade que a contribuição da EGF foi maior em termos de resistência à compressão (as resistências à compressão dos concretos com EGF apresentaram maior crescimento para

idades mais avançadas, de 91 dias). Isto resulta do fato de que a quantidade de cimento na mistura influencia no desprendimento total de calor, assim com a substituição de parte do cimento em concretos por materiais alternativos, as reações são mais lentas, atingindo-se maiores resistências em idades mais avançadas, como discutido no item 6.1.1.7.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994, pág. 314), “*sob mesmas condições, a substituição de cimento por materiais pozolânicos ou similares representa uma redução direta no custo dos materiais. Além disso, no futuro todas as nações terão de considerar a economia indireta que representa a utilização adequada dos resíduos industriais, reduzindo a poluição e preservando as fontes de recursos naturais, ao invés de lançá-los irresponsavelmente no meio ambiente*”.

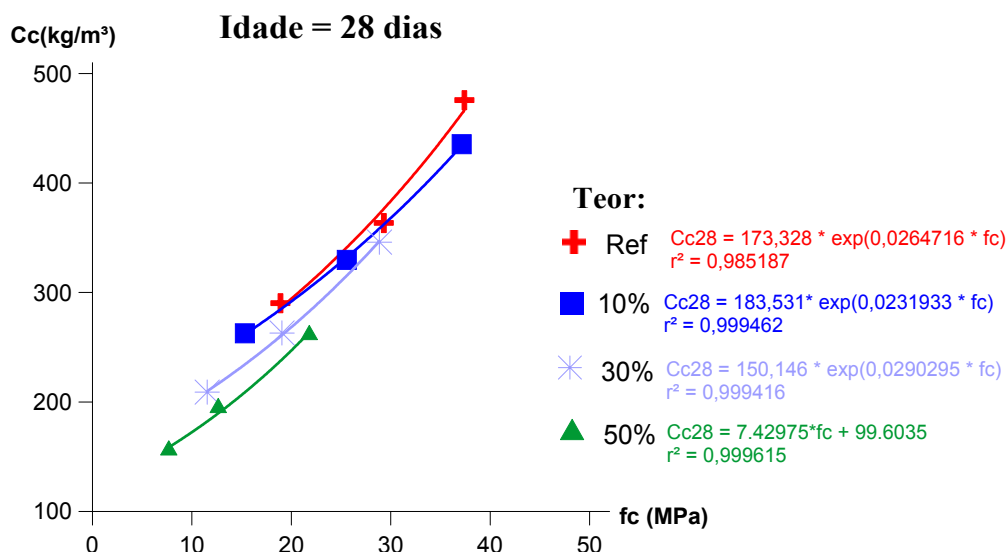


Figura 6.23 Consumo de cimento x Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias de idade do concreto

Tabela 6.16 Consumo de cimento em função da resistência à compressão uniaxial aos 28 dias de idade, dos concretos referência e com EGF

f _{c28} (MPa)	Consumo de Cimento (kg/m ³)							
	Ref.		10%		30%		50%	
20	294,31	100%	291,85	99,17%	268,32	91,17%	248,20	84,33%
25	335,95	100%	327,74	97,55%	310,24	92,35%	285,35	84,94%
30	383,50	100%	368,04	95,97%	358,70	93,53%		
35	437,77	100%	413,29	94,41%				
40	499,72	100%	464,11	92,87%				

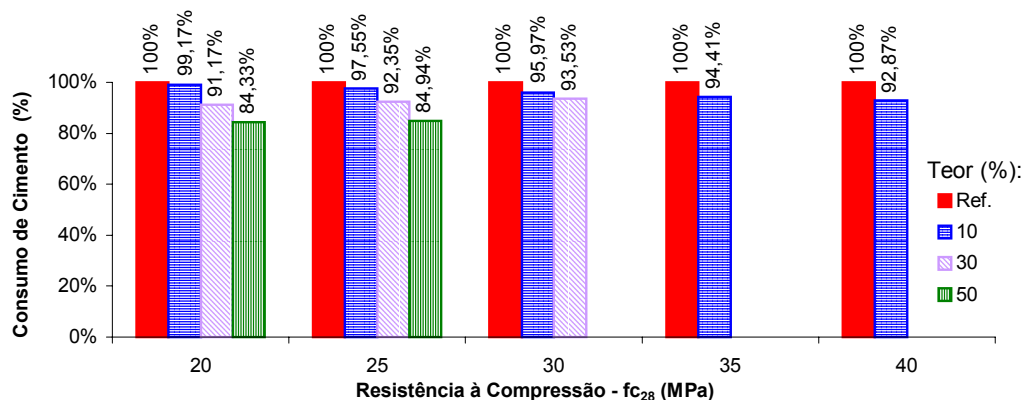


Figura 6.24 Percentual de consumo de cimento em relação ao concreto referência x Resistência à compressão uniaxial, para idade de 28 dias

Tabela 6.17 Relação custo/benefício (expresso em termos de consumo de cimento por MPa) em função da resistência à compressão uniaxial aos 28 dias de idade, dos concretos referência e com EGF

f_{c28} (MPa)	Custo/Benefício (kg Cimento/MPa)											
	Ref.		10%		30%		50%					
	CC (kg/m3)	CC/ f_{c28}	CC (kg/m3)	CC/ f_{c28}	CC (kg/m3)	CC/ f_{c28}	CC (kg/m3)	CC/ f_{c28}				
20	294,31	14,72	100%	291,85	14,59	99,17%	268,32	13,42	91,17%	248,20	12,41	84,33%
25	335,95	13,44	100%	327,74	13,11	97,55%	310,24	12,41	92,35%	285,35	11,41	84,94%
30	383,50	12,78	100%	368,04	12,27	95,97%	358,70	11,96	93,53%			
35	437,77	12,51	100%	413,29	11,81	94,41%						
40	499,72	12,49	100%	464,11	11,60	92,87%						

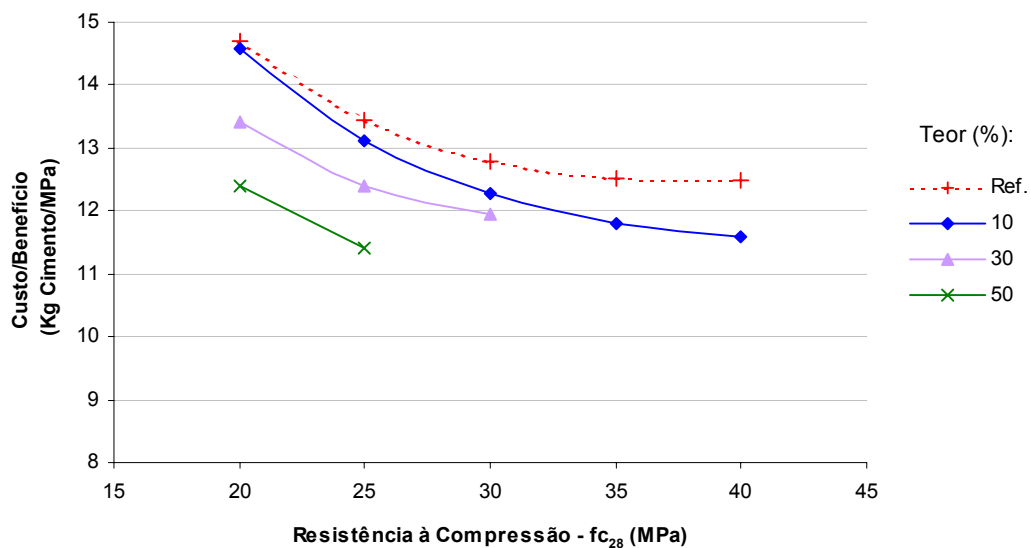


Figura 6.25 Custo/benefício x Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias de idade do concreto

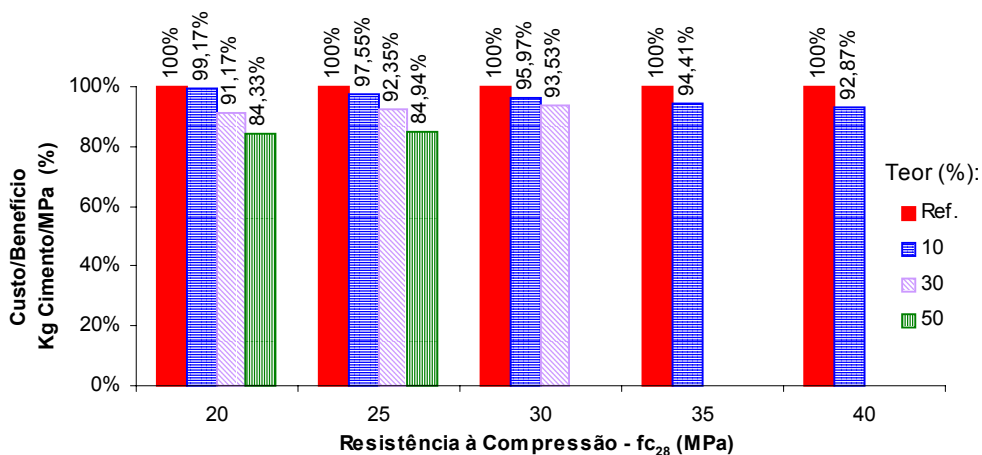


Figura 6.26 Custo/benefício em relação ao concreto referência x Resistência à compressão uniaxial, para idade de 28 dias

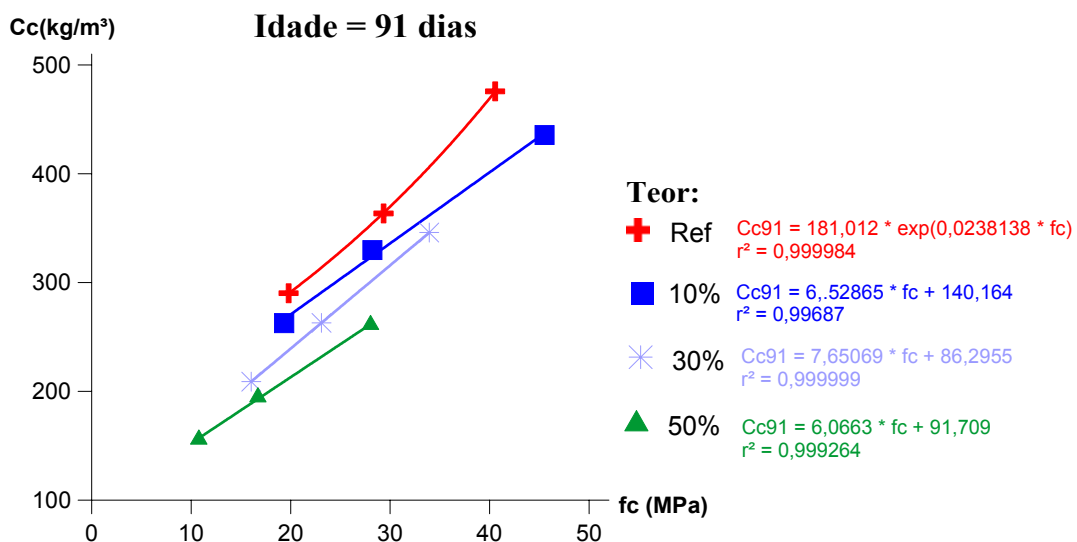


Figura 6.27 Consumo de cimento x Resistência à compressão uniaxial aos 91 dias de idade do concreto

Tabela 6.18 Consumo de cimento em função da resistência à compressão uniaxial aos 91 dias de idade, dos concretos referência e com EGF

$f_{c_{91}}$ (MPa)	Consumo de Cimento - CC (kg/m ³)							
	Ref.		10%		30%		50%	
20	291,44	100%	270,74	92,90%	239,31	82,11%	213,04	73,10%
25	328,29	100%	303,38	92,41%	277,56	84,55%	243,37	74,13%
30	369,81	100%	336,02	90,86%	315,82	85,40%	273,70	74,01%
35	416,57	100%	368,67	88,50%	354,07	85,00%		
40	469,24	100%	401,31	85,52%				

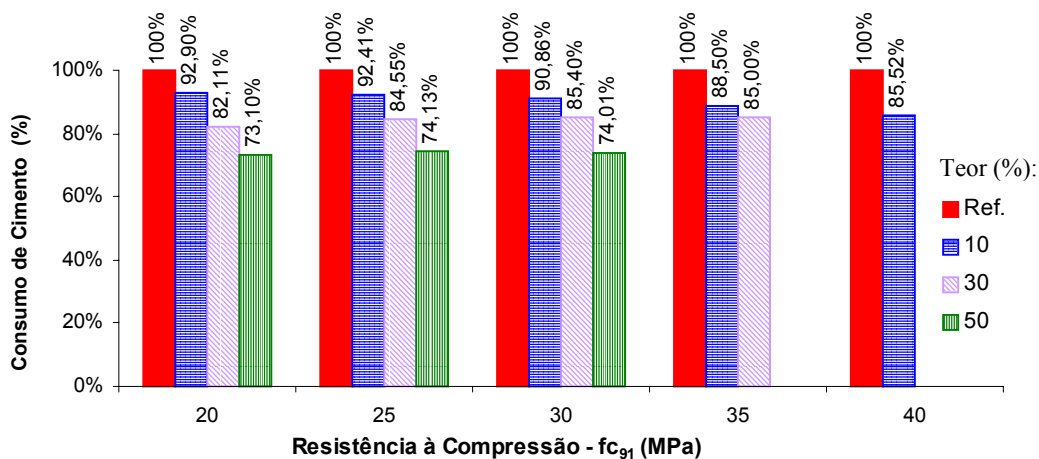


Figura 6.28 Percentual de consumo de cimento em relação ao concreto referência x Resistência à compressão uniaxial, para idade de 91 dias

Tabela 6.19 Relação custo/benefício (expresso em termos de consumo de cimento por MPa) em função da resistência à compressão uniaxial aos 91 dias de idade, dos concretos referência e com EGF

f_{c91} (MPa)	Custo/Benefício (kg Cimento/MPa)											
	Ref.			10%			30%			50%		
	CC (kg/m ³)	CC/ f_{c91}	100%	CC (kg/m ³)	CC/ f_{c91}	92,90%	CC (kg/m ³)	CC/ f_{c91}	82,11%	CC (kg/m ³)	CC/ f_{c91}	73,10%
20	291,44	14,57	100%	270,74	13,54	92,90%	239,31	11,97	82,11%	213,04	10,65	73,10%
25	328,29	13,13	100%	303,38	12,14	92,41%	277,56	11,10	84,55%	243,37	9,73	74,13%
30	369,81	12,33	100%	336,02	11,20	90,86%	315,82	10,53	85,40%	273,70	9,12	74,01%
35	416,57	11,90	100%	368,67	10,53	88,50%	354,07	10,12	85,00%			
40	469,24	11,73	100%	401,31	10,03	85,52%						

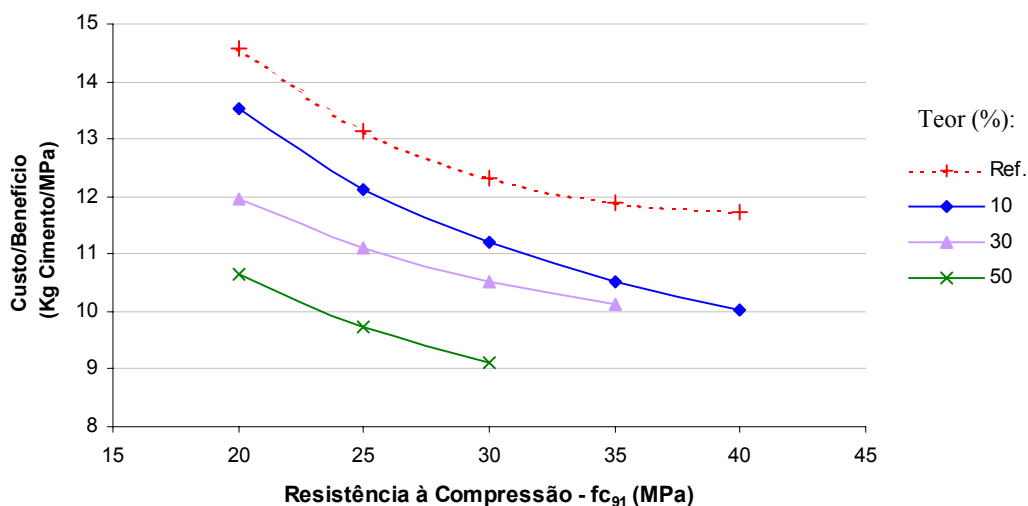


Figura 6.29 Custo/benefício x Resistência à compressão uniaxial aos 91 dias de idade do concreto

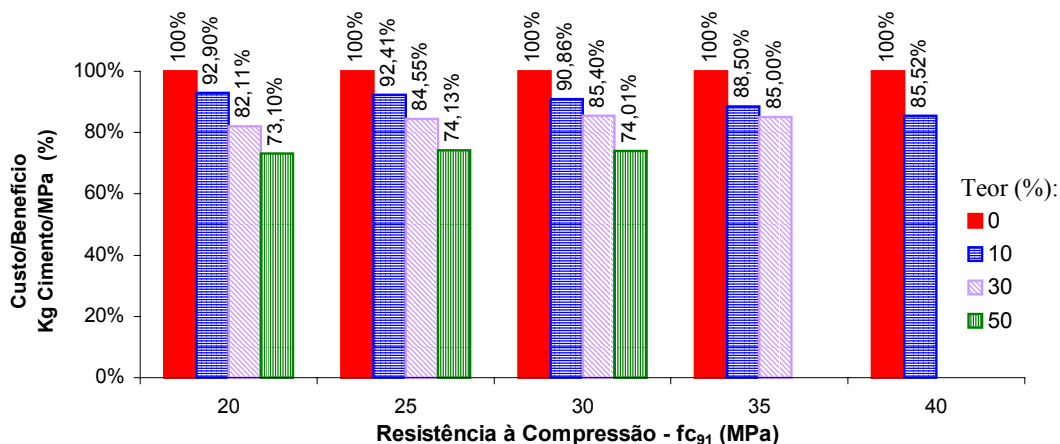


Figura 6.30 Custo/benefício em relação ao concreto referência x Resistência à compressão uniaxial, para idade de 91 dias

6.1.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

O modelo do comportamento da resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$) do concreto com substituição de parte do cimento por escória granulada de fundição (EGF), bem como do concreto referência (sem EGF), obtido através de análise de regressão linear múltipla (programa estatístico Statgraphics) é apresentado na equação 6.2:

$$\begin{aligned}
 f_t'D = & -34,506 + 0,01612 \cdot \frac{1}{(a/agl.)^5} + 10,4931 \cdot \frac{1}{(TE)^{0,1}} + 23,7707 \cdot (idade)^{0,1} \\
 & + 9,54919 \cdot \frac{1}{(a/agl. + TE)^{0,3}} - 5,63454 \cdot \frac{(idade)^{0,3}}{(TE)^{0,2}} - 0,0172324 \cdot \frac{(idade)^{0,1}}{(a / agl. \cdot TE)^3}
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

Para o modelo representado pela equação 6.2 chegou-se a um *nível de confiança* de 95% e o coeficiente de determinação foi $R^2 = 84,0904\%$. É importante observar que nos ensaios de resistência à tração (f_t) normalmente ocorre maior variabilidade nos resultados do que nos de resistência à compressão (f_c), o que resulta num valor de R^2 de f_t menor quando comparado com f_c . No anexo 14 encontra-se o resumo da análise estatística de regressão linear múltipla, realizada para obtenção do modelo de $f_t'D$, representado pela equação 6.2.

Na equação 6.2, observa-se que os fatores controláveis, teor de substituição do cimento por escória granulada de fundição (TE), relação água/aglomerante (a/agl.) e idade do concreto

(ID) exercem efeito significativo sobre a variável de resposta ($f_t'D$). Além disso, as interações de 1ª ordem dos fatores controláveis, $a/agl. \times TE$ e $TE \times ID$, e a interação de 2ª ordem dos fatores controláveis, $a/agl. \times TE \times ID$, também exercem efeito significativo sobre $f_t'D$.

Assim como foi apresentado no item 6.1.1, este modelo do comportamento da resistência à tração por compressão diametral de concretos, com e sem EGF, também é válido para o intervalo dos níveis dos fatores controláveis que fazem parte deste projeto experimental.

6.1.2.1 Efeito Isolado da Relação Água/aglomerante (a/agl.) sobre a Resistência à Tração por Compressão Diametral do Concreto

Através da equação 6.2, apresentada no item 6.1.2, que descreve o modelo do comportamento do concreto com e sem EGF quanto à resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$), pode-se verificar o efeito isolado da relação água/aglomerante (a/agl.) sobre $f_t'D$. Desta forma, obtiveram-se os valores de $f_t'D$ para cada valor codificado dos níveis dos fatores controláveis (Tabela 6.20a), codificação este necessária para utilização da equação 6.2, bem como para cada valor real dos níveis dos fatores controláveis (Tabela 6.20b), utilizados na construção do gráfico apresentado na Figura 6.31. Este gráfico foi obtido variando os valores codificados da relação água/aglomerante (a/agl.) e mantendo os demais fatores controláveis no ponto médio de seu intervalo de codificação.

Como mostra a Figura 6.31, o comportamento do concreto quanto à $f_t'D$ confirma a relação inversa existente entre resistência e relação água/aglomerante (a/agl.). Segundo NEVILLE (1997) a resistência de uma peça é determinada pela resistência de seu elemento mais fraco. No concreto, a zona de transição pasta-agregado, o mais fraco do concreto, passa a comandar sua ruptura. Sendo assim, da mesma forma que no caso da resistência à compressão, apresentado no item 6.1.1.1, concretos com fatores a/agl. elevados, normalmente possuem zona de transição mais porosa, resultando numa resistência à tração inferior aos concretos com a/agl. baixos (associados a uma zona de transição mais densa).

Tabela 6.20 Resultados de resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$) em função do efeito isolado da relação água/aglomerante (a/agl.) **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

(a)		(b)	
$ID = 0,75$		$ID = 28$	
$TE = 1,1$		$TE = 30\%$	
a/agl	$f_t'D$ (MPa)	a/agl	$f_t'D$ (MPa)
0,551	2,37	0,40	2,37
1,025	1,53	0,55	1,53
1,5	1,08	0,70	1,08

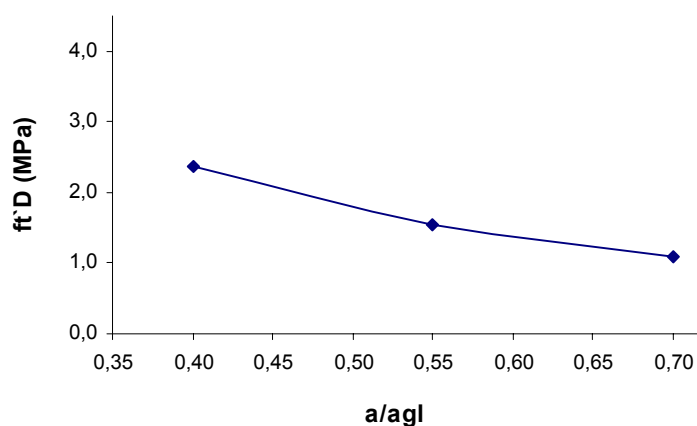


Figura 6.31 Efeito isolado da relação água/aglomerante (a/agl.) sobre a resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$)

6.1.2.2 Efeito Isolado do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) sobre a Resistência à Tração por Compressão Diametral do Concreto

O efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF (TE) sobre a resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$) é apresentado no gráfico ilustrado pela Figura 6.32. Este gráfico foi obtido variando os valores codificados do teor de substituição de cimento por EGF (TE), e mantendo os demais fatores controláveis no ponto médio de seu intervalo de codificação. Os resultados de $f_t'D$ para o efeito isolado de TE, em função dos níveis codificados e respectivos níveis reais dos fatores controláveis, adquiridos utilizando-se a equação 6.2, estão expressos na Tabela 6.21.

Tabela 6.21 Resultados de resistência à tração por compressão diametral ($ft'D$) em função do efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

(a)		(b)	
$a/agl. = 1,025$		$a/agl. = 0,55$	
$ID = 0,75$		$ID = 28$	
Teor de Substituição de Cimento por EGF	$ft'D$	Teor de Substituição de Cimento por EGF (%)	$ft'D$
0,5	2,20	0	2,20
0,7	1,99	10	1,99
1,1	1,53	30	1,53
1,5	1,14	50	1,14

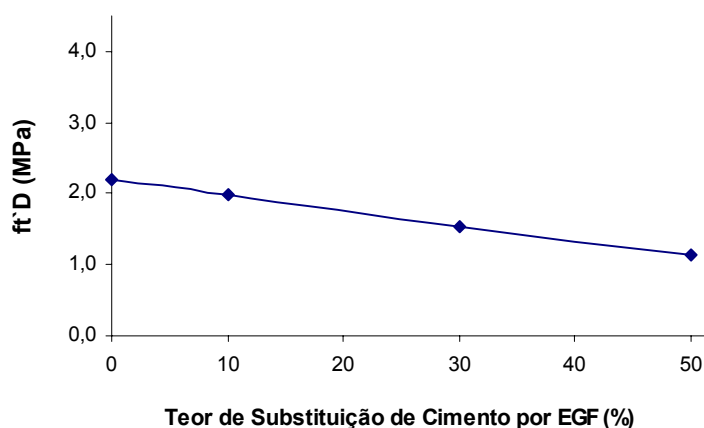


Figura 6.32 Efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a resistência à tração por compressão diametral ($ft'D$)

Observa-se na Figura 6.32, que assim como para a resistência à compressão (item 6.1.1.2), a resistência à tração por compressão diametral ($ft'D$) também diminui à medida que TE aumenta. Contudo, a avaliação do efeito das interações de 1ª ordem dos fatores controláveis, $a/agl. \times TE$ e $TE \times ID$ (itens 6.1.2.4 e 6.1.2.5), onde o comportamento em relação à $ft'D$ do concreto com e sem EGF é avaliado para todos os níveis dos fatores controláveis, apresenta uma interpretação mais detalhada, visto que este gráfico (Figura 6.32) foi construído utilizando-se apenas os níveis médios dos intervalos de codificação de $a/agl.$ e ID .

6.1.2.3 Efeito Isolado da Idade (ID) sobre a Resistência à Tração por Compressão Diametral do Concreto

A Figura 6.33 mostra o efeito isolado do fator controlável idade do concreto (ID), sobre a resistência à tração por compressão diametral ($ft'D$). O gráfico foi obtido variando os

valores codificados da idade (ID) e mantendo os níveis dos fatores controláveis $a/agl.$ e TE, no ponto médio de seu intervalo de codificação. Através da equação de modelamento de $ft'D$ para concretos com e sem EGF (equação 6.2), obtiveram-se os resultados de $ft'D$ para o efeito isolado da idade, apresentados na Tabela 6.22.

Tabela 6.22 Resultados de resistência à tração por compressão diametral ($ft'D$) em função do efeito isolado da idade **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

(a)		(b)	
$a/agl. = 1,025$		$a/agl. = 0,55$	
$TE = 1,1$		$TE = 30\%$	
Idade	$ft'D$ (MPa)	Idade (dias)	$ft'D$ (MPa)
0,5	1,20	7	1,20
0,75	1,53	28	1,53
1,5	2,02	91	2,02

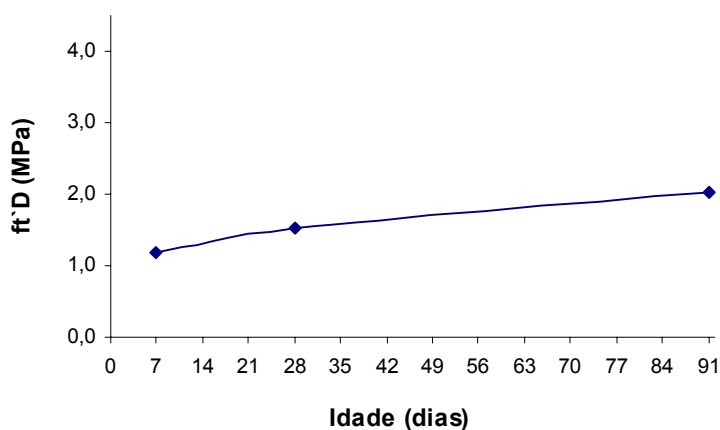


Figura 6.33 Efeito isolado da idade sobre a resistência à tração por compressão diametral ($ft'D$)

Observando-se a Figura 6.33, a resistência à tração por compressão diametral ($ft'D$) cresce com a idade. Esta verificação está de acordo com o esperado, visto que, conforme apresentado no item 6.1.1.3 (para o caso de fc), as reações de hidratação da pasta de cimento ocorrem ao longo do tempo.

6.1.2.4 Efeito da Interação da Relação Água/aglomerante (a/agl.) e do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) sobre a Resistência à Tração por Compressão Diametral do Concreto

A Figura 6.34, Figura 6.35 e Figura 6.36 ilustram o efeito da interação de 1ª ordem da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (TE) sobre a resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$). Utilizando-se a equação 6.2, obtiveram-se os resultados de $f_t'D$ para o efeito desta interação (a/agl. x TE), sendo apresentados na Tabela 6.23, Tabela 6.24 e Tabela 6.25, em função dos valores dos níveis codificados, bem como dos respectivos níveis reais dos fatores controláveis.

O gráfico, ilustrado pela Figura 6.34, foi obtido variando-se os valores codificados do teor de substituição de cimento por EGF (TE) para cada valor codificado da relação água/aglomerante (a/agl.), e mantendo os demais fatores controláveis no ponto médio de seu intervalo de codificação. O mesmo procedimento foi utilizado no caso dos gráficos representados pela Figura 6.35 e Figura 6.36, onde, no caso da Figura 6.35, o fator controlável idade (ID) foi mantido com valor codificado igual a 0,5, o que equivale a idade de 7 dias, e na Figura 6.36, o fator controlável idade (ID) foi mantido com valor codificado igual a 1,5, o que equivale a idade de 91 dias.

Embora para relações a/agl. maiores tenha ocorrido um acréscimo maior na resistência à compressão de concretos com 10% de substituição de cimento por EGF, esta contribuição do concreto com TE=10% não foi na mesma proporção quando avalia-se a resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$).

Observando-se a Figura 6.34, Figura 6.35 e Figura 6.36, nota-se que a resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$) dos concretos com substituição de parte do cimento por EGF aumenta com a idade, mas apenas o concreto com TE=10% apresenta a $f_t'D$ próxima à do concreto referência. Neste caso, percebe-se uma particularidade no comportamento quanto à resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$) de concretos com TE=10% em comparação ao comportamento quanto à resistência à compressão (f_c) de concretos com o mesmo teor (10%), onde no caso da resistência à tração por compressão diametral houve maior contribuição da substituição de 10% de cimento por EGF para os concretos de relação a/agl. menores. Como mostra a Figura 6.37a, para uma relação a/agl.=0,40, aos 7 dias de idade, o concreto com TE=10% apresentava $f_t'D$ igual a 99,22% da $f_t'D$ do concreto referência. Para a mesma relação a/agl. (0,40), aos 28 dias a $f_t'D$ do concreto com TE=10%

evoluiu para 101,56% da $f_t'D$ do concreto referência (Figura 6.37b), atingindo aos 91 dias, 105,57% da $f_t'D$ do concreto referência (Figura 6.37c).

Conforme LEITE (2001), principalmente no caso de tração, o estágio de propagação de fissuras necessário à ruptura é menor, desta forma, a resistência à ruptura de concretos à tração acaba sendo menor que a compressão. Talvez a maior fragilidade em relação à existência de fissuras explique o fato de concretos com TE=10% apresentarem melhor desempenho da $f_t'D$ para as relações a/agl. menores, visto que à medida que a relação a/agl. diminui, o concreto apresenta uma configuração mais densa, e portanto, mais resistente à ruptura por propagação de fissuras.

Tabela 6.23 Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE a) níveis codificados dos fatores controláveis b) níveis reais dos fatores controláveis

		(a)				(b)				
		ID = 0,75				ID = 28				
		Teor de Substituição de Cimento por EGF				Teor de Substituição de Cimento por EGF (%)				
		0,5	0,7	1,1	1,5	0	10	30	50	
a/agl	0,551	2,82	2,87	2,37	1,89	0,40	2,82	2,87	2,37	1,89
	1,025	2,20	1,99	1,53	1,14	0,55	2,20	1,99	1,53	1,14
	1,5	1,62	1,44	1,08	0,77	0,70	1,62	1,44	1,08	0,77

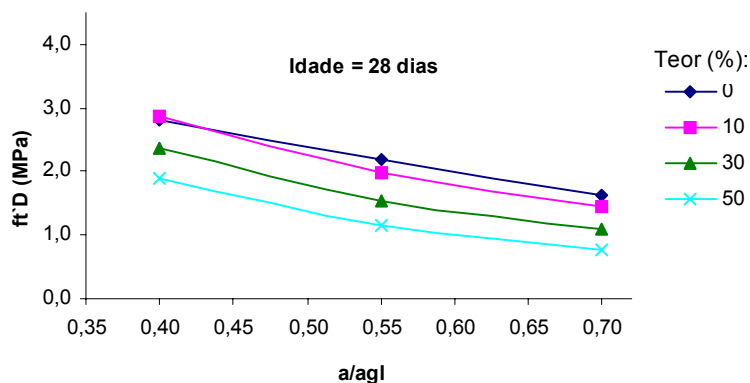


Figura 6.34 Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF sobre a resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$)

Tabela 6.24 Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE, para a idade de 7 dias **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a) <i>ID = 0,5</i> Teor de Substituição de Cimento por EGF						(b) <i>ID = 7</i> Teor de Substituição de Cimento por EGF (%)			
		0,5	0,7	1,1	1,5			0	10	30	50
a/agl	0,551	2,62	2,60	2,04	1,52	a/agl	0,40	2,62	2,60	2,04	1,52
	1,025	1,97	1,71	1,20	0,77		0,55	1,97	1,71	1,20	0,77
	1,5	1,38	1,16	0,74	0,40		0,70	1,38	1,16	0,74	0,40

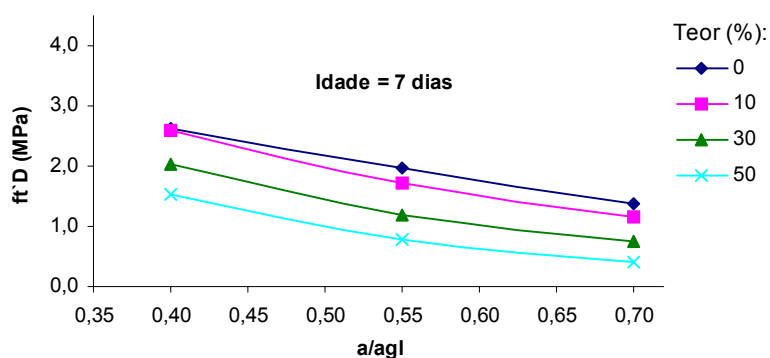


Figura 6.35 Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (para a idade de 7 dias) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)

Tabela 6.25 Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE, para a idade de 91 dias **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a) <i>ID = 1,5</i> Teor de Substituição de Cimento por EGF						(b) <i>ID = 91</i> Teor de Substituição de Cimento por EGF (%)			
		0,5	0,7	1,1	1,5			0	10	30	50
a/agl	0,551	3,05	3,22	2,85	2,44	a/agl	0,40	3,05	3,22	2,85	2,44
	1,025	2,48	2,36	2,02	1,70		0,55	2,48	2,36	2,02	1,70
	1,5	1,90	1,81	1,57	1,33		0,70	1,90	1,81	1,57	1,33

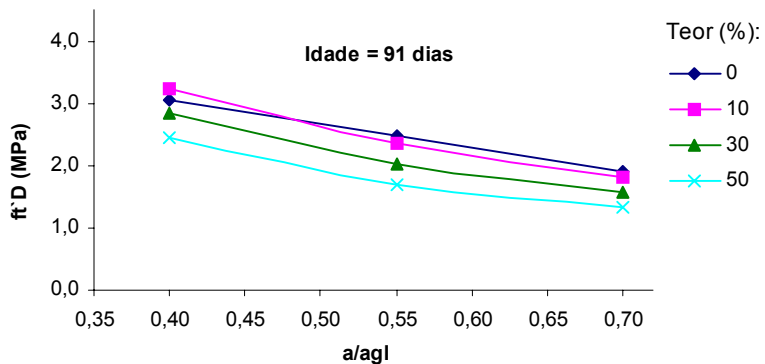
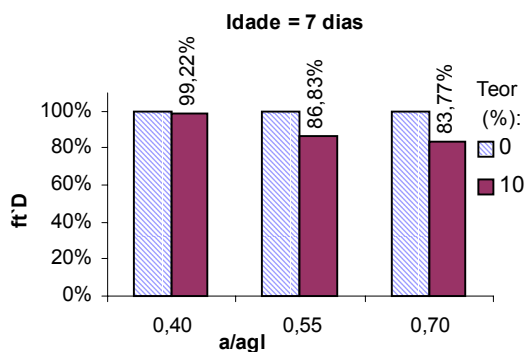
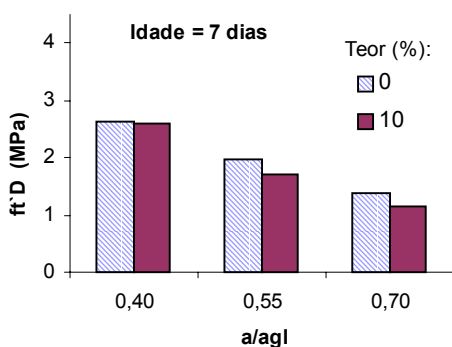
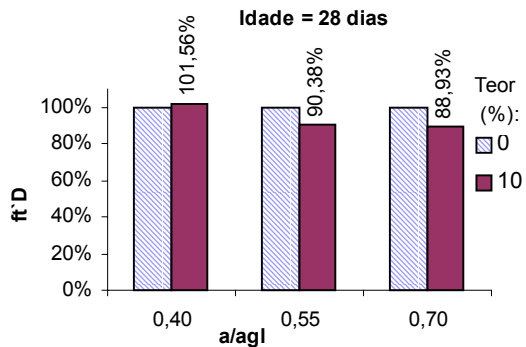
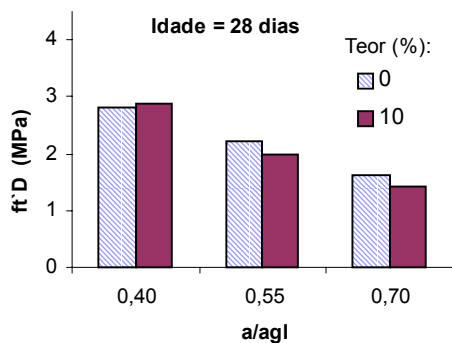


Figura 6.36 Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (para a idade de 91 dias) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)



(a)



(b)

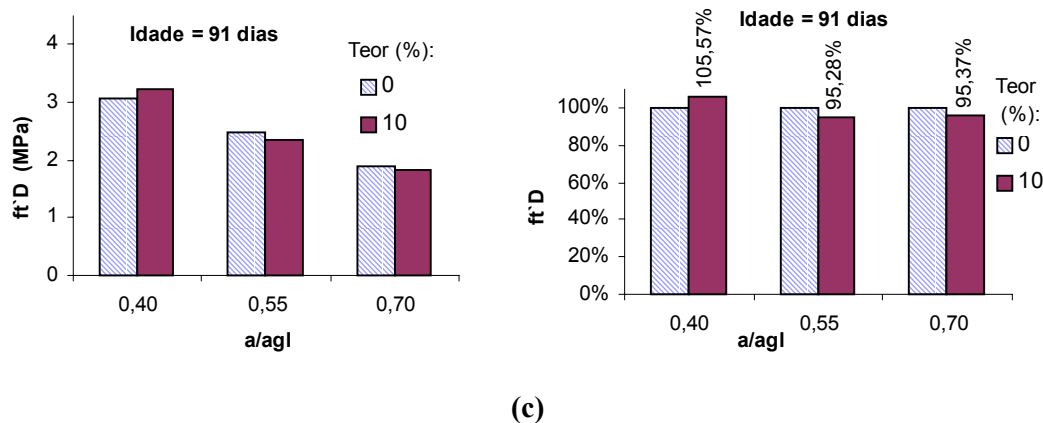


Figura 6.37 Comparação entre os efeitos das interações a/agl. x TE= 10% e a/agl. x TE= 0% (referência) sobre a resistência à tração por compressão diametral ($ft'D$) a) ID = 7 dias b) ID = 28 dias c) ID = 91 dias

6.1.2.5 Efeito da Interação do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) e da Idade (ID) sobre a Resistência à Tração por Compressão Diametral do Concreto

O efeito da interação de 1ª ordem do teor de substituição de cimento por EGF (TE) e da Idade (ID) sobre a resistência à tração por compressão diametral ($ft'D$) do concreto está ilustrado na Figura 6.38, Figura 6.39 e Figura 6.40. Através da equação de modelamento de $ft'D$ para concretos com EGF e referência (equação 6.2), foi possível calcular os valores de $ft'D$ para o efeito da interação TE x ID, em função dos níveis codificados dos fatores controláveis (necessários como entrada de dados na equação 6.2), e respectivos níveis reais destes fatores controláveis (utilizados para elaboração dos gráficos), como mostram a Tabela 6.26, Tabela 6.27 e Tabela 6.28.

O gráfico, representado pela Figura 6.38, foi obtido variando os valores codificados de ID para cada valor codificado de TE, e mantendo os demais fatores controláveis no ponto médio de seu intervalo de codificação. Assim também foram obtidos os gráficos representados pela Figura 6.39 e Figura 6.40, contudo no caso de gráfico da Figura 6.39, a relação água/aglomerante foi mantida com valor codificado igual a 0,551, o que equivale a relação água/aglomerante (a/agl.) igual a 0,40, enquanto que no gráfico da Figura 6.40, a relação água/aglomerante foi mantida com valor codificado igual a 1,5, o que equivale a relação água/aglomerante (a/agl.) igual a 0,70.

Tabela 6.26 Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação TE x ID **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a)			(b)			
		AC = 1,025			AC = 0,55			
		Idade			Idade (dias)			
		0,5	0,75	1,5	7	28	91	
Teor de Substituição de Cimento por EGF	0,5	1,97	2,20	2,48	0	1,97	2,20	2,48
	0,7	1,71	1,99	2,36	10	1,71	1,99	2,36
	1,1	1,20	1,53	2,02	30	1,20	1,53	2,02
	1,5	0,77	1,14	1,70	50	0,77	1,14	1,70

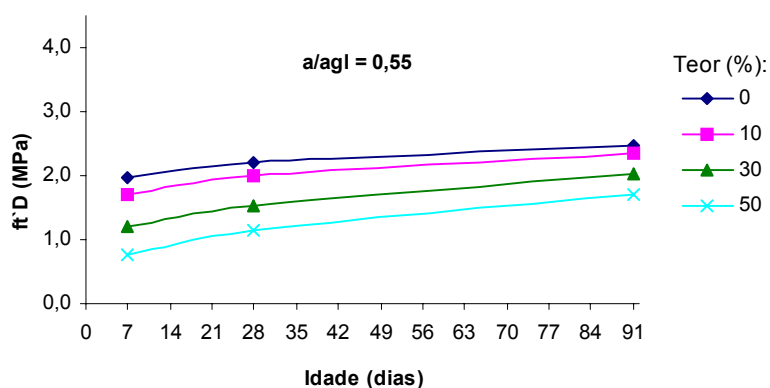


Figura 6.38 Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)

Tabela 6.27 Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação TE x ID, para relação água/aglomerante igual a 0,40 **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a)			(b)			
		AC = 0,551			AC = 0,40			
		Idade			Idade (dias)			
		0,5	0,75	1,5	7	28	91	
Teor de Substituição de Cimento por EGF	0,5	2,62	2,82	3,05	0	2,62	2,82	3,05
	0,7	2,60	2,87	3,22	10	2,60	2,87	3,22
	1,1	2,04	2,37	2,85	30	2,04	2,37	2,85
	1,5	1,52	1,89	2,44	50	1,52	1,89	2,44

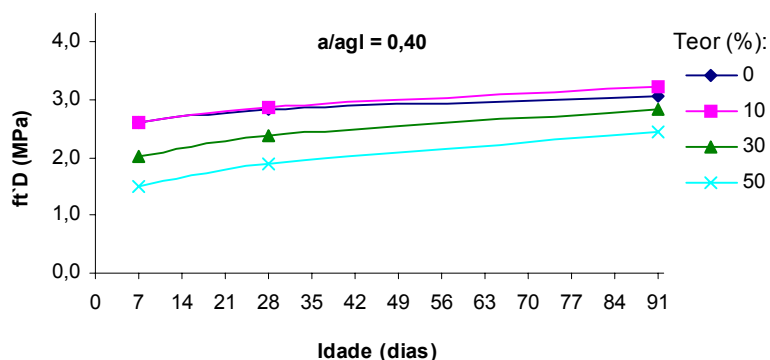


Figura 6.39 Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade (para relação água/aglomerante igual a 0,40) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)

Tabela 6.28 Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação TE x ID, para relação água/aglomerante igual a 0,70 **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a)			(b)				
		AC = 1,5			AC = 0,70				
		Idade			Idade (dias)				
		0,5	0,75	1,5		7	28	91	
Teor de Substituição de Cimento por EGF	0,5	1,38	1,62	1,90	Teor de Substituição de Cimento por EGF (%)	0	1,38	1,62	1,90
	0,7	1,16	1,44	1,81		10	1,16	1,44	1,81
	1,1	0,74	1,08	1,57		30	0,74	1,08	1,57
	1,5	0,40	0,77	1,33		50	0,40	0,77	1,33

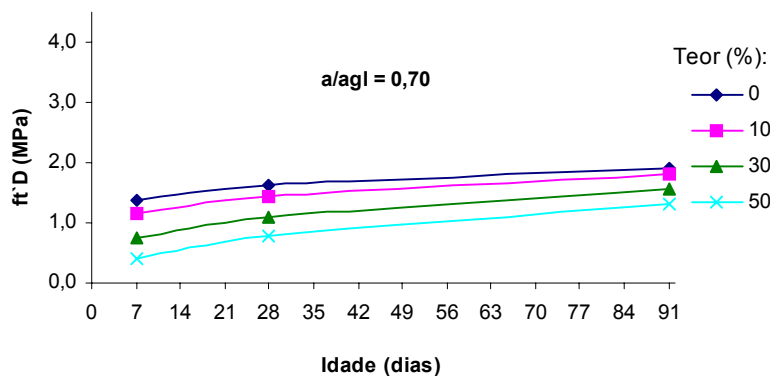
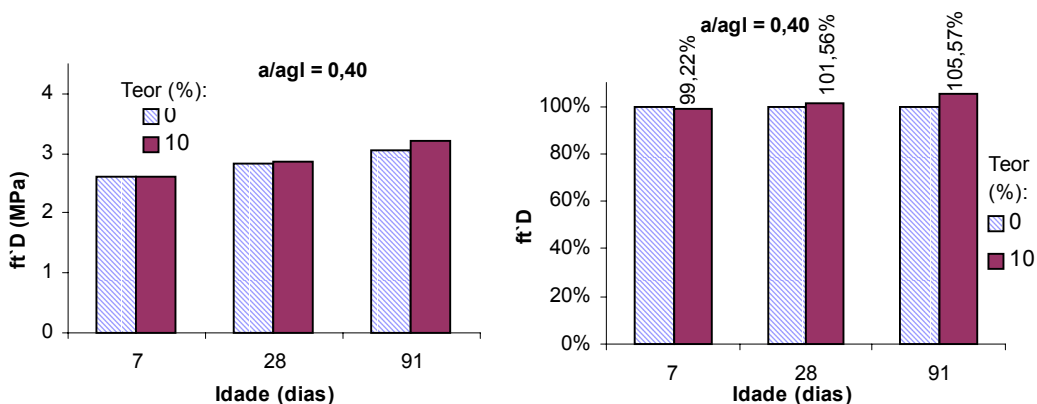
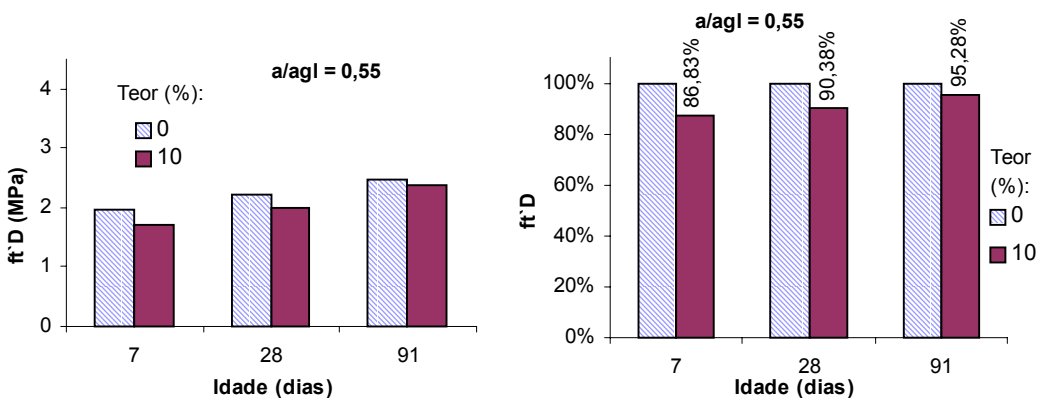


Figura 6.40 Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade (para relação água/aglomerante igual a 0,70) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)

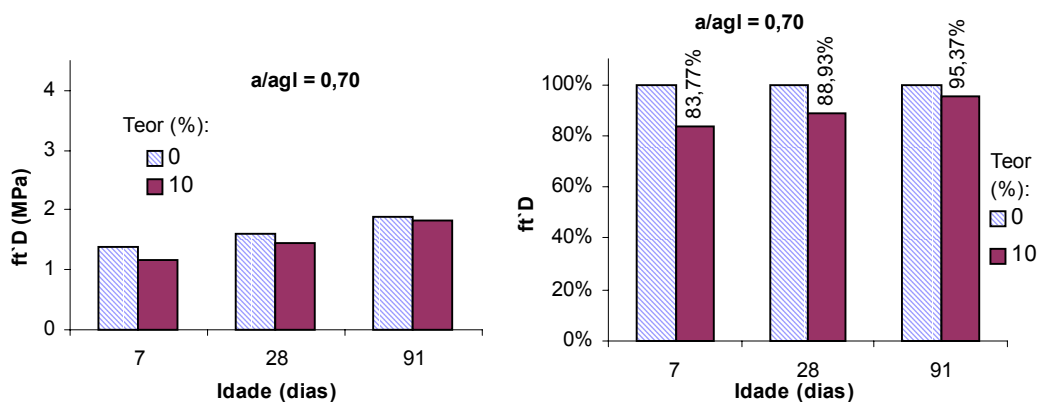
Na Figura 6.38, Figura 6.39 e Figura 6.40, observa-se a tendência de aproximação da resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$) do concreto com TE=10% da resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$) do concreto referência, independentemente da relação água/aglomerante. Esta aproximação fica mais nítida em idades mais avançadas. Como pode ser observado na Figura 6.41a, aos 91 dias de idade, para uma relação $a/agl.=0,40$, o concreto com 10% de substituição de cimento por EGF apresentava $f_t'D$ igual a 105,57% do $f_t'D$ do concreto referência, para a relação $a/agl.=0,55$, o concreto com TE=10% apresentava $f_t'D$ igual a 95,28% do $f_t'D$ do concreto referência (Figura 6.41b), enquanto que para a relação $a/agl.=0,70$, o concreto com TE=10% apresentava $f_t'D$ igual a 95,37% do $f_t'D$ do concreto referência (Figura 6.41c). Observa-se também, como discutido no item 6.1.2.4, a tendência de maior contribuição da substituição de 10% de cimento por EGF, em termos de $f_t'D$, para os concretos de relação $a/agl.$ mais baixos.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.41 Comparação entre os efeitos das interações ID x TE= 10% e ID x TE= 0% (referência) sobre a resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$) a) $a/a_{agl} = 0,40$ b) $a/a_{agl} = 0,55$ c) $a/a_{agl} = 0,70$

6.1.2.6 Efeito da Interação da Relação Água/aglomerante (a/a_{agl}), do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) e da Idade (ID) sobre a Resistência à Tração por Compressão Diametral do Concreto

O efeito da interação de 2ª ordem dos fatores controláveis a/a_{agl} x TE x ID (relação água/aglomerante x teor de substituição de cimento por EGF x idade) sobre $f_t'D$ (resistência à tração por compressão diametral) é ilustrado na Figura 6.42, Figura 6.43, Figura 6.45 e Figura 6.45.

A Tabela 6.29, Tabela 6.30, Tabela 6.31 e Tabela 6.32, apresentam os valores de $f_t'D$, para o efeito da interação a/a_{agl} x TE x ID, em função dos valores codificados e respectivos valores reais dos níveis dos fatores controláveis. Estes resultados foram obtidos utilizando-se a equação 6.2.

O gráfico da Figura 6.42 foi obtido variando os valores codificados da idade (ID) para cada valor codificado da relação água/aglomerante (a/a_{agl}), e mantendo o fator controlável TE com valor codificado igual a 0,5, o que equivale a um teor de substituição de cimento por EGF (TE) igual a 0%, o que equivale a um teor de substituição de cimento por EGF (TE) igual a 0% (concreto referência). A elaboração dos demais gráficos seguiu o mesmo princípio, onde no gráfico da Figura 6.43 manteve-se TE igual a 0,7, o que equivale a um teor de substituição de cimento por EGF (TE) igual a 10%; no gráfico da Figura 6.44 manteve-se o fator controlável TE com valor codificado igual a 1,1, o que equivale a um teor de substituição de cimento por EGF (TE) igual a 30% e para o gráfico da Figura 6.45,

manteve-se TE igual a 1,5, o que equivale a um teor de substituição de cimento por EGF (TE) igual a 50%.

Analisando-se a Figura 6.42 até a Figura 6.45, observa-se que a $f_t'D$ é maior quanto menor a relação água/aglomerante, como já esperado. Percebe-se maior crescimento das resistências à tração por compressão diametral após 28 dias de idade, efeito associado à reação pozolânica. Também nota-se uma pequena diferença entre as resistências à tração por compressão diametral dos concretos com TE=10% e referência, o que vem a confirmar a tendência já apresentada no item 6.1.1, de melhor desempenho deste teor (10%), quando comparado com os demais (30% e 50%), em relação ao concreto referência.

Tabela 6.29 Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para o concreto referência) **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		TE = 0,5					TE = 0%		
		Idade					Idade (dias)		
		0,5	0,75	1,5			7	28	91
a/agl	0,551	2,62	2,82	3,05	a/agl	0,40	2,62	2,82	3,05
	1,025	1,97	2,20	2,48		0,55	1,97	2,20	2,48
	1,5	1,38	1,62	1,90		0,70	1,38	1,62	1,90

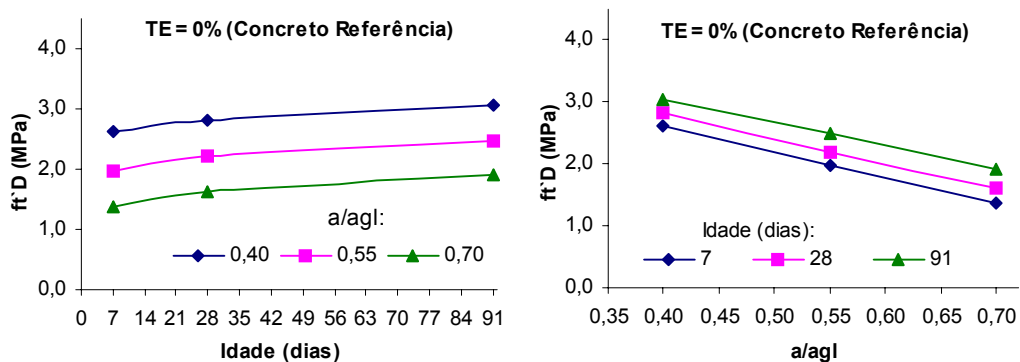


Figura 6.42 Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para o concreto referência) sobre a resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$)

Tabela 6.30 Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para TE igual a 10%) **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a)			(b)			
		TE = 0,7			TE = 10%			
		Idade			Idade (dias)			
		0,5	0,75	1,5	7	28	91	
a/agl	0,551	2,60	2,87	3,22	0,40	2,60	2,87	3,22
	1,025	1,71	1,99	2,36	0,55	1,71	1,99	2,36
	1,5	1,16	1,44	1,81	0,70	1,16	1,44	1,81

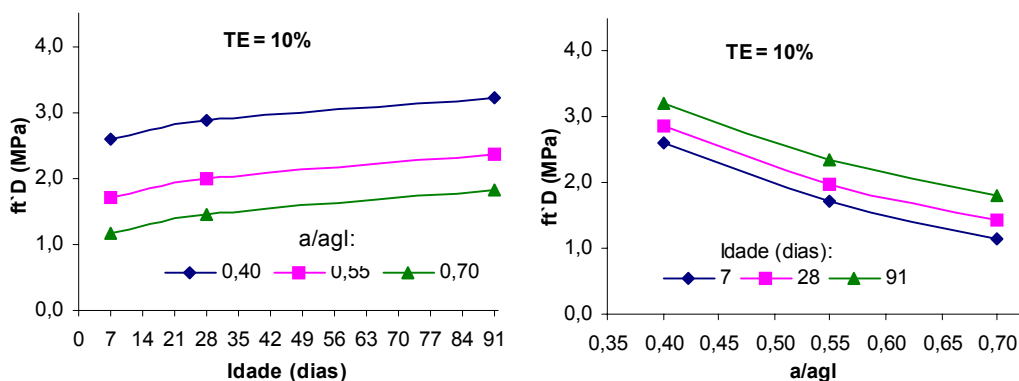


Figura 6.43 Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para teor de substituição de cimento por EGF igual a 10%) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)

Tabela 6.31 Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para TE igual a 30%) **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a)			(b)			
		TE = 1,1			TE = 30%			
		Idade			Idade (dias)			
		0,5	0,75	1,5	7	28	91	
a/agl	0,551	2,04	2,37	2,85	0,40	2,04	2,37	2,85
	1,025	1,20	1,53	2,02	0,55	1,20	1,53	2,02
	1,5	0,74	1,08	1,57	0,70	0,74	1,08	1,57

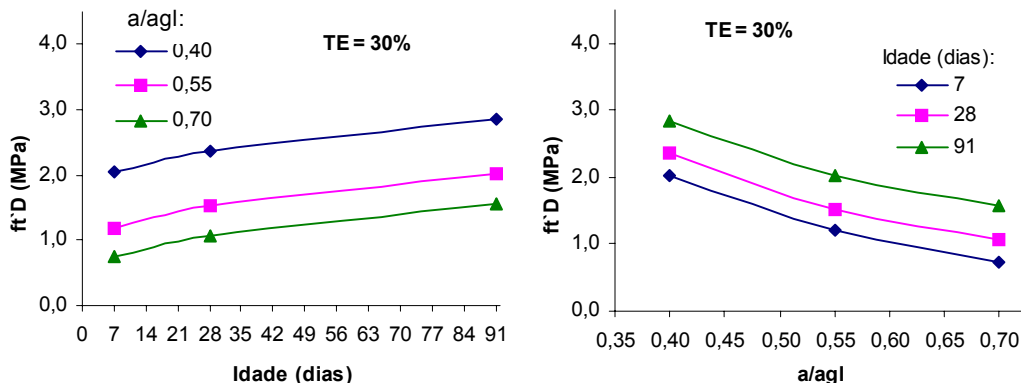


Figura 6.44 Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para teor de substituição de cimento por EGF igual a 30%) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)

Tabela 6.32 Resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para TE igual a 50%) **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a)			(b)			
		TE = 1,5			TE = 50%			
		Idade			Idade (dias)			
		0,5	0,75	1,5	7	28	91	
a/agl	0,551	1,52	1,89	2,44	0,40	1,52	1,89	2,44
	1,025	0,77	1,14	1,70	0,55	0,77	1,14	1,70
	1,5	0,40	0,77	1,33	0,70	0,40	0,77	1,33

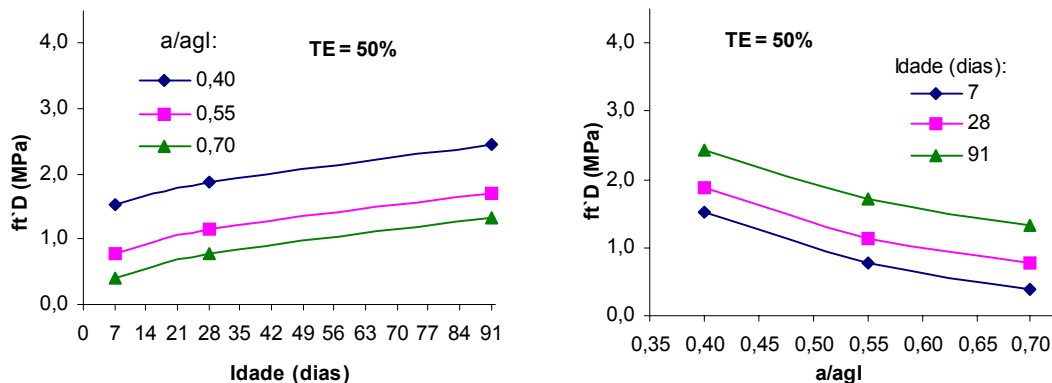


Figura 6.45 Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para teor de substituição de cimento por EGF igual a 50%) sobre a resistência à tração por compressão diametral (ft'D)

6.1.3 Resistência à Tração na Flexão

O modelo do comportamento da resistência à tração na flexão ($f_t'F$) do concreto com substituição de parte do cimento por escória granulada de fundição (EGF), bem como do concreto referência (sem EGF), obtido através de análise de regressão linear múltipla (programa estatístico Statgraphics) foi assim determinado, conforme equação 6.3:

$$\begin{aligned}
 f_t'F = & +85,751 + 21,6992 \cdot \frac{1}{(a/agl.)^{0,1}} - 49,4963 \cdot \frac{1}{(TE)^{0,1}} - 0,997984 \cdot (idade)^3 \\
 & - 0,0713845 \cdot \frac{(TE)^5}{(a/agl.)^{0,4}} + 0,216881 \cdot \frac{(a/agl.)^{0,2}}{(idade)^3} - 53,0664 \cdot \left(\frac{TE}{idade} \right)^{0,1}
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

Neste modelo, o coeficiente de determinação obtido foi $R^2 = 90,3052\%$, e o nível de confiança atingido foi de 95%. O resumo da análise estatística de regressão linear múltipla, realizada para obtenção do modelo de $f_t'F$ (representado pela equação 6.3), é apresentado no anexo 15.

Segundo a equação 6.3, os fatores controláveis, teor de substituição do cimento por escória granulada de fundição (TE), relação água/aglomerante (a/agl.) e idade do concreto (ID) exercem efeito significativo sobre a variável de resposta ($f_t'F$). Também as interações de 1ª ordem destes fatores controláveis (a/agl. x TE; TE x ID; a/agl. x ID) produzem efeito significativo sobre $f_t'F$.

Cabe ressaltar que este modelo do comportamento da resistência à tração na flexão de concretos, com e sem EGF, é válido para o intervalo dos níveis dos fatores controláveis que fazem parte deste projeto experimental.

6.1.3.1 Efeito Isolado da Relação Água/aglomerante (a/agl.) sobre a Resistência à Tração na Flexão do Concreto

O efeito isolado da relação água/aglomerante (a/agl.) sobre a resistência à tração na flexão ($f_t'F$) é mostrado na Figura 6.46. Este gráfico foi obtido variando-se os valores codificados da relação água/aglomerante (a/agl.) e mantendo os demais fatores controláveis no ponto médio de seu intervalo de codificação.

Os resultados de $ft'F$ para o efeito isolado da relação $a/agl.$ foram calculados através da equação 6.3, sendo apresentados na Tabela 6.33, em função dos valores codificados, bem como valores reais dos níveis dos fatores controláveis. Como já foi discutido nos itens 6.1.1.1 e 6.1.2.1, como esperado, observa-se que a resistência à tração na flexão diminui com o aumento da relação água/aglomerante (Figura 6.46).

Segundo NEVILLE (1997), MEHTA e MONTEIRO (1994), a resistência à compressão do concreto é a propriedade geralmente usada em projetos estruturais mas, em alguns casos a resistência à tração é de grande interesse, como em projetos de pavimentos rodoviários e aeroportuários, projetados com base na resistência à flexão, que implica resistência à tração. Além disso, estruturas de concreto simples sujeitas a abalos sísmicos, como barragens, onde a fissuração pode provocar danos severos, também devem ser avaliadas quanto a resistência à tração.

Tabela 6.33 Resultados de resistência à tração na flexão em função do efeito isolado da relação água/aglomerante ($a/agl.$) **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

(a)		(b)	
<i>ID = 0,75</i>		<i>ID = 28</i>	
<i>TE = 1,1</i>		<i>TE = 30%</i>	
a/agl	ft'F (MPa)	a/agl	ft'F (MPa)
0,551	4,51	0,40	4,51
1,025	3,21	0,55	3,21
1,5	2,46	0,70	2,46

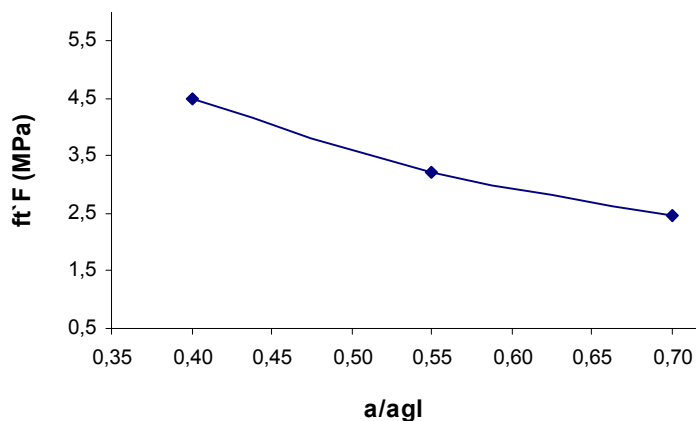


Figura 6.46 Efeito isolado da relação água/aglomerante ($a/agl.$) sobre a resistência à tração na flexão ($ft'F$)

6.1.3.2 Efeito Isolado do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) sobre a Resistência à Tração na Flexão do Concreto

A Figura 6.47 mostra o efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF (TE) sobre a resistência à tração na flexão ($f_t'F$). Através da equação de modelamento de $f_t'F$ para concretos com EGF e referência (equação 6.3), foi possível obter os resultados do efeito isolado de TE sobre $f_t'F$ (Tabela 6.34). O gráfico, ilustrado pela Figura 6.47, foi obtido variando os valores codificados do teor de substituição de cimento por EGF (TE), e mantendo os demais fatores controláveis no ponto médio de seu intervalo de codificação.

Tabela 6.34 Resultados de resistência à tração na flexão em função do efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

(a)		(b)	
AC = 1,025		AC = 0,55	
ID = 0,75		ID = 28	
Teor de Substituição de Cimento por EGF	$f_t'F$ (MPa)	Teor de Substituição de Cimento por EGF (%)	$f_t'F$ (MPa)
0,5	3,48	0	3,48
0,7	3,49	10	3,49
1,1	3,21	30	3,21
1,5	2,55	50	2,55

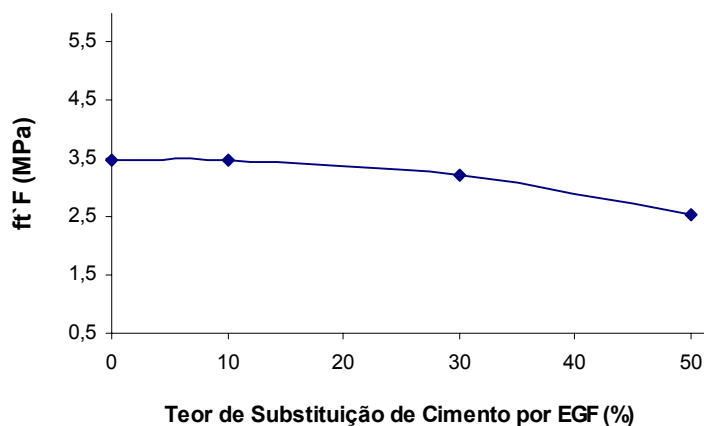


Figura 6.47 Efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF sobre a resistência à tração na flexão ($f_t'F$)

Observando-se a Figura 6.47, apesar de existir uma tendência de diminuição de $f_t'F$ à medida que TE aumenta, fica evidente, tanto pelos resultados de $f_t'F$ expressos na Tabela 6.34, quanto pela forma do gráfico da Figura 6.47, que exatamente para o teor de 10% de substituição de cimento por EGF, a resistência à tração na flexão ($f_t'F$) é praticamente igual à

resistência à tração na flexão ($ft'F$) do concreto referência. Nos itens 6.1.3.4. e 6.1.3.5, pode-se observar que este mesmo desempenho do concreto com TE=10% em relação à $ft'F$, ocorre também para os demais níveis dos fatores controláveis de a/agl. e ID.

6.1.3.3 Efeito Isolado da Idade (ID) sobre a Resistência à Tração na Flexão do Concreto

O efeito isolado da idade do concreto (ID) sobre a resistência à tração na flexão ($ft'F$) pode ser observado na Figura 6.48. A Tabela 6.35 mostra os resultados de $ft'F$ para o efeito isolado de ID, obtidos utilizando-se a equação 6.3. O gráfico, representado pela Figura 6.48, foi elaborado variando-se os valores codificados da idade (ID) e mantendo os fatores controláveis a/agl. e TE no ponto médio de seu intervalo de codificação.

Acordando com o que foi discutido nos itens 6.1.1.3 e 6.1.2.3, para os casos de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral, respectivamente, conforme esperado, a resistência à tração na flexão aumenta com a evolução da idade do concreto.

Tabela 6.35 Resultados de resistência à tração na flexão em função do efeito isolado da idade **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

(a)		(b)	
AC = 1,025		AC = 0,55	
TE = 1,1		TE = 30%	
Idade	$ft'F$ (MPa)	Idade (dias)	$ft'F$ (MPa)
0,5	2,46	7	2,46
0,75	3,21	28	3,21
1,5	3,51	91	3,51

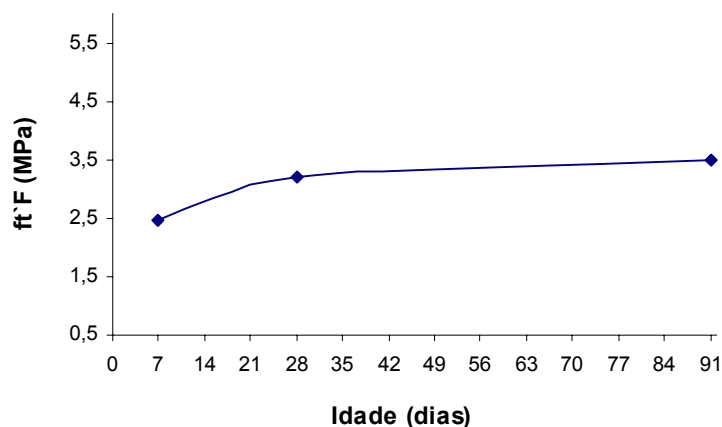


Figura 6.48 Efeito isolado da idade sobre a resistência à tração na flexão ($ft'F$)

6.1.3.4 Efeito da Interação da Relação Água/aglomerante (a/agl.) e do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) sobre a Resistência à Tração na Flexão do Concreto

O efeito da interação de 1ª ordem da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (TE) sobre a resistência à tração na flexão ($f_t'F$) é apresentado na Figura 6.49, Figura 6.50 e Figura 6.51. A Tabela 6.36, Tabela 6.37 e Tabela 6.38 apresentam os resultados $f_t'F$ para o efeito da interação a/agl. x TE, em função dos valores dos níveis codificados, e respectivos níveis reais dos fatores controláveis. Estes resultados foram obtidos utilizando-se a equação 6.3, de modelamento de $f_t'F$ para concretos com EGF e referência.

O gráfico, ilustrado pela Figura 6.49, foi obtido variando-se os valores codificados do teor de substituição de cimento por EGF (TE) para cada valor codificado da relação água/aglomerante (a/agl.), e mantendo os demais fatores controláveis no ponto médio de seu intervalo de codificação. Os gráficos da Figura 6.50 e Figura 6.51 também foram obtidos da mesma forma, mas, no caso da Figura 6.50, o fator controlável ID foi mantido com valor codificado igual a 0,5, o que equivale a idade de 7 dias, e na Figura 6.51, o fator controlável ID foi mantido com valor codificado igual a 1,5, o que equivale a idade de 91 dias.

Tabela 6.36 Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a)				(b)				
		ID = 0,75				ID = 28				
		Teor de Substituição de Cimento por EGF				Teor de Substituição de Cimento por EGF (%)				
		0,5	0,7	1,1	1,5	0	10	30	50	
a/agl	0,561	4,81	4,81	4,51	3,73	0,40	4,81	4,81	4,51	3,73
	1,025	3,48	3,49	3,21	2,55	0,55	3,48	3,49	3,21	2,55
	1,5	2,69	2,72	2,46	1,86	0,70	2,69	2,72	2,46	1,86

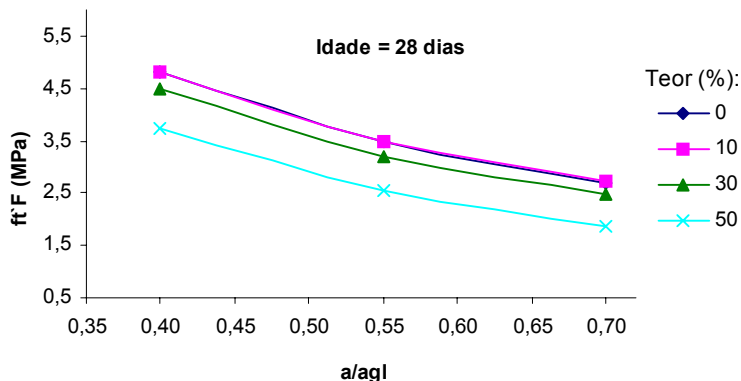


Figura 6.49 Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF sobre a resistência à tração na flexão (ft'F)

Tabela 6.37 Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE, para a idade de 7 dias **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		<i>ID = 0,5</i>				<i>ID = 7</i>				
		Teor de Substituição de Cimento por EGF				Teor de Substituição de Cimento por EGF (%)				
		0,5	0,7	1,1	1,5	0	10	30	50	
a/agl	0,551	4,08	4,01	3,61	2,75	0,40	4,08	4,01	3,61	2,75
	1,025	2,90	2,83	2,46	1,72	0,55	2,90	2,83	2,46	1,72
	1,5	2,23	2,16	1,80	1,13	0,70	2,23	2,16	1,80	1,13

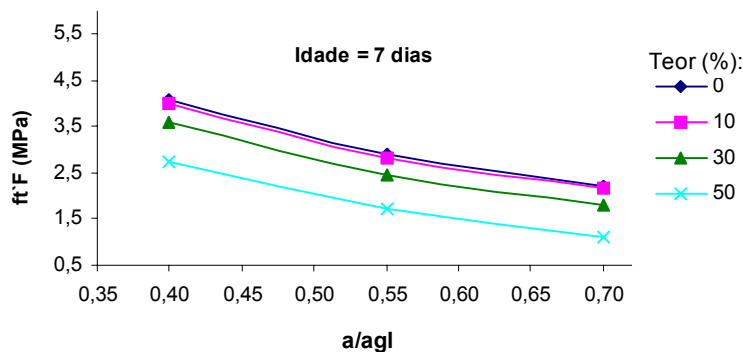


Figura 6.50 Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (para a idade de 7 dias) sobre a resistência à tração na flexão (ft'F)

Tabela 6.38 Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x TE, para a idade de 91 dias **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a)				(b)				
		ID = 1,5				ID = 91				
		Teor de Substituição de Cimento por EGF				Teor de Substituição de Cimento por EGF (%)				
		0,5	0,7	1,1	1,5	0	10	30	50	
a/agl	0,551	4,87	4,99	4,85	4,19	0,40	4,87	4,99	4,85	4,19
	1,025	3,50	3,62	3,51	2,96	0,55	3,50	3,62	3,51	2,96
	1,5	2,72	2,81	2,72	2,23	0,70	2,72	2,81	2,72	2,23

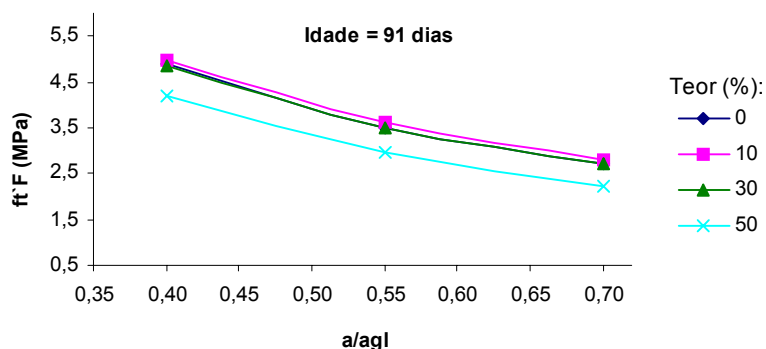


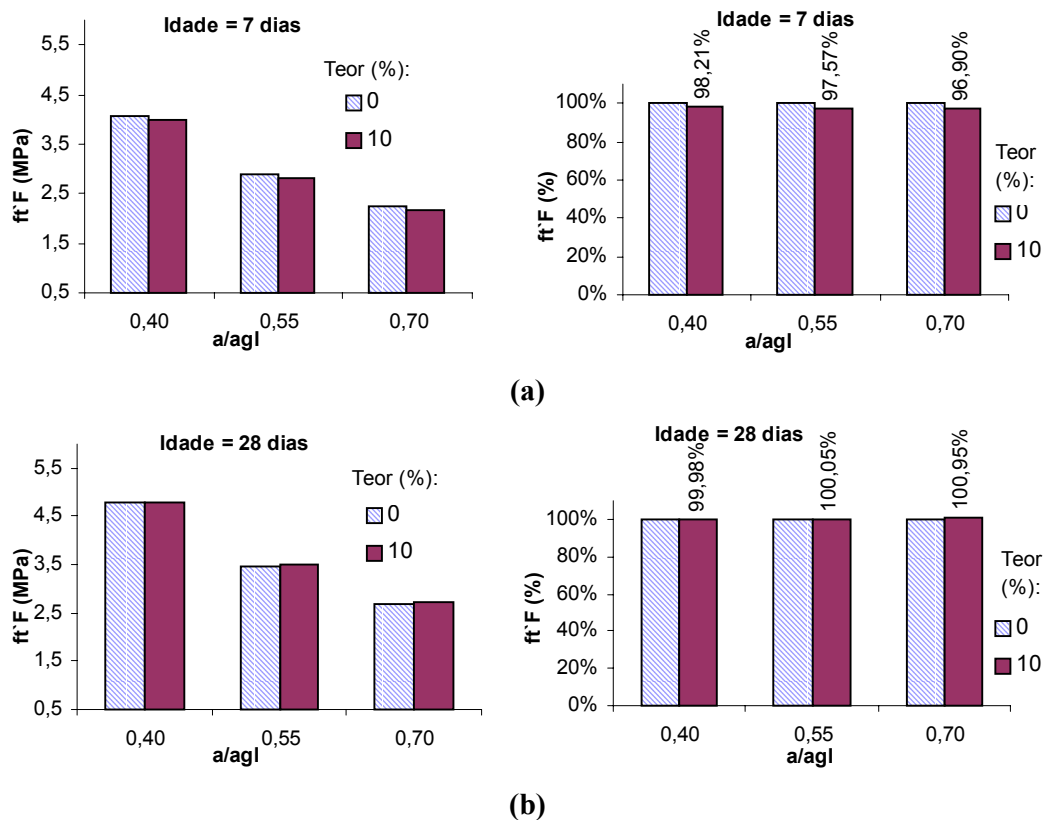
Figura 6.51 Efeito da interação da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (para a idade de 91 dias) sobre a resistência à tração na flexão ($ft'F$)

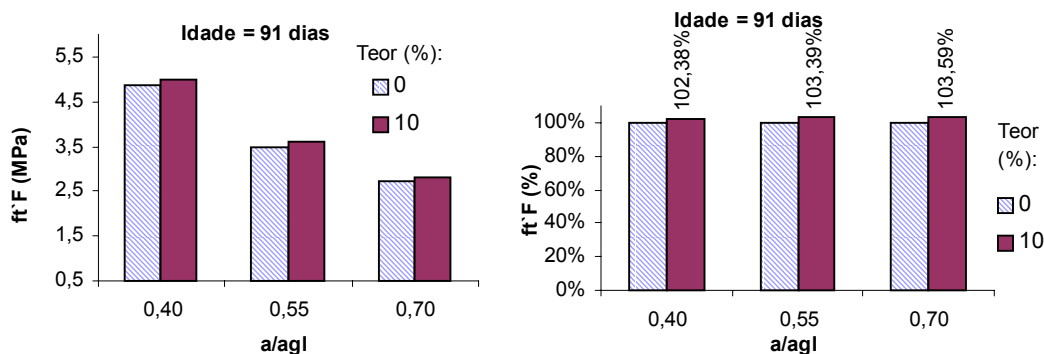
Assim como apresentado nos itens 6.1.1.4 e 6.1.2.4, observando-se a Figura 6.49, Figura 6.50 e Figura 6.51, mais uma vez comprova-se a maior eficiência do concreto com TE=10% em relação aos demais níveis de substituição de cimento por EGF, quando comparado com o concreto referência. As curvas dos concretos com TE=10% e referência praticamente sobrepõem-se ao observarem-se a Figura 6.49 e Figura 6.50, com melhor desempenho do concreto com TE=10%, em relação ao concreto referência aos 91 dias (Figura 6.51). Também é interessante observar que aos 91 dias de idade, conforme Figura 6.51, o concreto com TE=30% apresentou resistência à tração na flexão ($ft'F$) muito semelhante ao concreto referência.

A Figura 6.52 (a, b, c) mostra uma análise comparativa dos efeitos das interações a/agl. x TE= 10% e a/agl. x TE= 0% (referência) sobre $ft'F$, onde observa-se que já aos 7 dias o concreto com TE=10% apresentava $ft'F$ muito próximo ao $ft'F$ do concreto referência, independentemente do fator a/agl. (Figura 6.52a). Aos 28 dias as resistências à tração na

flexão praticamente se equipararam para todos os fatores a/agl . (Figura 6.52b), e aos 91 dias de idade dos concretos, as resistências à tração na flexão do concreto com TE=10% praticamente ultrapassaram os valores de $f_t'F$ do concreto referência (Figura 6.52c).

Conforme discutido no item 6.1.1.4, utilizando-se materiais alternativos com propriedades pozolânicas, pode-se melhorar a zona de transição pasta-agregado, e conseqüentemente, reforçando-se o elo mais fraco no concreto, pode-se aumentar sua resistência de ruptura. Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), o tamanho e a concentração dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição pode-se reduzir como resultado de reações químicas, quando uma adição pozolânica ou um agregado reativo estiver presente. Sendo assim, o desenvolvimento de reações pozolânicas, gerando mais produtos resistentes no concreto, pode ser uma explicação para o bom desempenho mecânico apresentado por concretos com 10% de substituição de cimento por escória granulada de fundição (EGF). Isto não quer dizer que nos demais teores (30% e 50%) estas reações não ocorram, entretanto, em função das condições iniciais estabelecidas para este projeto de pesquisa, o teor de 10% de substituição de cimento por EGF vem demonstrando melhor contribuição do que os demais teores, quando comparado com o concreto referência.





(c)

Figura 6.52 Comparação entre os efeitos das interações $a/agl. \times TE=10\%$ e $a/agl. \times TE=0\%$ (referência) sobre a resistência à tração na flexão ($ft'F$) a) ID = 7 dias b) ID = 28 dias c) ID = 91 dias

6.1.3.5 Efeito da Interação do Teor de Substituição de Cimento por EGF (TE) e da Idade (ID) sobre a Resistência à Tração na Flexão do Concreto

O efeito da interação de 1ª ordem do teor de substituição de cimento por EGF (TE) e da Idade (ID) sobre a resistência à tração na flexão ($ft'F$) do concreto pode ser observado na Figura 6.53, Figura 6.54 e Figura 6.55. A Tabela 6.39, Tabela 6.40 e Tabela 6.41 apresentam os valores de $ft'F$, obtidos através da equação 6.3, relacionados aos valores dos níveis codificados e respectivos valores reais dos fatores controláveis.

Os gráficos apresentados na Figura 6.53, Figura 6.54 e Figura 6.55 foram obtidos variando-se os valores codificados de ID para cada valor codificado de TE, onde o fator controlável $a/agl.$ foi mantido no ponto médio de seu intervalo de codificação, no caso da Figura 6.53. Já na Figura 6.54, o fator controlável $a/agl.$ foi mantido com valor codificado igual a $0,551$, o que equivale a relação água/aglomerante (a/agl) igual a $0,40$ e no caso da Figura 6.55, o fator controlável $a/agl.$ foi mantido com valor codificado igual a $1,5$, o que equivale a relação água/aglomerante (a/agl) igual a $0,70$.

Como mostram a Figura 6.53, Figura 6.54 e Figura 6.55, assim como observado no item 6.1.3.4, os resultados de resistência à tração na flexão ($ft'F$) dos concretos com $TE=10\%$ e referência foram equivalentes, independentemente da relação água/aglomerante ($0,40$; $0,55$ e $0,70$). Além disso, é importante apontar o bom desempenho do concreto com $TE=30\%$, que especialmente aos 91 dias de idade, observando tanto as três tabelas (Tabela 6.39, Tabela 6.40 e Tabela 6.41) quanto as figuras (Figura 6.53, Figura 6.54 e Figura 6.55), apresentou resistências similares ao concreto referência, , como discutido no item 6.1.3.4.

A Figura 6.56a mostra que aos 28 dias e $a/agl.=0,40$, o concreto com TE=10% apresentava $ft'F$ igual a 99,98% do $ft'F$ do concreto referência, com $a/agl.=0,55$, o concreto com TE=10% atingiu $ft'F$ igual a 100,05% do $ft'F$ do concreto referência (Figura 6.56b), sendo que com $a/agl.=0,70$, o concreto com TE=10% chegou a 100,95% do $ft'F$ do concreto referência (Figura 6.56c).

Mais uma vez percebe-se a contribuição da utilização de escória granulada de fundição (EGF), em termos de propriedades mecânicas, especificamente neste caso, quanto à resistência à tração na flexão, através de provável desenvolvimento de reações pozolânicas, sendo mais efetivo o desempenho da substituição de 10% de cimento por EGF.

Tabela 6.39 Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação TE x ID **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a)			(b)				
		AC = 1,025			AC = 0,55				
		Idade			Idade (dias)				
		0,5	0,75	1,5		7	28	91	
Teor de Substituição de Cimento por EGF	0,5	2,90	3,48	3,50	Teor de Substituição de Cimento por EGF (%)	0	2,90	3,48	3,50
	0,7	2,83	3,49	3,62		10	2,83	3,49	3,62
	1,1	2,46	3,21	3,51		30	2,46	3,21	3,51
	1,5	1,72	2,55	2,96		50	1,72	2,55	2,96

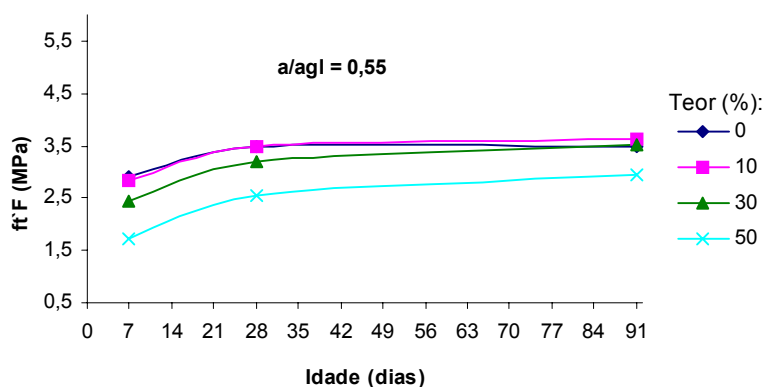


Figura 6.53 Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade sobre a resistência à tração na flexão ($ft'F$)

Tabela 6.40 Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação TE x ID, para relação água/aglomerante igual a 0,40 **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a)			(b)			
		AC = 0,551			AC = 0,40			
		Idade			Idade (dias)			
		0,5	0,75	1,5	7	28	91	
Teor de Substituição de Cimento por EGF	0,5	4,08	4,81	4,87	0	4,08	4,81	4,87
	0,7	4,01	4,81	4,99	10	4,01	4,81	4,99
	1,1	3,61	4,51	4,85	30	3,61	4,51	4,85
	1,5	2,75	3,73	4,19	50	2,75	3,73	4,19

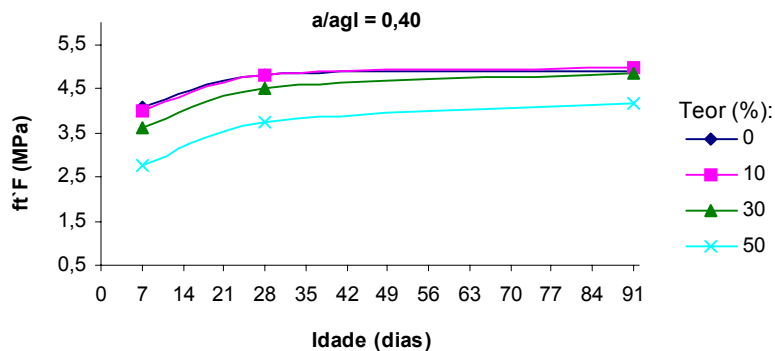


Figura 6.54 Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade (para relação água/aglomerante igual a 0,40) sobre a resistência à tração na flexão (ft'F)

Tabela 6.41 Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação TE x ID, para relação água/aglomerante igual a 0,70 **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		(a)			(b)			
		AC = 1,5			AC = 0,70			
		Idade			Idade (dias)			
		0,5	0,75	1,5	7	28	91	
Teor de Substituição de Cimento por EGF	0,5	2,23	2,69	2,72	0	2,23	2,69	2,72
	0,7	2,16	2,72	2,81	10	2,16	2,72	2,81
	1,1	1,80	2,46	2,72	30	1,80	2,46	2,72
	1,5	1,13	1,86	2,23	50	1,13	1,86	2,23

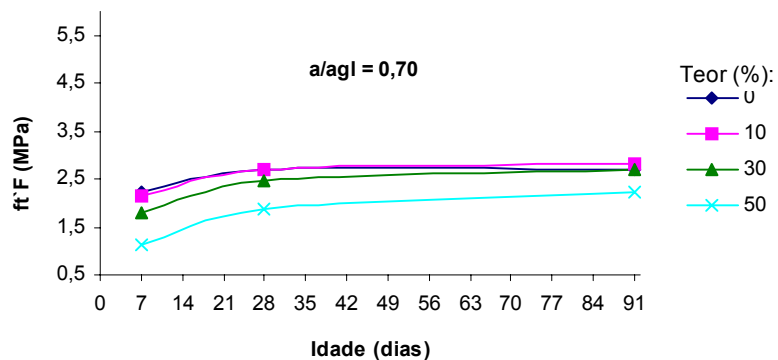
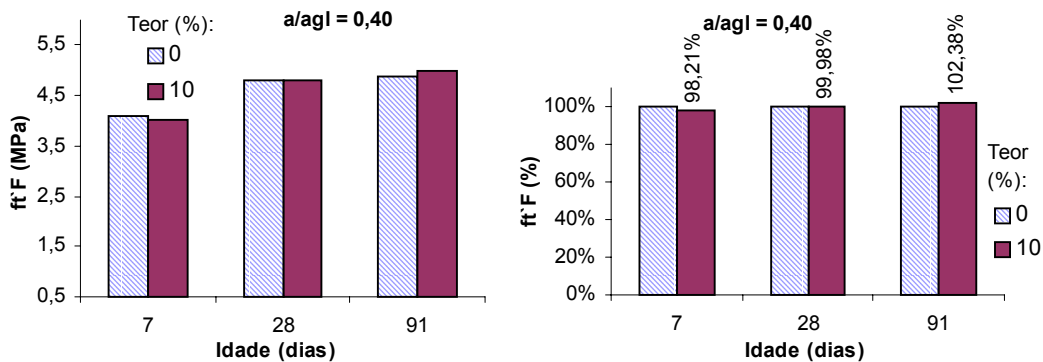
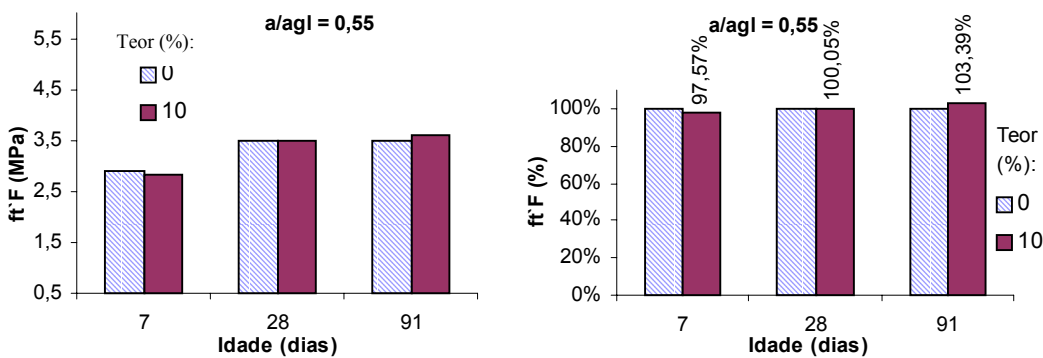


Figura 6.55 Efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF e da idade (para relação água/aglomerante igual a 0,70) sobre a resistência à tração na flexão ($ft'F$)



(a)



(b)

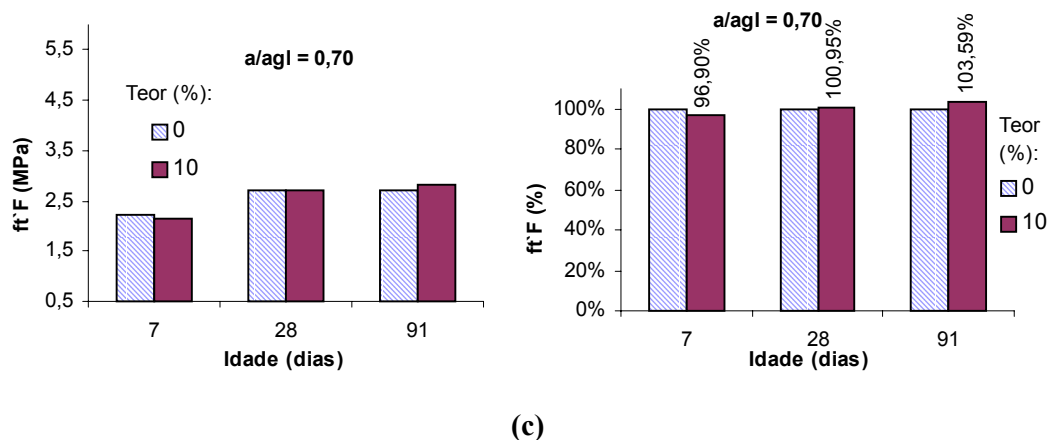


Figura 6.56 Comparação entre os efeitos das interações ID x TE= 10% e ID x TE= 0% (referência) sobre a resistência à tração na flexão ($f_t'F$) a) $a/agl. = 0,40$ b) $a/agl. = 0,55$ c) $a/agl. = 0,70$

6.1.3.6 Efeito da Interação da Relação Água/aglomerante ($a/agl.$) e da Idade (ID) sobre a Resistência à Tração na Flexão do Concreto

A Figura 6.57, Figura 6.58, Figura 6.59 e Figura 6.60 mostram o efeito da interação de 1ª ordem da relação água/aglomerante ($a/agl.$) e idade (ID) sobre a resistência à tração na flexão ($f_t'F$) dos concretos com EGF e referência. Através da equação 6.3, de modelamento do comportamento de concretos com EGF e referência em relação à $f_t'F$, pode-se obter os valores de $f_t'F$ para cada um dos níveis do fator controlável TE (teor de substituição de cimento por EGF), sendo apresentados na Tabela 6.42, Tabela 6.43, Tabela 6.44 e Tabela 6.45, em função dos valores dos níveis codificados e respectivos valores de níveis reais dos fatores controláveis.

O gráfico mostrado na Figura 6.57 foi obtido variando os valores codificados de ID para cada valor codificado de $a/agl.$, mantendo-se o fator controlável TE no ponto médio de seu intervalo de codificação. O mesmo procedimento foi utilizado na elaboração dos gráficos representados pelas Figura 6.58, Figura 6.59 e Figura 6.60, contudo na Figura 6.58, manteve-se o fator controlável TE com valor codificado igual a 0,5, o que equivale a um teor de substituição de cimento por EGF (TE) igual a 0% (concreto referência), na Figura 6.59, TE foi mantido com valor codificado igual a 0,7, o que equivale a um teor de substituição de cimento por EGF (TE) igual a 10%, enquanto que na Figura 6.60, manteve-se TE com valor codificado igual a 1,5, o que equivale a um teor de substituição de cimento por EGF (TE) igual a 50%.

Observando-se a Figura 6.57 até Figura 6.60, manteve-se a tendência de obtenção de maiores resistências à tração na flexão com a diminuição da relação água/aglomerante. Também percebe-se que houve significativo crescimento de $f_t'F$ na idade de 28 dias, evidenciado principalmente pela proximidade das curvas de 28 e 91 dias no caso dos concretos com TE=10% e referência (Figura 6.59 e Figura 6.58). As resistências à tração na flexão mantêm um crescimento evolutivo até idades avançadas, de 91 dias, comportamento especialmente demonstrado no caso dos concretos com TE=30% e TE=50% (Figura 6.57 e Figura 6.60).

Tabela 6.42 Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		TE = 1,1					TE = 30%		
		Idade					Idade (dias)		
		0,5	0,75	1,5			7	28	91
a/agl	0,551	3,61	4,51	4,85	a/agl	0,40	3,61	4,51	4,85
	1,025	2,46	3,21	3,51		0,55	2,46	3,21	3,51
	1,5	1,80	2,46	2,72		0,70	1,80	2,46	2,72

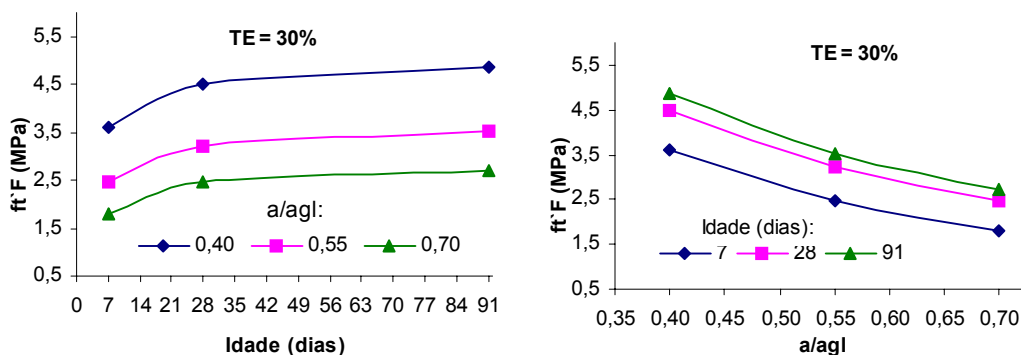


Figura 6.57 Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade sobre a resistência à tração na flexão ($f_t'F$)

Tabela 6.43 Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para o concreto referência) **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		<i>TE = 0,5</i>					<i>TE = 0%</i>		
		Idade					Idade (dias)		
		0,5	0,75	1,5	7	28	91		
a/agl	0,551	4,08	4,81	4,87	0,40	4,08	4,81	4,87	
	1,025	2,90	3,48	3,50	0,55	2,90	3,48	3,50	
	1,5	2,23	2,69	2,72	0,70	2,23	2,69	2,72	

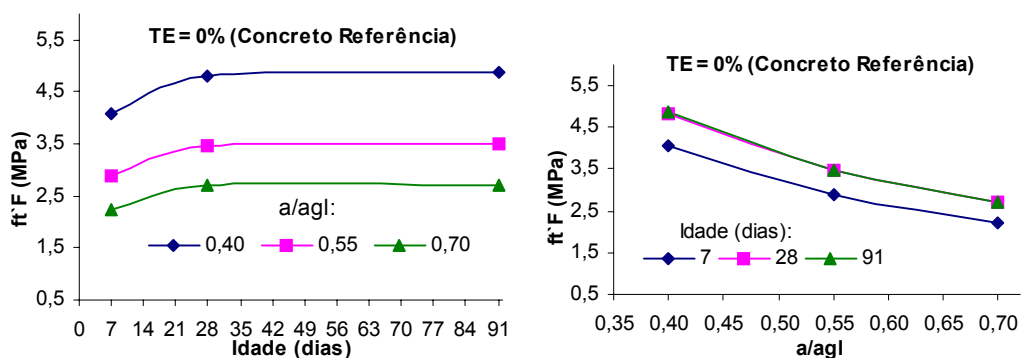


Figura 6.58 Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para o concreto referência) sobre a resistência à tração na flexão ($f_t'F$)

Tabela 6.44 Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para TE igual a 10%) **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		<i>TE = 0,7</i>					<i>TE = 10%</i>		
		Idade					Idade (dias)		
		0,5	0,75	1,5	7	28	91		
a/agl	0,551	4,01	4,81	4,99	0,40	4,01	4,81	4,99	
	1,025	2,83	3,49	3,62	0,55	2,83	3,49	3,62	
	1,5	2,16	2,72	2,81	0,70	2,16	2,72	2,81	

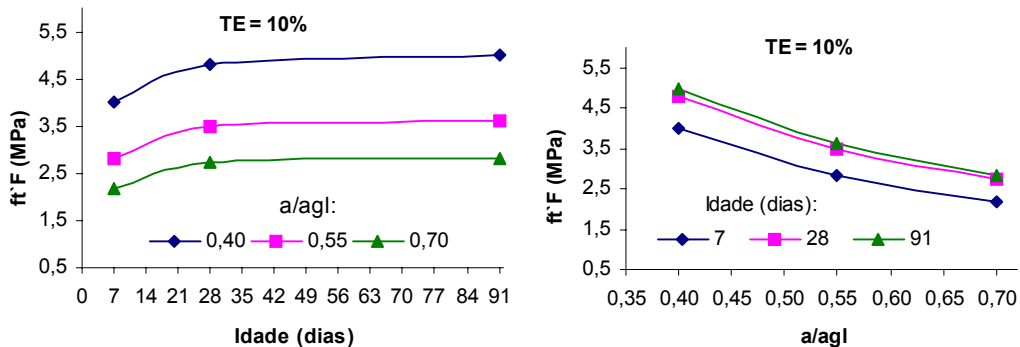


Figura 6.59 Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para teor de substituição de cimento por EGF igual a 10%) sobre a resistência à tração na flexão ($f_t'F$)

Tabela 6.45 Resultados de resistência à tração na flexão (MPa) em função do efeito da interação a/agl. x ID (para TE igual a 50%) **a)** níveis codificados dos fatores controláveis **b)** níveis reais dos fatores controláveis

		TE = 1,5		
		Idade		
a/agl	0,551	2,75	3,73	4,19
	1,025	1,72	2,55	2,96
	1,5	1,13	1,86	2,23

		TE = 50%		
		Idade (dias)		
a/agl	0,40	2,75	3,73	4,19
	0,55	1,72	2,55	2,96
	0,70	1,13	1,86	2,23

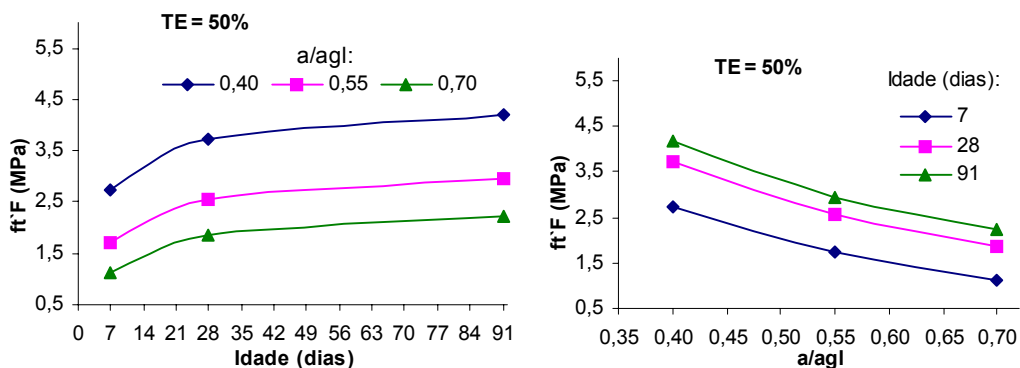


Figura 6.60 Efeito da interação da relação água/aglomerante e da idade (para teor de substituição de cimento por EGF igual a 50%) sobre a resistência à tração na flexão ($f_t'F$)

6.1.4 Relação entre Resistência à Tração e Resistência à Compressão do Concreto

A Tabela 6.46 mostra a relação entre resistência à tração por compressão diametral ($ft'D$) e resistência à compressão (fc), bem como a relação entre resistência à tração na flexão ($ft'F$) e resistência à compressão (fc) dos concretos com substituição de parte do cimento por escória granulada de fundição (EGF) e referência (sem EGF), para a idade de 28 dias.

Tabela 6.46 Relação entre resistência à tração e resistência à compressão dos concretos referência (TE=0%) e com EGF (TE=10%, 30% e 50%), para a idade de 28 dias

		$ft'D_{28}/fc_{28}$ (%)			$ft'F_{28}/fc_{28}$ (%)		
Teor (%)	a/agl	0,40	0,55	0,70	0,40	0,55	0,70
0		7,39%	9,37%	10,32%	12,58%	14,82%	17,32%
10		8,15%	8,74%	9,07%	13,66%	15,30%	17,14%
30		8,55%	8,58%	8,91%	16,25%	18,00%	20,29%
50		8,81%	8,89%	9,83%	17,39%	19,85%	23,74%

Conforme já discutido, os concretos com EGF apresentaram maior crescimento de resistências, especialmente à compressão, em idades mais avançadas, de 91 dias, como apresentado nos itens 6.1.1.4, 6.1.1.6, 6.1.1.7, 6.1.1.8, 6.1.2.4, 6.1.3.4, 6.1.3.6. Desta forma, considerando-se que a real contribuição da escória granulada de fundição (EGF) é mais bem representada em níveis avançados de hidratação, apresentam-se, também, as relações entre $ft'D/fc$ e $ft'F/fc$ para a idade de 91 dias, como mostra a Tabela 6.47.

Tabela 6.47 Relação entre resistência à tração e resistência à compressão dos concretos referência (TE=0%) e com EGF (TE=10%, 30% e 50%), para a idade de 91 dias

		$ft'D_{91}/fc_{91}$ (%)			$ft'F_{91}/fc_{91}$ (%)		
Teor (%)	a/agl	0,40	0,55	0,70	0,40	0,55	0,70
0		7,15%	9,70%	11,27%	11,43%	13,67%	15,97%
10		7,99%	9,26%	10,22%	12,38%	14,16%	15,86%
30		8,52%	9,50%	10,70%	14,50%	16,52%	18,59%
50		8,89%	10,28%	12,48%	15,25%	17,92%	21,02%

Os valores de fc , $ft'D$ e $ft'F$, para a obtenção das relações $ft'D/fc$ e $ft'F/fc$ expressas na Tabela 6.46 e Tabela 6.47, para as idades de 28 e 91 dias, respectivamente, foram obtidos utilizando-se as equações 6.1, 6.2 e 6.3. Cabe ressaltar que foram empregados os valores dos níveis codificados dos fatores controláveis (expressos como variáveis independentes), na utilização destas equações.

Sabe-se que as resistências à tração e à compressão estão intimamente relacionadas, contudo não há uma proporcionalidade direta entre elas. À medida que a resistência à compressão do concreto aumenta, a resistência à tração também aumenta, mas a uma velocidade decrescente. Desta forma, a razão resistência à tração/compressão depende do nível geral de resistência à compressão, onde quanto maior a resistência à compressão, menor será a relação. (MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997). Sendo assim, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), para uma determinada idade de cura, a razão tração/compressão diminui com a diminuição da relação água/cimento. Isto parece coerente, pois com relações água/cimento ou água/aglomerante menores, normalmente as resistências à compressão são mais elevadas.

O fato de não existir uma proporcionalidade direta entre resistências à tração e à compressão e desta razão f_t/f_c diminuir para relações a/agl. (água/aglomerantes) menores também se confirma no caso de concretos com EGF e referência, onde conforme dados da Tabela 6.46 e Tabela 6.47, observa-se que as relações $f_t'D/f_c$ e $f_t'F/f_c$ diminuem à medida que a relação água/aglomerante diminui, e aumentam para os maiores teores de EGF como substituição de parte do cimento. Esse crescimento das relações $f_t'D/f_c$ e $f_t'F/f_c$ com o aumento dos teores de substituição de cimento por EGF deve-se ao fato da tendência de f_c diminuir para os maiores teores de substituição, como TE=50%.

A idade também influi de forma significativa na relação entre resistência à tração e resistência à compressão do concreto. Segundo NEVILLE (1997) e MEHTA e MONTEIRO (1994), normalmente após um mês de cura a resistência à tração do concreto aumenta mais lentamente do que a resistência à compressão, isto é, a razão resistência à tração/compressão diminui com a idade de cura, o que confirma a tendência geral de que a relação f_t/f_c diminui com o aumento de f_c .

Esta tendência da relação f_t/f_c diminuir com a idade de cura do concreto verifica-se na comparação entre os resultados das relações de $f_t'F/f_c$, onde a relação $f_t'F/f_c$ de concretos com EGF e referência, para a idade de 91 dias (Tabela 6.47), foi menor do que na idade de 28 dias (Tabela 6.46). Contudo o mesmo comportamento não fica evidente para as relações entre $f_t'D/f_c$ (Tabela 6.46 e Tabela 6.47).

O modelo de representação da relação entre resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$) e resistência à compressão (f_c) do concreto com substituição de parte do cimento por escória granulada de fundição (EGF), bem como do concreto referência (sem

EGF), obtida através de análise de regressão linear múltipla (programa estatístico Statgraphics) é apresentado na equação 6.4:

$$Ft'D = -1,60593 + 1,0762 \cdot (fc)^{0,4} \quad (6.4)$$

O coeficiente de determinação para este modelo da relação entre $ft'D/fc$, de concretos com EGF e referência, representado pela equação 6.4, foi $R^2 = 84,1996\%$. O *nível de confiança* foi de 99%.

Através de análise de regressão linear múltipla (programa estatístico Statgraphics) também foi obtido o modelamento da relação entre resistência à tração na flexão ($ft'F$) e resistência à compressão (fc) dos concretos com EGF e referência, sendo apresentado na equação 6.5:

$$Ft'F = -0,613382 + 0,87712 \cdot (fc)^{0,5} \quad (6.5)$$

O coeficiente de determinação da equação 6.5 resultou em $R^2 = 86,7028\%$, sendo alcançado *nível de confiança* de 99%.

É importante salientar que estes dois modelos, representados pelas equações 6.4 e 6.5, são válidos para o intervalo de fc compreendido entre $10\text{MPa} < fc < 45\text{MPa}$, como também para o intervalo dos níveis dos fatores controláveis que fazem parte deste projeto experimental. Os dados utilizados na elaboração dos modelos estão relacionados na Figura 6.2 (a, b, c).

6.2 AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA DOS CONCRETOS REFERÊNCIA E COM EGF

De acordo com a avaliação das propriedades mecânicas apresentadas no item 6.1, percebeu-se a maior eficiência do teor de 10% de substituição de cimento por escória granulada de fundição (EGF), em relação aos demais teores utilizados neste experimento, quando comparados ao concreto referência. Sendo assim, a avaliação microestrutural foi realizada em concretos com teor de 10% de substituição de cimento por EGF, comparando-se com o concreto referência. Realizou-se análise microestrutural em concretos referência e com TE=10% para a relação água/aglomerante igual 0,70 (contribuição de TE=10% mais efetiva especialmente para resistência à compressão, item 6.1.1.5) e idades de 7 e 28 dias. Optou-se

por não realizar a avaliação microestrutural em idades mais avançadas, visto que grande parte dos produtos de hidratação já estão formados nestas idades, dificultando a detecção de diferenças entre os concretos. A forma de preparação e equipamento utilizado na análise microestrutural das amostras de concreto referência e com EGF estão especificados no item 5.3.7.2.

Conforme AITCIN (2000), as propriedades macroestruturais estão intimamente ligadas às propriedades microestruturais, onde através de análise microestrutural do concreto é possível observar e entender o efeito de partículas minerais misturadas ao mesmo. Desta forma, a análise da microestrutura do concreto, especialmente da zona de transição (interface pasta-agregado), pode contribuir no entendimento do comportamento mecânico (em termos de resistência do concreto) e do comportamento em termos de durabilidade destes concretos.

Na Figura 6.61a pode ser observada a interface pasta-agregado do concreto referência ($a/agl.=0,70$), com 7 dias de idade. Percebe-se que com esta idade, o concreto referência apresenta alguns vazios presentes na zona de transição, facilitando o crescimento de cristais de hidróxido de cálcio (Figura 6.61b), os quais, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), dependendo do tamanho, número e orientação, enfraquecem a zona de transição, o que conseqüentemente, reduz a resistência mecânica do concreto.

A Figura 6.62 também ilustra a interface pasta-agregado, sendo neste caso, do concreto com mesma idade (7 dias) e mesma relação água/aglomerante ($a/agl.=0,70$) do concreto referência ilustrado na Figura 6.61, contudo apresentando teor de 10% de substituição de cimento por EGF. Nesta figura (Figura 6.62b e Figura 6.62c), também observa-se a existência de cristais orientados de hidróxido de cálcio. Entretanto é importante lembrar que as reações pozolânicas desenvolvem-se de forma lenta, ocorrendo, geralmente, lento crescimento de resistência nas primeiras idades, como discutido nos itens 6.1.1.7 e 6.1.1.8. Desta forma aos 7 dias de idade, num estágio inicial de hidratação, a zona de transição ainda pode apresentar uma configuração mais porosa, especialmente no caso de concretos com elevadas relações água/aglomerante, como no caso de $a/agl.=0,70$. A utilização de materiais com propriedades pozolânicas, como a EGF, podem melhorar a zona de transição ao longo do tempo, pois a evolução das reações pozolânicas contribuem na minimização gradativa da porosidade, produzindo uma interface mais densa.

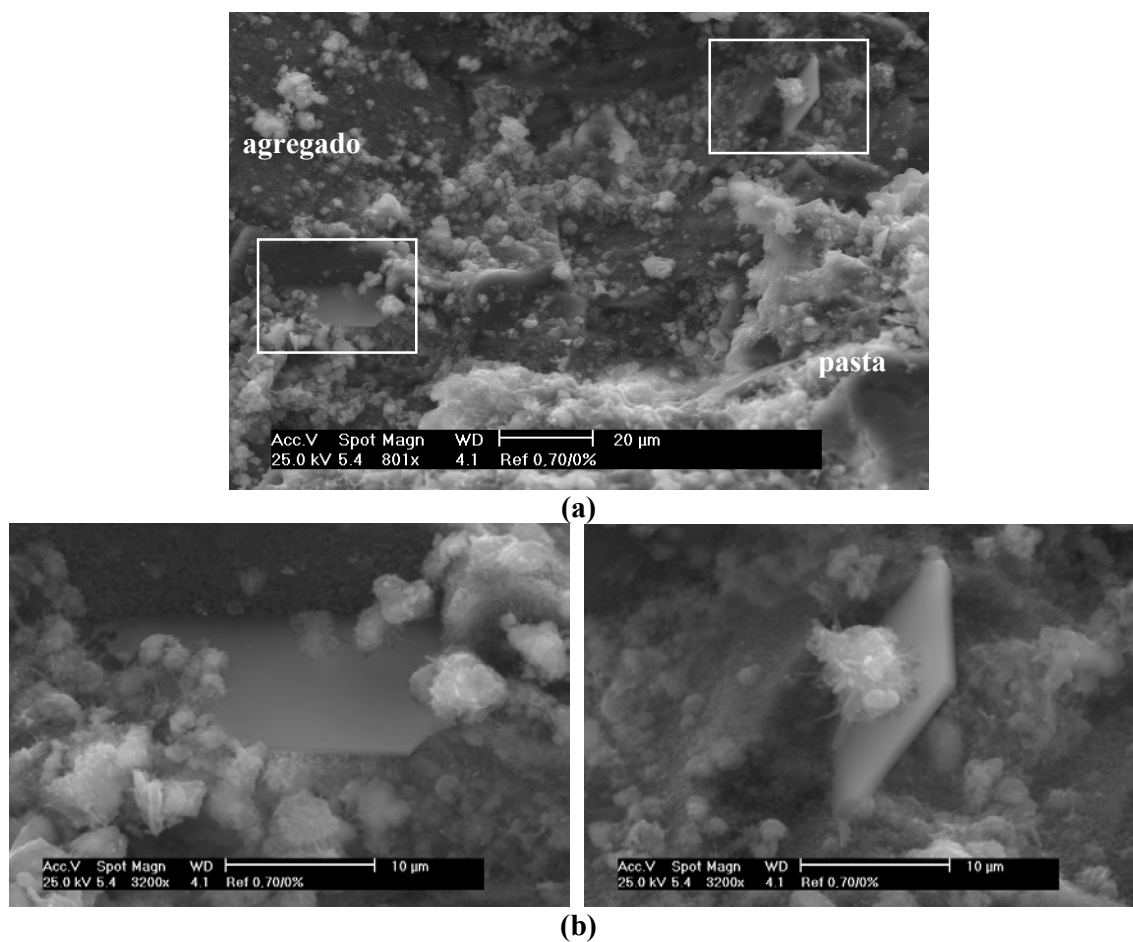
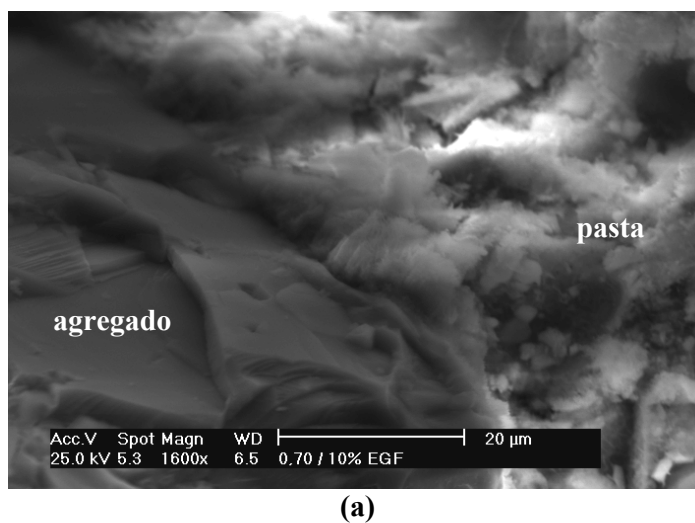


Figura 6.61 Micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários do concreto referência (a/agl.=0,70), aos 7 dias de idade **a)** interface pasta-agregado (magnitude de 800x) **b)** cristais de hidróxido de cálcio (3200x)



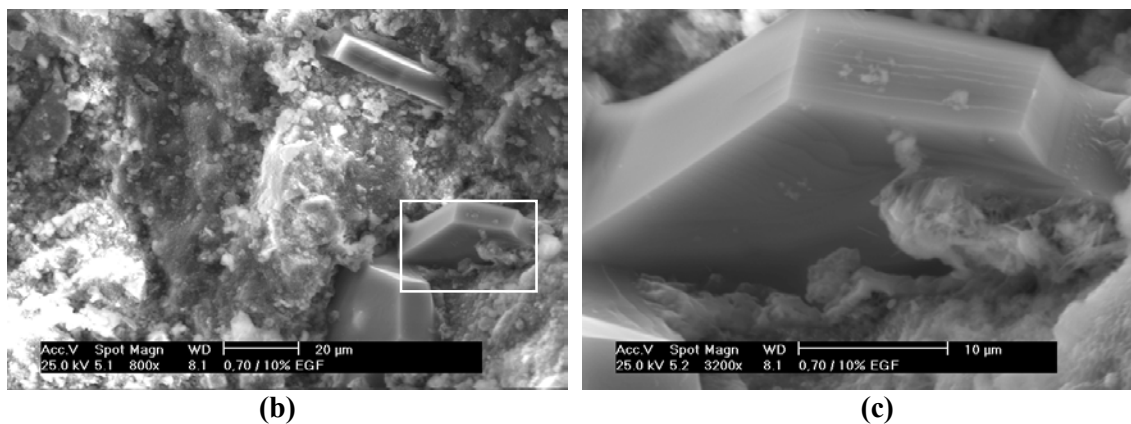
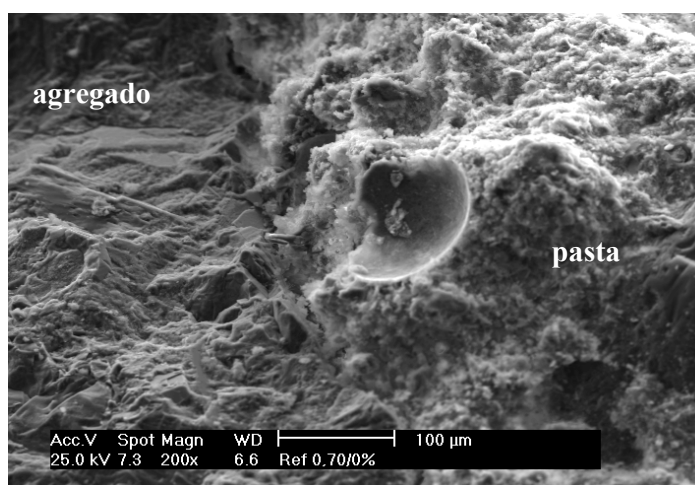
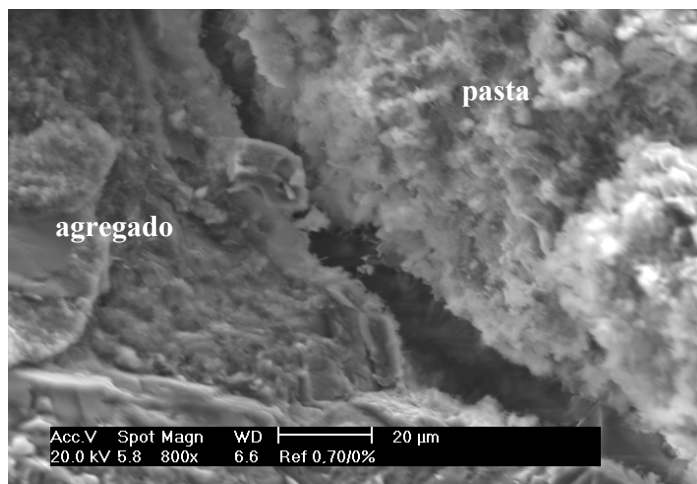


Figura 6.62 Micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários do concreto com TE=10% (a/agl.=0,70), aos 7 dias de idade **a)** interface pasta-agregado (magnitude de 1600x) **b)** cristais de hidróxido de cálcio (800x) **c)** (3200x)

A interface pasta-agregado do concreto referência (a/agl.=0,70), aos 28 dias de idade, está representada pela Figura 6.63. Para esta mesma idade (28 dias) e mesma relação a/agl. (a/agl.=0,70), a Figura 6.64 ilustra a interface pasta-agregado do concreto com 10% de substituição de cimento por EGF (TE=10%), onde observa-se que, embora ainda existam vazios, a zona de transição do concreto com TE=10% apresenta aspecto mais denso do que no concreto referência. Pode-se notar que, conforme Figura 6.63b, ocorre praticamente um destacamento na interface agregado e pasta de cimento hidratada do concreto referência, o que, para a mesma ampliação (Figura 6.64b), não é perceptível no concreto com TE=10%.

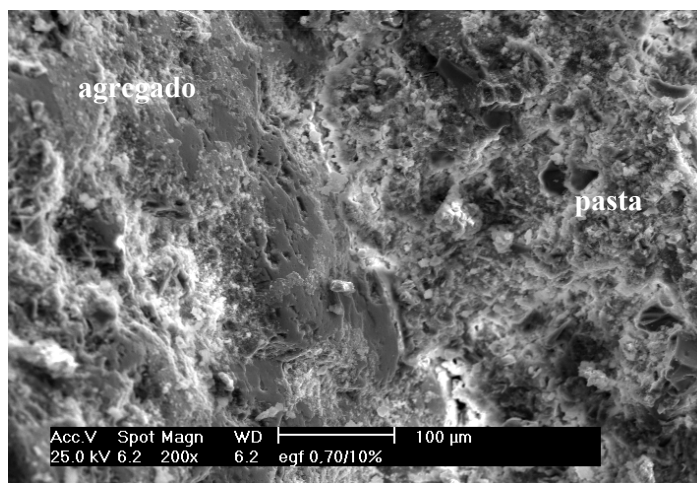


(a)

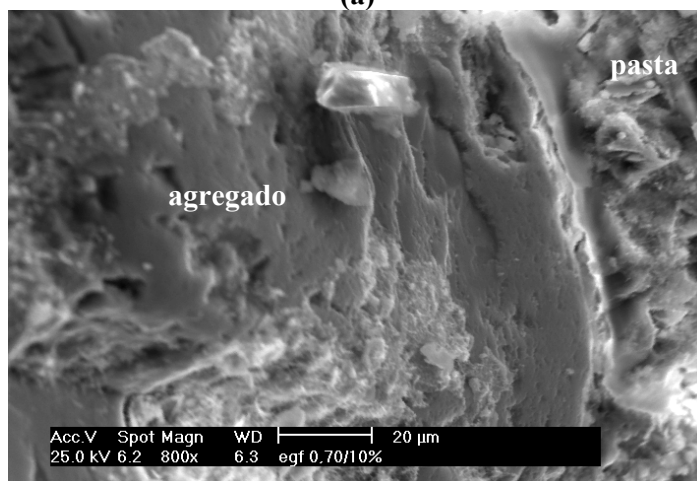


(b)

Figura 6.63 Micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários do concreto referência (a/agl.=0,70), aos 28 dias de idade; interface pasta-agregado **a)** magnitude de 200x
b) 800x



(a)



(b)

Figura 6.64 Micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários do concreto com TE=10% (a/agl.=0,70), aos 28 dias de idade ; interface pasta-agregado **a)** magnitude de 200x
b) 800x

6.3 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DOS CONCRETOS REFERÊNCIA E COM EGF

A caracterização ambiental do produto (concreto) foi realizada em amostras de concreto com teor de 50% de substituição de cimento por escória granulada de fundição (EGF), para relação água/aglomerante (a/agl.) igual a 0,70 e idade (ID) de 28 dias, comparando-se com o concreto referência, como discutido no item 5.3.7.3.

Os resultados da análise dos extratos lixiviados e solubilizados dos concretos referência (a/agl=0,70 e ID=28) e com EGF (a/agl=0,70, TE=50% e ID=28) encontram-se, respectivamente, na Tabela 6.48, Tabela 6.49, Tabela 6.50 e Tabela 6.51.

Tabela 6.48 Resultados do ensaio de lixiviação do concreto referência (a/agl.=0,70 e ID=28)

Elemento	Quantidade (mg/l)	Limite NBR 10004/1987 (mg/l)
Cromo Total	0,11	5,00
Cádmio	< 0,02	0,50
Chumbo	< 0,05	5,00
Prata	< 0,09	5,00
Bário	0,37	100,00
Mercúrio	< 0,0002	0,10
Fluoreto	0,43	150,00

Tabela 6.49 Resultados do ensaio de solubilização do concreto referência (a/agl.=0,70 e ID=28)

Elemento	Quantidade (mg/l)	Limite NBR 10004/1987 (mg/l)
Cromo Total	< 0,05	0,05
Cádmio	< 0,0002	0,005
Chumbo	< 0,05	0,05
Prata	< 0,01	0,05
Bário	0,73	1,00
Mercúrio	< 0,0002	0,001
Cobre	< 0,02	1,00
Zinco	< 0,02	5,00
Manganês	0,01	0,10
Alumínio	< 0,08	0,20
Ferro	< 0,02	0,30
Fluoreto	0,46	1,50
Cloreto	1,00	250,00
Sulfato	39,00	400,00

Tabela 6.50 Resultados do ensaio de lixiviação do concreto com EGF ($a/agl=0,70$, $TE=50\%$ e $ID=28$)

Elemento	Quantidade (mg/l)	Limite NBR 10004/1987 (mg/l)
Cromo Total	0,10	5,00
Cádmio	< 0,02	0,50
Chumbo	< 0,05	5,00
Prata	< 0,09	5,00
Bário	0,55	100,00
Mercúrio	< 0,0002	0,10
Fluoreto	0,47	150,00

Tabela 6.51 Resultados do ensaio de solubilização do concreto com EGF ($a/agl=0,70$, $TE=50\%$ e $ID=28$)

Elemento	Quantidade (mg/l)	Limite NBR 10004/1987 (mg/l)
Cromo Total	< 0,05	0,05
Cádmio	< 0,0002	0,005
Chumbo	< 0,05	0,05
Prata	< 0,01	0,05
Bário	0,49	1,00
Mercúrio	< 0,0002	0,001
Cobre	< 0,02	1,00
Zinco	< 0,02	5,00
Manganês	< 0,01	0,10
Alumínio	< 0,02	0,20
Ferro	< 0,02	0,30
Fluoreto	0,47	1,50
Cloreto	1,80	250,00
Sulfato	22,00	400,00

Observa-se que, tanto para o extrato lixiviado (Tabela 6.50) como o extrato solubilizado (Tabela 6.51) do concreto com EGF ($a/agl=0,70$, $TE=50\%$ e $ID=28$), os resultados são inferiores aos limites máximos estipulados pela NBR 10004 (1987). Além disso, comparando-se os resultados de lixiviação e solubilização do concreto com EGF (Tabela 6.50 e Tabela 6.51) com o concreto referência (Tabela 6.48 e Tabela 6.49), pode-se observar que o concreto com EGF obteve resultados próximos ao concreto referência, onde percebe-se que a EGF não modificou muito o comportamento ambiental do concreto. Sendo assim, de acordo com a NBR 10004 (1987), o concreto com EGF é classificado como material inerte (classe III).

7 CONCLUSÕES

Embora tecnologias limpas representem a base do desenvolvimento sustentável, nem sempre é possível, em função dos conhecimentos tecnológicos atuais, *evitar, minimizar ou reciclar dentro do próprio processo* os resíduos gerados. Desta forma, tecnologias de fim-de-tubo, através, por exemplo, da correta aplicação dos resíduos como matéria-prima, em processos industriais que consomem grande volume de materiais, como no caso da indústria da construção civil, podem contribuir de forma significativa na preservação do meio ambiente, bem como economia de energia e recursos naturais não renováveis.

A correta aplicação de um determinado resíduo (como no caso da escória granulada de fundição (EGF)), através do melhor aproveitamento de seu potencial reciclável, depende fundamentalmente de adequada avaliação de suas características físicas, químicas e estruturais, em função do uso proposto.

Como apresentado no capítulo 5, item 5.3.3.2, a caracterização química, física (após beneficiamento), bem como índice de atividade pozolânica (método físico) da escória granulada de fundição (EGF) mostraram que este material (tratado atualmente como resíduo da fundição) poderia apresentar um uso, agregando valor, como o proposto neste trabalho de pesquisa (substituição de parte do cimento em concretos).

Sendo assim, em função da adequação das características da EGF ao uso proposto e através da elaboração do projeto experimental, apresentado no capítulo 5, executando-se uma seqüência de ensaios econômicos e eficientes, foi possível avaliar os principais efeitos dos fatores controláveis determinados neste projeto de pesquisa (teor de substituição do cimento por escória granulada de fundição (TE), relação água/aglomerante ($a/agl.$) e idade do concreto (ID)), bem como o efeito de suas interações sobre as variáveis de resposta (resistência à compressão uniaxial (f_c), resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$) e resistência à tração na flexão ($f_t'F$)). As principais conclusões, em termos de propriedades mecânicas dos concretos, com utilização de EGF como substituição de parte do cimento, comparativamente aos concretos referência são apresentadas a seguir.

Além disso, é importante frisar que as conclusões apresentadas estão relacionadas às condições determinadas nesta pesquisa, especialmente no que diz respeito aos materiais e métodos utilizados no decorrer do estudo experimental, para a avaliação da viabilidade de

utilização de escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento em concretos, em termos de desempenho mecânico.

7.1 QUANTO ÀS PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas dos concretos referência e com EGF substituindo parte do cimento, estudadas neste projeto de pesquisa, como apresentado no capítulo 5, item 5.2.1, foram: resistência à compressão uniaxial (f_c), resistência à tração por compressão diametral ($ft'D$) e resistência à tração na flexão ($ft'F$). As conclusões referentes a cada variável de resposta estudada (f_c , $ft'D$ e $ft'F$) estão apresentadas a seguir.

7.1.1 Resistência à Compressão Uniaxial

Quanto às propriedades mecânicas, no que diz respeito à resistência à compressão uniaxial (f_c) de concretos com utilização de escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento, comparativamente ao concreto referência, pode-se concluir que:

– o modelo do comportamento da resistência à compressão uniaxial (f_c) do concreto com substituição de parte do cimento por escória granulada de fundição (EGF), bem como do concreto referência (sem EGF), obtido através de análise de regressão linear múltipla, válido para o intervalo dos níveis codificados dos fatores controláveis que fazem parte deste projeto, teve como resultado a seguinte expressão:

$$f_c = -215,576 - 25,3684 \cdot \frac{1}{(a/agl.)^{1,2}} + 224,691 \cdot \frac{1}{(TE)^{0,1}} - 0,820909 \cdot \frac{1}{(idade)^3} + 30,1479 \cdot \frac{1}{(a/agl.+TE)} + 40,5266 \cdot \frac{(idade)^{0,1}}{(a/agl.)} - 17,1615 \cdot \frac{(idade)^{0,1}}{(TE)} \quad [\text{MPa}]$$

$$R^2 = 93,0537\%$$

– concretos com escória granulada de fundição substituindo parte do cimento seguem a Lei de Abrams, onde através da análise do efeito isolado da relação água/aglomerante ($a/agl.$) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c), observou-se que f_c vai diminuindo à medida que a relação $a/agl.$ aumenta;

- na análise do efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF (TE), sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c), o concreto com TE=10% apresenta desempenho próximo ao concreto referência (TE=0%);
- tanto para o efeito da interação de 1ª ordem da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (TE), quanto para o efeito da interação de 1ª ordem do teor de substituição de cimento por EGF (TE) e da Idade (grau de hidratação) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c), observou-se que o concreto com 10% de substituição de cimento por EGF obteve os melhores resultados de f_c em relação aos demais teores de substituição, quando comparados ao concreto referência. As resistências à compressão do concreto com TE=10% foram semelhantes às resistências à compressão do concreto referência, sendo este comportamento mais evidente para as maiores relações água/aglomerante (0,55 e 0,70) e idades mais avançadas (91 dias);
- os resultados do efeito da interação de 1ª ordem da relação água/aglomerante (a/agl.) e idade (ID) sobre a resistência à compressão uniaxial (f_c) do concreto mostraram que houve ganho significativo de resistência à compressão aos 28 dias, independentemente da relação água/aglomerante, mantendo esta tendência evolutiva até idade mais avançadas de 91 dias;
- o desenvolvimento mais lento das resistências à compressão (f_c) em idades iniciais e acréscimo de f_c em idades mais avançadas (especialmente no caso de fatores água/aglomerante mais elevados), mostrados nos gráficos de percentual de hidratação do cimento em relação à idade de 28 dias (item 6.1.1.7), para o efeito da interação do teor de substituição de cimento por EGF (TE) e da idade (ID) sobre a resistência à compressão uniaxial do concreto (f_c), evidenciam a influência da reação pozolânica no caso dos concretos com substituição de cimento por EGF, onde observou-se acréscimo de f_c de até 35,62% aos 91 dias, do concreto com TE=50% e a/agl.=0,70, em relação ao f_c aos 28 dias de idade;
- a expressiva economia, em termos de consumo de cimento, evidenciou-se especialmente em relação as estimativas de consumo de cimento realizadas em função da resistência à compressão aos 91 dias de idade. Isto comprova mais uma vez a maior contribuição da escória granulada de fundição (EGF) utilizada como substituição de parte do cimento em concreto, em termos de resistência à compressão, em idades mais avançadas, possivelmente resultante de reações pozolânicas, com lentas reações de hidratação nas primeiras idades e gradativo crescimento de resistências em períodos mais prolongados de hidratação. Desta forma, o uso de EGF em concretos, além de representar ganhos econômicos, com o menor

consumo de cimento, também pode significar vantagens técnicas, em condições de uso onde, por exemplo, maior velocidade de desprendimento de calor nas primeiras idades, através do elevado consumo de cimento, possa representar prejuízos de durabilidade causados por manifestações patológicas, como tendência à fissuração por retração térmica.

De uma maneira geral, pode-se concluir que, em termos de resistência à compressão uniaxial (f_c), o teor de 10% de substituição de cimento por EGF apresentou melhor resultado de f_c , entre os teores avaliados e para as condições estudadas, atingindo resultados praticamente equivalentes aos resultados de f_c do concreto referência. Além disso, houve significativa economia em termos de consumo de cimento quando analisa-se o mesmo nível de resistência à compressão, especialmente para concretos com TE=50% e idades mais avançadas, onde obteve-se para $f_{c91}=25\text{MPa}$, economia de até 25,87% em termos de consumo de cimento utilizando TE =50%, quando comparado com o concreto referência (TE =0%).

7.1.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Em relação à resistência à tração por compressão diametral ($ft'D$) de concretos com utilização de escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento, comparativamente ao concreto referência, conclui-se que:

– o modelo do comportamento da resistência à tração por compressão diametral ($ft'D$) do concreto com substituição de parte do cimento por escória granulada de fundição (EGF), bem como do concreto referência (sem EGF), obtido através de análise de regressão linear múltipla e válido para o intervalo dos níveis codificados dos fatores controláveis que fazem parte deste projeto experimental, resultou em:

$$ft'D = -34,506 + 0,01612 \cdot \frac{1}{(a/agl.)^5} + 10,4931 \cdot \frac{1}{(TE)^{0,1}} + 23,7707 \cdot (idade)^{0,1} \\ + 9,54919 \cdot \frac{1}{(a/agl. + TE)^{0,3}} - 5,63454 \cdot \frac{(idade)^{0,3}}{(TE)^{0,2}} - 0,0172324 \cdot \frac{(idade)^{0,1}}{(a/agl. \cdot TE)^3} \quad [\text{MPa}]$$

$$R^2 = 84,0904\%$$

– o comportamento do concreto com EGF substituindo parte do cimento, em relação à $ft'D$, observado através da análise do efeito isolado da relação água/aglomerante (a/agl.) sobre $ft'D$,

confirma a relação inversa existente entre resistência e relação água/aglomerante (a/agl.), obedecendo a Lei de Abrams;

– o efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF (TE) sobre $f_t'D$ mostra tendência de diminuição da resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$) com o aumento de TE, entretanto os efeitos das interações de 1ª ordem dos fatores controláveis, $a/agl. \times TE$ e $TE \times ID$, mostram bom desempenho de $f_t'D$ dos concretos com TE=10% em relação ao concreto referência;

– quanto ao efeito da interação de 1ª ordem da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (TE) sobre a resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$), o concreto com TE=10% apresentou $f_t'D$ mais próxima à do concreto referência, comparativamente aos demais teores de substituição. Além disso, houve maior contribuição da substituição de 10% de cimento por EGF, em relação a $f_t'D$, para os concretos de relação a/agl. menores;

– os resultados do efeito da interação de 1ª ordem do teor de substituição de cimento por EGF (TE) e da Idade (ID) sobre a resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$) do concreto, assim como no caso do efeito de $a/agl. \times TE$ sobre $f_t'D$, mostraram tendência de maior contribuição da substituição de 10% de cimento por EGF, em termos de $f_t'D$, para os concretos de relação a/agl. mais baixos. Além disso, independentemente da relação água/aglomerante, também ocorre tendência de aproximação de $f_t'D$ do concreto com TE=10% da resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$) do concreto referência, para idades mais avançadas;

– os resultados de $f_t'D$ dos concretos com substituição de parte do cimento por EGF, comparativamente aos do concreto referência, em relação ao efeito da interação de 2ª ordem dos fatores controláveis $a/agl. \times TE \times ID$ (relação água/aglomerante x teor de substituição de cimento por EGF x idade) sobre $f_t'D$ (resistência à tração por compressão diametral), mostraram que houve maior crescimento das resistências à tração por compressão diametral após 28 dias de idade, obtendo-se também, conforme esperado, resultados de $f_t'D$ maiores para menores relações água/aglomerante.

Desta forma, quanto à resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$), concretos com teor de 10% de substituição de cimento por EGF também apresentaram melhor desempenho de $f_t'D$, em relação aos demais níveis de TE avaliados, obtendo-se resultados

semelhantes aos resultados de $f_t'D$ do concreto referência, especialmente para baixas relações água/aglomerante (a/agl.).

7.1.3 Resistência à Tração na Flexão

Quanto a resistência à tração na flexão ($f_t'F$) de concretos com utilização de escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento, comparativamente ao concreto referência, apresentam-se as seguintes conclusões:

– o modelo do comportamento da resistência à tração na flexão ($f_t'F$) do concreto com substituição de parte do cimento por escória granulada de fundição (EGF), bem como do concreto referência (sem EGF), obtido através de análise de regressão linear múltipla, sendo válido para o intervalo dos níveis codificados dos fatores controláveis deste estudo experimental, resultou em:

$$f_t'F = +85,751 + 21,6992 \cdot \frac{1}{(a/agl.)^{0,1}} - 49,4963 \cdot \frac{1}{(TE)^{0,1}} - 0,997984 \cdot (idade)^3 - 0,0713845 \cdot \frac{(TE)^5}{(a/agl.)^{0,4}} + 0,216881 \cdot \frac{(a/agl.)^{0,2}}{(idade)^3} - 53,0664 \cdot \left(\frac{TE}{idade}\right)^{0,1} \quad [\text{MPa}]$$

$$R^2 = 90,3052\%$$

– assim como para as resistências à compressão (f_c) e à tração por compressão diametral ($f_t'D$), o comportamento do concreto com EGF substituindo parte do cimento quanto à resistência à tração na flexão ($f_t'F$), através da análise do efeito isolado da relação água/aglomerante (a/agl.) sobre $f_t'F$, também obedece a Lei de Abrams;

– quanto ao efeito isolado do teor de substituição de cimento por EGF (TE) sobre $f_t'F$, o teor de 10% de substituição de cimento por EGF apresentou resultados de resistência à tração na flexão ($f_t'F$) iguais aos de resistência à tração na flexão ($f_t'F$) do concreto referência;

– em relação ao efeito da interação de 1ª ordem da relação água/aglomerante (a/agl.) e do teor de substituição de cimento por EGF (TE) sobre a resistência à tração na flexão ($f_t'F$), também ocorreu maior eficiência do concreto com TE=10% em relação aos demais níveis de substituição de cimento por EGF, quando comparado com o concreto referência, sendo que aos 28 dias de idade, observou-se que as resistências à tração na flexão dos concretos com

TE=10% e referência já eram iguais. Aos 91 dias de idade, o concreto com TE=30% apresentou resistência à tração na flexão ($f_t'F$) muito semelhante ao concreto referência;

- quanto ao efeito da interação de 1ª ordem do teor de substituição de cimento por EGF (TE) e da Idade (ID) sobre a resistência à tração na flexão ($f_t'F$) do concreto, os resultados de resistência à tração na flexão ($f_t'F$) dos concretos com TE=10% e referência foram equivalentes, independentemente da relação água/aglomerante (0,40; 0,55 e 0,70);
- também para o efeito da interação de 1ª ordem da relação água/aglomerante (a/agl.) e idade (ID) sobre a resistência à tração na flexão ($f_t'F$) dos concretos com EGF e referência, manteve-se a tendência de obtenção de maiores resistências à tração na flexão com a diminuição da relação água/aglomerante. Além disso, houve significativo crescimento de $f_t'F$ na idade de 28 dias, principalmente no caso dos concretos com TE=10% e referência, sendo que as resistências à tração na flexão mantiveram um crescimento evolutivo até idades avançadas, de 91 dias, comportamento especialmente demonstrado no caso dos concretos com TE=30% e TE=50%.

De maneira geral, conclui-se que o comportamento do concreto com EGF substituindo parte do cimento quanto à resistência à tração na flexão ($f_t'F$) confirma o comportamento observado no caso das análises de f_c e $f_t'D$, onde o teor de 10% de substituição de cimento por EGF apresentou melhor desempenho, neste caso em termos de $f_t'F$, entre os teores avaliados e para as condições de estudo, atingindo resultados praticamente iguais e até superiores (para relações água/aglomerantes mais elevadas) aos resultados de $f_t'F$ do concreto referência.

7.1.4 Relação entre Resistência à Tração e Resistência à Compressão do Concreto

Quanto à relação entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão ($f_t'D/f_c$), bem como a relação entre resistência à tração na flexão e resistência à compressão ($f_t'F/f_c$) dos concretos com substituição de parte do cimento por escória granulada de fundição (EGF) e referência (sem EGF), pode-se concluir que:

- as relações entre $f_t'D/f_c$ e $f_t'F/f_c$ dos concretos com substituição de parte do cimento por EGF e referência diminuem à medida que a relação água/aglomerante diminui, seguindo o

comportamento conhecido na literatura no caso de concretos sem utilização de materiais alternativos;

- a relação entre $f_t'F/f_c$ dos concretos com substituição de parte do cimento por EGF e referência diminui com a idade de cura, confirmando o comportamento descrito pela literatura, no entanto, este mesmo comportamento não se verificou para a relação entre $f_t'D/f_c$;
- as relações entre $f_t'D/f_c$ e $f_t'F/f_c$, predominantemente, aumentam com o aumento do teor de substituição de cimento por EGF;
- os modelos de representação das relações entre $f_t'D/f_c$ e $f_t'F/f_c$ do concreto com substituição de parte do cimento por EGF, bem como do concreto referência, obtidos através de análise de regressão linear múltipla (válidos para o intervalo de f_c compreendido entre $10\text{MPa} < f_c < 45\text{MPa}$, como também para o intervalo dos níveis codificados dos fatores controláveis deste projeto experimental), são os seguintes:

$$F_t'D = -1,60593 + 1,0762 \cdot (f_c)^{0,4} \quad [\text{MPa}]$$

$$R^2 = 84,1996\%$$

$$F_t'F = -0,613382 + 0,87712 \cdot (f_c)^{0,5} \quad [\text{MPa}]$$

$$R^2 = 86,7028\%$$

7.2 QUANTO À AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA DE CONCRETOS REFERÊNCIA E COM EGF

Através da análise da microestrutura de concretos referência e com 10% de substituição de cimento por EGF, para a mesma relação água/aglomerante ($a/agl.=0,70$) e idades de 7 e 28 dias, foi possível observar que embora as interfaces pasta-agregado de ambos concretos (referência e com EGF) se apresentassem porosas nas idades iniciais de 7 dias, aos 28 dias ocorreu o melhoramento da zona de transição pasta-agregado, especialmente para concreto com TE=10%, apresentando uma estrutura mais densa em relação às idades iniciais (7 dias), provavelmente devido à contribuição da reação pozolânica.

7.3 QUANTO À CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DE CONCRETOS REFERÊNCIA E COM EGF

A análise dos extratos lixiviados e solubilizados dos concretos com EGF ($a/agl.=0,70$, $TE=50\%$ e $ID=28$) resultaram em valores inferiores aos limites máximos estipulados pela NBR 10004 (1987), classificando o produto (concreto com EGF) como material inerte (classe III), o que significa que o concreto com EGF não representa risco ao ambiente.

8 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Como na elaboração desta pesquisa, sobre avaliação da utilização de escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento em concreto, enfatizou-se o estudo das propriedades mecânicas, outras pesquisas podem ser desenvolvidas para contribuir no conhecimento do desempenho em uso deste material reciclável (EGF), tanto em estudos que especifiquem a mesma aplicação (concreto) ou em outras aplicações diversas. Seguem algumas sugestões para pesquisas com este material (EGF):

- estudo otimizado da finura da escória granulada de fundição (quando da sua utilização como material aglomerante), através da elaboração de uma matriz experimental que contemple diferentes tempos de moagem, medindo-se em cada tempo de estudo a evolução da resistência à compressão, tamanho médio dos grãos e superfície específica da EGF;
- avaliação da durabilidade de concretos com a utilização de escória granulada de fundição como substituição parcial do cimento, através da elaboração de ensaios específicos de durabilidade, que simulam condições agressivas de exposição do concreto, medindo-se o desempenho ao longo do tempo destes concretos;
- avaliação do comprometimento ou não da proteção química conferida pelo concreto à armadura (quando da utilização de EGF em concreto armado), em função da reação pozolânica, a qual é acompanhada por uma diminuição no teor de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) da pasta de cimento hidratada, além da característica ácida desta escória (EGF);
- estudo da utilização de escória granulada de fundição em outras aplicações como material para construção civil, como por exemplo, emprego em artefatos de concreto, blocos pré-moldados de pavimentação, ou blocos de alvenaria;
- avaliação da caracterização ambiental da escória granulada de fundição e dos produtos resultantes da utilização da mesma, utilizando-se ensaio alemão, norma holandesa (especificados no capítulo 2, item 2.4), estabelecendo-se análise comparativa com os resultados obtidos através das normas brasileiras (NBR 10005/1987 e NBR 10006/1987).

REFERÊNCIAS

- AÏTCIN, P. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: PINI, 2000. 667 p.
- AÏTCIN, P-C. Cements of yesterday and today concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research** 30, 2000. p.1349-1359.
- ALDEA, C.; YOUNG, F.; WANG, K.; SHAH, S.P. Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement. **Cement and Concrete Research** 30, 2000. p.465-472.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1260. **Standard test method for potencial alkali reactivity of aggregates (Mortar-Bar Method)**, 1994.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 2940. **Standard specification for graded aggregate material for bases or subbases for highways or airports**, 1992.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 4792. **Standard test method for potencial expansion of aggregates from hydration reactions**, 1995.
- ALI, N. A.; CHAN, J.S.S.; PAPAGIANNAKIS, T.; THERIAULT, E.G. and BERGAN, A. T. **The use the steel slag in asphaltic concrete**. EFFECTS OF AGGREGATES AND MINERAL FILLERS ON ASPHALT MIXTURE PERFORMANCE, Philadelphia, ASTM STP 1147, p. 3-18, 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. **Anais...Espanha**, 1999. p. 85-93.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. Disponível em: <<http://www.abcp.com.br/>>. Acesso em: 10 nov. 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO - ABIFA. Mercado: produção regional. Disponível em: <<http://www.abifa.org.br/>>. Acesso em: 10 nov. 2002.
- 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5732 – **Cimento Portland comum**. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5735 – **Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5738 – **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5739 - **Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5743 – **Análise química de cimento Portland: determinação de perda ao fogo**. Rio de Janeiro, 1977.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5752 – **Materiais pozolânicos: determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5753 – **Cimentos: método de determinação de atividade pozolânica em cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6474 – **Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7211 – **Agregado para concreto**. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7214 – **Areia normal para ensaio de cimento**. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7215 – **Cimento Portland: determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7217 – **Agregados: determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7222 – **Argamassa e concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7223 – **Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7227 – **Cimento Portland: determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol**. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7251 – **Agregado em estado solto: determinação da massa unitária**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9776 – **Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9937 – **Agregados: determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004 – **Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10005 – **Lixiviação de Resíduos**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10005 – **Solubilização de Resíduos**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 11578 – **Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12142 - **Concreto: determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12578 – **Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12653 – **Materiais pozolânicos**. Rio de Janeiro, 1992.

BABU, K.G.; KUMAR, V.S.R. Efficiency of GGBS in concreto. **Cement and Concrete Research** 30, 2000. p.1031-1036.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J.G.; CHENG, Y.B. **Cement and Concrete Research** 30, 2000. p.1367-1374.

BERNARDES, A. M. Ser Humano, Resíduos e Processos de Reciclagem. Disciplina de Reciclagem de materiais metálicos. Porto Alegre: LACOR/PPGEM/UFRGS, 2000. (apostilas de aula).

BIALUCHA, R.; GEISELER, J.; KRASS, K. Assessment of the environmental compability of industrial by-products and recycled materials. In: **Iron and steel slags – properties and utilization**. Duisburg: 2000. p.249-258. Artigo publicado no Proceedings of the International Conference on Environmental Implications of Construction Materials and Tehnology Developments, 1994, Maastricht, The Netherlands.

CECCATTO, D.M.; RESCHKE, J.S. ; GRAFFITTI, D. F.; MORAES, C.A.M.; MASUERO, A. B.; VILELA, A. C. F. Caracterização da escória granulada de fundição visando sua utilização como material cimentante. In: CONGRESSO EM CIÊNCIA DE MATERIAIS DO MERCOSUL –SULMAT, Joinville, SC/Brasil. **Anais...** Joinville, 2002. p. 633-643.

CERJAN-STEFANOVIC, S.; RASTOVCAN-MIOC, A.; NOVOSEL-RADOVIC, V.J. Mechanical properties of cement with addition of eletric furnace slag. **Metaurgija** , vol. 36, part 2/ abril/junho, 1997. p.93-98.

CHAABAN, M.A. Hazardous waste source reduction in materials and processing technologies. **Journal materials Processing Technology** 119, 2001. p.336-343.

Cimento Web, portal do cimento no Brasil. Disponível em: <<http://www.cimento.com.br/estatisticas/prodcim.htm>>. Acesso em: 10 out. 2002.

CINCOTTO, M.A.; BATTAGIN, A.F.; AGOPYAN, V. **Caracterização de escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado**. São Paulo: IPT, 1992. 35p.

COLLINS, F.G.; SANJAYAN, J.G. Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. **Cement and Concrete Research** 29, 1999. p. 455-458.

DAL MOLIN, D.C.C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microsilica**. São Paulo, 1995, 286 p. Tese

(Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

DONGXUE, L.; XINHUA, F.; XUEQUAN, W. and MINGSHU, T. Durability study of steel slag cement. **Cement and Concrete Research**, 1997. v. 27, n. 7, p.983-987.

EDGE Jr., H. A. Melting, tapping and slagging. In: **Cupola handbook**. 5 ed. U.S.A: American Foundrymen's Society, Des Plaines, Illinois 60016, 1984. cap 18, p. 235 - 239.

EHRENBERG, A.; GEISELER, J Carbon dioxide emissions with cement production. In: **Iron and steel slags – properties and utilization**. Duisburg: 2000. p.281-292. Artigo apresentado no International Symposium on the Utilization of Metallurgical Slag – ISUS'99, 1999, Beijing, China.

ERCORECA, J.L.; GONZÁLES, I.; IRAZUSTABARRENA, A. Technology forecast in industrial waste management and treatment. In: REWAS'99 - GLOBAL SYMPOSIUM AND RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, Vol. 1, 1999, San Sebastián, Spain. **Anais...** San Sebastián: Minerals, Metals & Materials Society e Fundación Inasmet, 1999. p. 765-775.

FU, X.; HOU, W.; YANG, C.; LI, D.; WU, X. Studies on Portland cement with large amount of slag. **Cement and Concrete Research** 30, 2000. p. 645-649.

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: REWAS'99 - GLOBAL SYMPOSIUM AND RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, Vol. 1, 1999, San Sebastián, Spain. **Anais...** San Sebastián: Minerals, Metals & Materials Society e Fundación Inasmet, 1999. p. 417-424.

GETZNER, M. The quantitative and qualitative impacts of clean technologies on employment. **Journal of Cleaner Production** 10, 2002. p.305-319.

GEYER, R.T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Porto Alegre, 2001. 170 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GUMIERI, A.G. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos**. Porto Alegre, 2002, 226 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

HABASHI, F. Environmental issues in the metallurgical industry progress and problems. In: REWAS'99 - GLOBAL SYMPOSIUM AND RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, Vol. 1, 1999, San Sebastián, Spain. **Anais...** San Sebastián: Minerals, Metals & Materials Society e Fundación Inasmet, 1999. p. 721-734.

HAUSEN, E.C.; TEIXEIRA, O.P.B.; ÁLVARES, P.B. **Código estadual de meio ambiente do Rio Grande do Sul e legislação ambiental básica**. Porto Alegre: POLOST Editora, 2001. 247 p.

HELENE, P; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 349p.

HOOPER, P.D.; JENKINS, T. International cleaner technology databases: on line, off target. **J. Cleaner Prod.**, vol. 3, nº 1-2, 1995. p.33-40.

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

JOHN, V.M.; ZORDAN, S.E. Research & development methodology for recycling residues as building materials. **Waste Management** 21, 2001. p.213-219.

KANICKI, D.P. Fórum analisa passado, presente e futuro da indústria de fundição. **Revista Fundição e Serviços**, ano 11, n. 102, p. 72-87, junho de 2001. Artigo adaptado do texto intitulado “Global casting report: past, present & future”, publicação da revista Modern Casting, da AFS (American Foundrymen’s Society).

KAUFFMANN, P.; REGAN, R.W.; VOIGT, R.C. Survey of state environmental regulations impacting beneficial reuse of foundry residuals. **AFS Transactions**, Pennsylvania, 1996. p.527-538.

KAUTTO, P.; MELANEN, M. How does industry respond to waste policy instruments – Finnish experiences. **Journal of Cleaner Production** 11, 2003. p.1-11.

KOUDA, M. Experimental pavement using household waste slag. **Waste Management**, vol. 16, n. 5 e 6, 1996. p.461-474.

LEIDEL, D.S. Pollution Prevention – the options. **AFS Transactions**, Ontário, Canadá, 1996. p.917-922.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição** Porto Alegre, 2001, 269 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LIND, B.B.; FÄLLMAN, A.M.; LARSSON, L.B. Environmental impact of ferrochrome slag in road construction. **Waste Management** 21, 2001. p.255-264.

LÚCIO, A. Estrutura e Propriedades das Escórias. In: **Físico-química metalúrgica**, 2ª parte. Belo Horizonte: UFMG, 1981. cap.16, p.555-599.

MACHADO, A.T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. São Paulo, 2000, 135 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MAHAN, W. Slag control. In: **Cupola handbook**. 5 ed. U.S.A: American Foundrymen’s Society, Des Plaines, Illinois 60016, 1984. cap 20, p. 249 - 259.

MANCIO, M. **Contribuição ao estudo do fenômeno da instabilidade volumétrica das escórias de aciaria elétrica**. 141 p. Porto Alegre, 2001. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MARIOTTO, C.L. Regeneração de areias: uma tentativa de discussão sistemática. **Fundição & Matérias-Primas**, Caderno Técnico, p. A-T, jan/fev/2000.

MASUERO, A.B. **Estabilização das Escórias 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.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573p.

MEHTA, P.K. Natural pozzolans. In: MALHOTRA, V.M. **Supplementary cementing materials for concrete**. CANMET: Canada Centre for Mineral and Energy Technology, 1987. cap 1, p. 3 - 31.

MEYST, P. H. Slag disposal and cupola drop removal. In: **Cupola handbook**. 5 ed. U.S.A: American Foundrymen's Society, Des Plaines, Illinois 60016, 1984. cap 21, p. 261 - 267.

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, SC/Brasil, 1998. p. 801-804.

MONSHI, A.; ASGARANI, M.K. Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone. **Cement and Concrete Research** 29, 1999. p.1373-1377.

MONTEIRO, P.J.M. Disciplina de Tópicos Especiais: Tecnologia Avançada do Concreto. Porto Alegre: NORIE/PPGEC/UFRGS, 2001. (notas de aula).

MORAES, C.A.M. Reciclagem de resíduos sólidos de fundição: uma análise crítica. In: 57º CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS (ABM) - INTERNACIONAL, 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 22 a 25 de julho de 2002. p. 1550-1559.

MORAES, C.A.M. Disciplina de fundição (notas de aula). Porto Alegre: NucMat/ACA Mecânica/UNISINOS, 2002.

MORINO, K. and IWATSUKI, E. Utilization of electric arc furnace oxidizing slag as concrete aggregate. In: REWAS'99 - GLOBAL SYMPOSIUM AND RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, Vol. 1, 1999, San Sebastián, Spain. **Anais...** San Sebastián: Minerals, Metals & Materials Society e Fundación Inasmet, 1999. p. 521-530.

MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. **Waste Management** 21, 2001. p.285-293.

MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. Porto Alegre, 2000, 207 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MROUCH, U.; WAHLSTRÖM, M. By-products and recycled material in earth construction in Finland – an assessment of applicability. **Resources, Conservation and Recycling** 35, 2002. p.117-129.

MURPHY, J.; GOULDSON, A. Environmental policy and industrial innovation: integrating environment and economy through ecological modernisation. **Geoforum** 31, 2000. p.33-44.

MURPHY, J. N.; MAADOWCROFT, T. R. and BARR, P. V. Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag. **Canadian Metallurgical Quarterly**, 1997. v. 36, n. 5, p. 315-331.

NAKAMURA, T.; MAEDA, M.; SATOH, K.; YAJIMA, Y. Recycling project of non-ferrous metals in Japan. In: REWAS'99 - GLOBAL SYMPOSIUM AND RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, Vol. 2, 1999, San Sebastián, Spain. **Anais...** San Sebastián: Minerals, Metals & Materials Society e Fundación Inasmet, 1999. p. 1277-1286.

NAWY, E.G. **Fundamentals of high strength high performance concrete**. London: Longman Group Limited, 1996. 340p.

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

PIESKE, A.; CHAVES FILHO, L. M.; REIMER, J.F. **Ferros fundidos cinzentos de alta qualidade**. 3ed. FIESC: Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina, 1980. 274p.

PIETRELLI, L. Separation technologies: tools to improve the sustainable development. In: REWAS'99 - GLOBAL SYMPOSIUM AND RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, Vol. 1, 1999, San Sebastián, Spain. **Anais...** San Sebastián: Minerals, Metals & Materials Society e Fundación Inasmet, 1999. p. 223-229.

REGAN, R.W.; TIKALSKY, P.J.; VOIGT, R.C. Beneficial use of fine foundry aggregate: three promising options. **AFS Transactions**, Pennsylvania, 1998. p.167-172.

REIER, G.J.; ANDREWS, R.S.L. Planning for thermal sand reclamation. **AFS Transactions**, 1984. p.347-354.

RESCHKE, J.S. **Escória Granulada de Fundação Utilizada como Substituição ao Cimento em Concreto: Avaliação de Propriedades Relacionadas com a Durabilidade**. 30 p. Porto Alegre, 2002. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Trabalho em andamento.

RHA, C.Y.; KANG, S.K.; KIM, C.E. Investigation of the stability of hardened slag paste for the stabilization/solidification of wastes containing heavy metal ions. **Journal of Hazardous Materials** B73, 2000. p.255-267.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: PPGEP/UFRGS, 2000. 130p.

ROCCA, A. C. C.; IACOVONE, A.M.; BARROTI, A. J.et al. **Resíduos sólidos industriais**. 2ª ed. São Paulo: CETESB, 1993. 111p.

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – estudo laboratorial**. 101 p. Porto Alegre, 2002. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ROSTIK, L.F. EAF steel company and the by-product synergy environment. In: REWAS'99 - GLOBAL SYMPOSIUM AND RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN

TECHNOLOGY, Vol. 2, 1999, San Sebastián, Spain. **Anais...** San Sebastián: Minerals, Metals & Materials Society e Fundación Inasmet, 1999. p. 1593-1602.

SANTOS, C.V.J. **Tecnologias de produção mais limpas e análise do ciclo de vida aplicadas na indústria da construção civil ´estudos de caso.** 118 p. Porto Alegre, 2000. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SCHULSTROM, T. W. Metal control chemistry. In: **Cupola handbook.** 5 ed. U.S.A: American Foundrymen´s Society, Des Plaines, Illinois 60016, 1984. cap 19, p. 241 - 247.

SEALEY, B.J.; PHILLIPS, P.S.; HILL, G.J. Waste management issues for the UK ready-mixed concrete industry. **Resources, Conservation and Recycling** 32, 2001. p.321-331.

SHEN, L.Y.; TAM, V.W.Y. Implementation of environmental management in the Hong Kong construction industry. **International Journal of Project Management** 20, 2002. p.535-543.

SHI, C.; QIAN, J. High performance cementing materials from industrial slags – a review. **Resources, Conservation & Recycling** 29, 2000. p.195-207.

SILVA FILHO, A.F. **Contribuição ao estudo do desempenho de concreto produzido com agregado graúdo de escória de ferro-cromo.** 130 p. Porto Alegre, 2001. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SILVA, S.N.; SILVA, A.S .; FRANKLIN, F.; LOMGO, E.; ANDRADE, R. M. Reciclagem da areia de fundição nos canais de corrida dos alto-fornos da CSN. In: XXX SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 1999, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, MG/Brasil, 1999. p. 609-623.

SÜSSEKIND, J. C. **Curso de concreto.** vol. 1, 4ed. Rio de Janeiro: GLOBO, 1985. 378p.

TAN, K.; PU, X. Strengthening effects of finely ground fly ash, granulated blast furnace slag, and their combination. **Cement and Concrete Research**, vol. 28, n. 12, 1998. p.1819-1825.

THOMAS, S.P. **Foundry sand beneficial reuse manual.** AFS Sand Reclamation and Reuse Committee: American Foundrymen´s a Society. Illinois, USA, 1996. 24 p.

TYBULCZUK, J.; MARTYNOWICZ-LIZ, K. Tendências mundiais nos mercados e na produção de fundição. **Revista Fundição & Matérias-Primas**, ano V, n. 48, p. 52-57, julho/agosto 2002. Trabalho apresentado durante o CONAF 2001.

UEHARA, K.; SAKURAI, M. Application of foundry slag for metal cutting – performance as a diffusion inhibitor. **Journal of Materials Processing Technology** 62, Japan, p.435-439, 1996.

VIKLUND-WHITE, C.; YE, G. Utilization and treatment of steelmaking slags. In: REWAS´99 - GLOBAL SYMPOSIUM AND RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, Vol. 1, 1999, San Sebastián, Spain. **Anais...** San Sebastián: Minerals, Metals & Materials Society e Fundación Inasmet, 1999. p. 337-345.

VILELA, A.C.F. *Disciplina de Fundamentos da Fabricação do Aço (notas de aula)*. Porto Alegre: LASID/PPGEM/UFRGS, 2001.

XUEQUAN, W.; HONG, Z.; XINKAI, H.; HUSEN, L. Study on steel slag and fly ash composite Portland cement. **Cement and Concrete Research** 29, 1999. p.1103-1106.

ZETTERMANN, L.F. **Caracterização da escória de aço inoxidável com vistas a seu reaproveitamento no processo de produção do aço**. Porto Alegre, 2001. 68 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

WATANABE, F.A.; GEMELLI, E.; FOLGUERAS, M. V. Utilização de areia de fundição como agregado na confecção de pavimentos de concreto, parte I: propriedades mecânica e microestruturais do concreto. In: CONGRESSO EM CIÊNCIA DE MATERIAIS DO MERCOSUL –SULMAT, Joinville, SC/Brasil. **Anais...** Joinville, 2002. p. 833-841.

ANEXOS

**ANEXO 1: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA GRANULADA DE
FUNDIÇÃO MOÍDA NO TEMPO DE 40 MINUTOS E UTILIZADA NO PROJETO
EXPERIMENTAL**



PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

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

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	0.01	0.20	0.43	1.14	1.76	2.35	2.90	3.41	3.88	4.32
q3	0.00	0.02	0.04	0.07	0.11	0.14	0.17	0.19	0.21	0.23
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	4.74	5.16	5.59	6.02	6.45	6.88	7.74	8.58	9.39	10.19
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
Q3	10.96	11.69	12.39	13.06	13.69	14.29	14.87	15.43	15.97	16.76
q3	0.61	0.63	0.65	0.67	0.67	0.68	0.70	0.71	0.72	0.75
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	17.50	18.44	19.12	19.76	20.57	21.51	22.40	23.26	24.11	24.95
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
Q3	25.79	27.46	29.12	30.74	32.31	33.81	35.24	36.60	37.91	39.20
q3	1.01	1.09	1.20	1.28	1.35	1.39	1.43	1.45	1.49	1.55
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	40.47	41.73	42.99	44.26	45.54	48.15	51.99	54.43	56.71	58.86
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
Q3	60.89	62.79	64.60	67.16	68.79	72.66	74.87	77.03	79.84	81.84
q3	2.45	2.42	2.43	2.44	2.47	2.53	2.61	2.70	2.80	2.82
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	83.75	86.66	88.74	91.02	92.98	94.63	95.98	97.08	98.83	99.66
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
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
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 / %



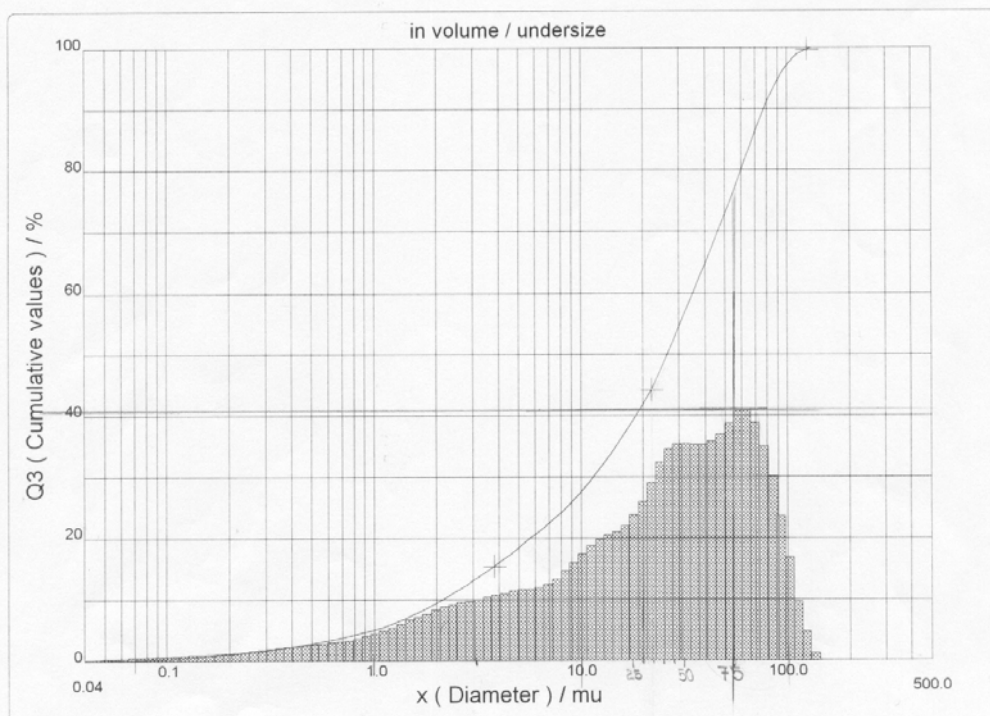
PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref	: MOINHO 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 : 1

Ref : 2.r44.m3.66M1818/3.36/703/m1.20.5.10.1Fh.20.5.10.1Bh/Q-.0.0.0/300.0.15.g60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.0/V 2.12

**ANEXO 2: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA GRANULADA DE
FUNDIÇÃO MOÍDA NO TEMPO DE 60 MINUTOS**



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 : Hexametafosfato 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 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 / %



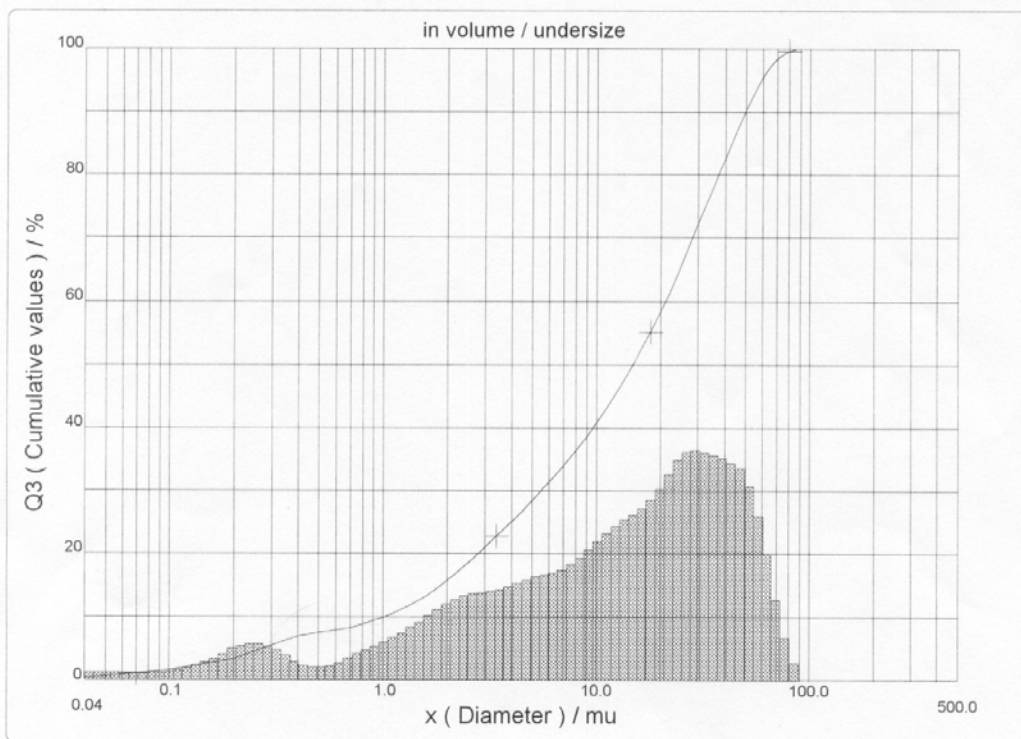
PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

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	



Serial nb : 1

Ref : 2.r44.m3.66M1818/3.36/704/m1.20.5.10.1Ph.20.5.10.1Bh/Q-.0.0.0.0/300.0.15.g60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.0/V 2.12

**ANEXO 3: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA GRANULADA DE
FUNDIÇÃO MOÍDA NO TEMPO DE 80 MINUTOS**



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 / %



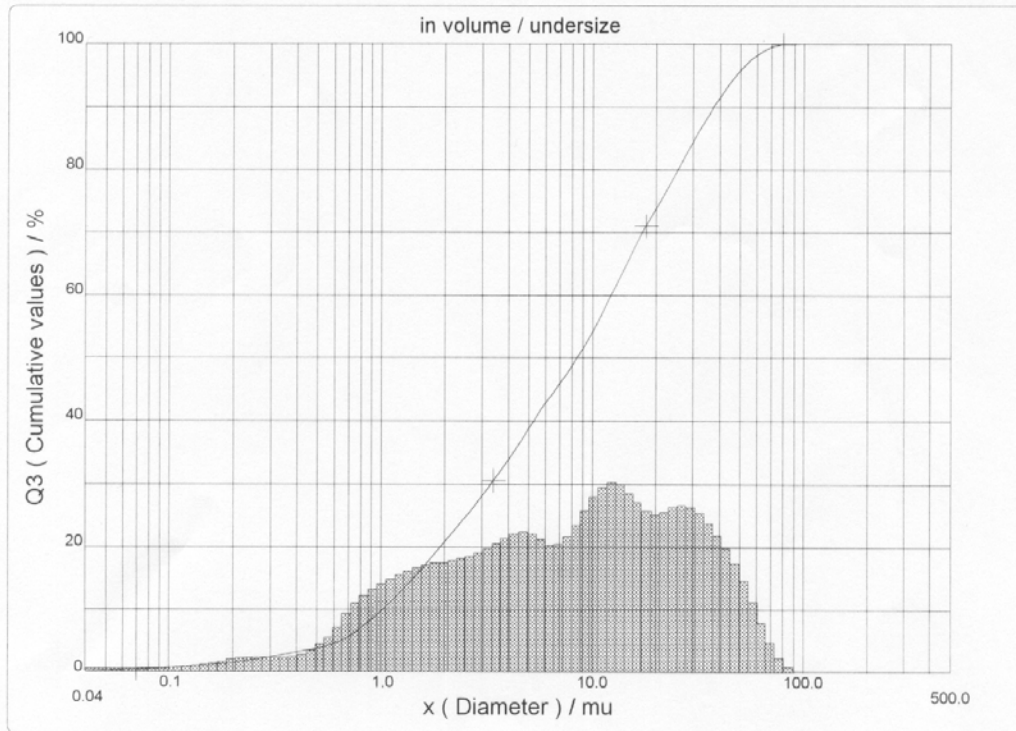
PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 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	



Serial nb : 1

Ref : 1.r44.m3.45M1818/3.36/705/m1.20.5.10.IFh.20.5.10.1Bh/Q-.0.0.0.0/300.0.15.g60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.0/V 2.12

**ANEXO 4: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA GRANULADA DE
FUNDIÇÃO MOÍDA NO TEMPO DE 100 MINUTOS**



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 / %



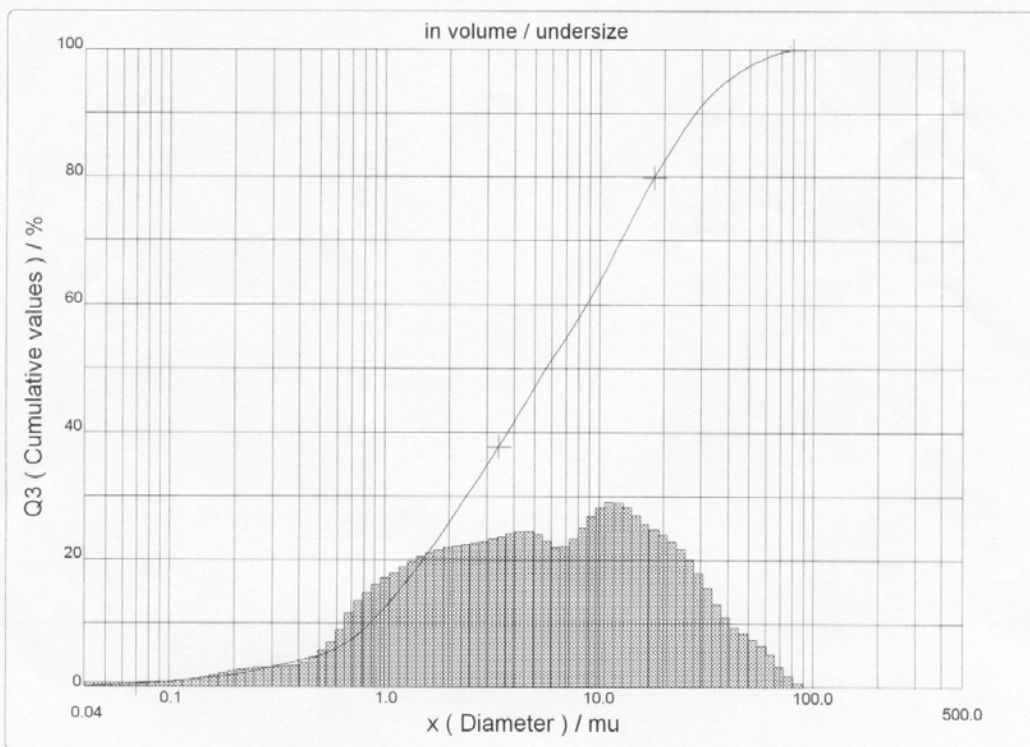
PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 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 : Hexametáfosfato 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



Serial nb : 1

Ref : 1.r44.m3.45M1818/3.36/706/m1.20.5.10.1Fh.20.5.10.1Bh/Q-0.0.0.0/300.0.15.g60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.0/V 2.13

**ANEXO 5: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA GRANULADA DE
FUNDIÇÃO MOÍDA NO TEMPO DE 120 MINUTOS**



PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

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

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 / %

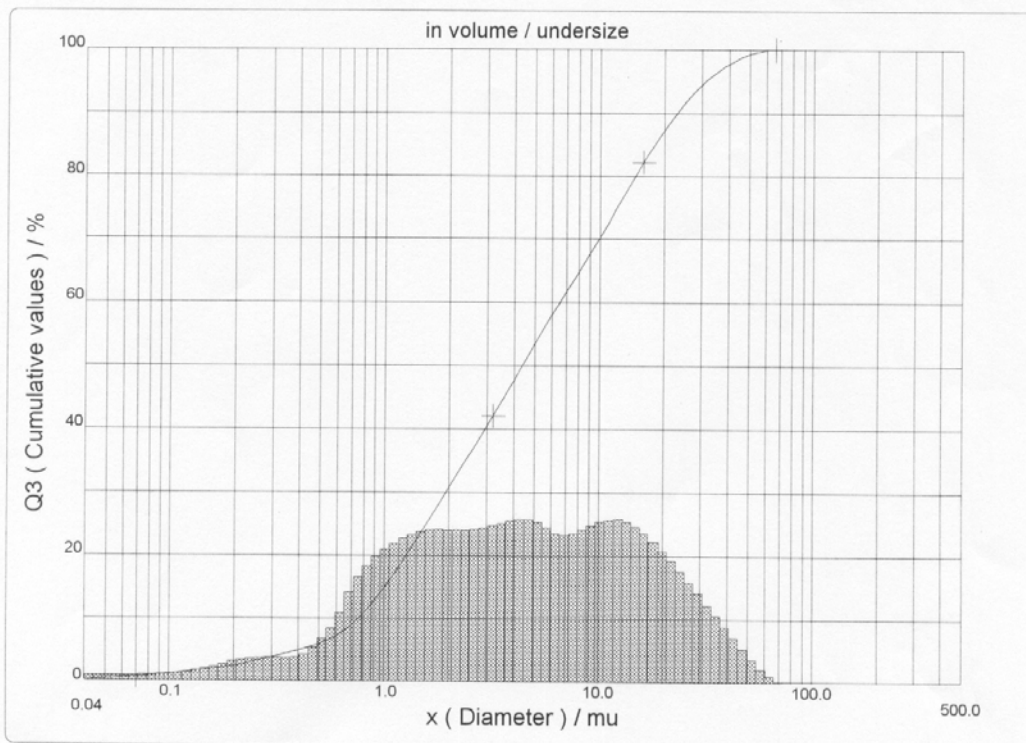


PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

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



**ANEXO 6: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA GRANULADA DE
FUNDIÇÃO MOÍDA NO TEMPO DE 180 MINUTOS, EM MOINHO DE
CAPACIDADE DE $\cong 7,5$ LITROS**



PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref	: MOINHO GRANDE 180 MIN	Ultrasounds	: 60	s (+during)
Type produit	: ESCORIA	Concentration	: 25	
Client	: NORIE	Diameter at 10%	: 7.59	mu
Comments	: ESCORIA GRAN FUNDICAO	Diameter at 50%	: 72.88	mu
Liquid	:	Diameter at 90%	: 280.23	mu
Dispersing agent	: Hexametafosfato sódio	Fraunhofer		
Operator	: UFRGS/CT/LAPROM/PATRICIA	Density/Factor	-----	
Company	:	Specific surface	-----	
Location	:	Auto. dilution/top up	: No / No	
Date	: 15/01/2002	Nb Measur./Rins.	: 20 / 4	
Time	: 13:00:51			
Index meas.	: 691			

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	0.00	0.07	0.14	0.39	0.62	0.83	1.02	1.22	1.40	1.59
q3	0.00	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	1.77	1.95	2.13	2.31	2.49	2.67	3.03	3.38	3.73	4.07
q3	0.10	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	4.39	4.71	5.02	5.31	5.60	5.87	6.14	6.40	6.64	7.00
q3	0.25	0.27	0.28	0.28	0.30	0.30	0.32	0.33	0.32	0.34
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	7.33	7.76	8.06	8.35	8.71	9.14	9.54	9.93	10.31	10.69
q3	0.33	0.35	0.35	0.36	0.35	0.36	0.37	0.38	0.40	0.42
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	11.06	11.81	12.56	13.30	14.04	14.76	15.47	16.17	16.86	17.55
q3	0.44	0.48	0.53	0.58	0.63	0.66	0.70	0.73	0.77	0.82
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	18.24	18.93	19.62	20.33	21.04	22.48	24.64	26.04	27.41	28.74
q3	0.86	0.91	0.96	1.03	1.08	1.17	1.29	1.37	1.44	1.49
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	30.03	31.29	32.53	34.33	35.51	38.37	40.02	41.63	43.72	45.24
q3	1.53	1.58	1.64	1.69	1.76	1.84	1.92	1.98	2.05	2.11
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	46.72	49.12	50.97	53.17	55.26	57.22	59.04	60.74	64.34	67.58
q3	2.15	2.23	2.29	2.31	2.33	2.32	2.28	2.24	2.15	2.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	68.68	70.71	72.53	74.23	75.84	77.39	78.94	80.44	82.16	83.79
q3	1.90	1.85	1.79	1.78	1.80	1.84	1.94	1.98	2.00	2.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	85.80	86.96	89.98	91.64	92.71	95.02	96.98	97.88	98.67	100.00
q3	1.97	1.92	1.80	1.63	1.49	1.31	1.11	1.01	0.94	0.85

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

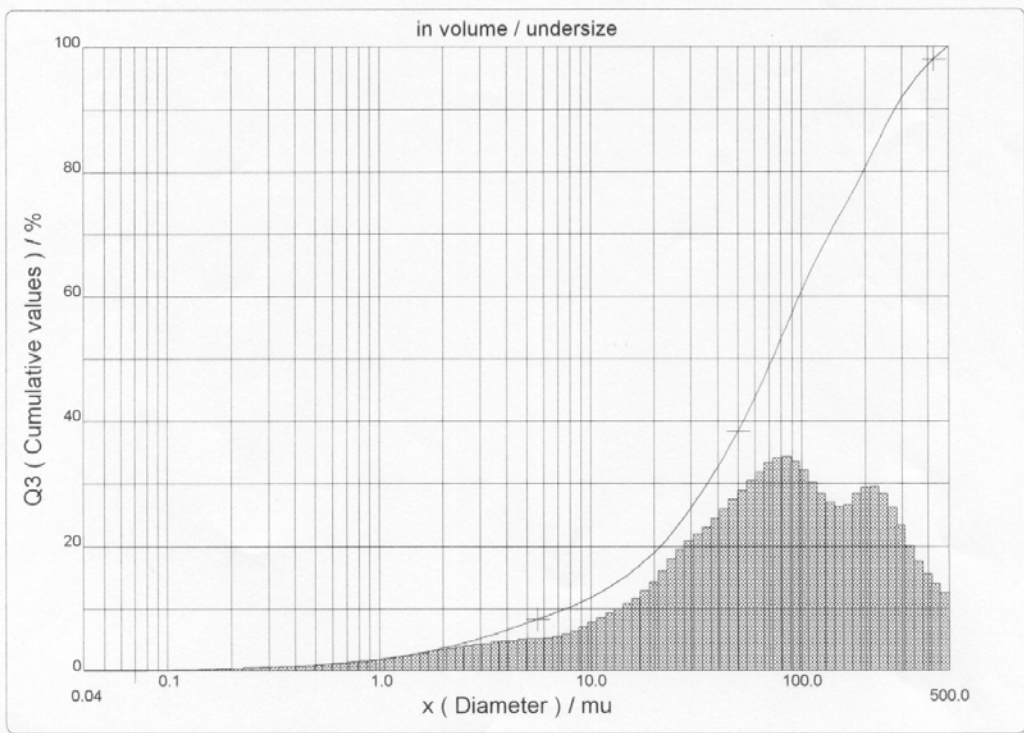


PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid

Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref : MOINHO GRANDE 180 MIN Type produit : ESCORIA Client : NORIE Comments : ESCORIA GRAN FUNDICAO Liquid : Dispersing agent : Hexametafosfato sódio Operator : UFRGS/CT/LAPROM/PATRICIA Company : Location : Date : 15/01/2002 Time : 13:00:51 Index meas. : 691	Ultrasounds : 60 s (+during) Concentration : 25 Diameter at 10% : 7.59 mu Diameter at 50% : 72.88 mu Diameter at 90% : 280.23 mu Fraunhofer Density/Factor : ----- Specific surface : ----- Auto. dilution/top up : No / No Nb Measur./Rins. : 20 / 4
--	--



ANEXO 7: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CIMENTO CP II-F



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 / %

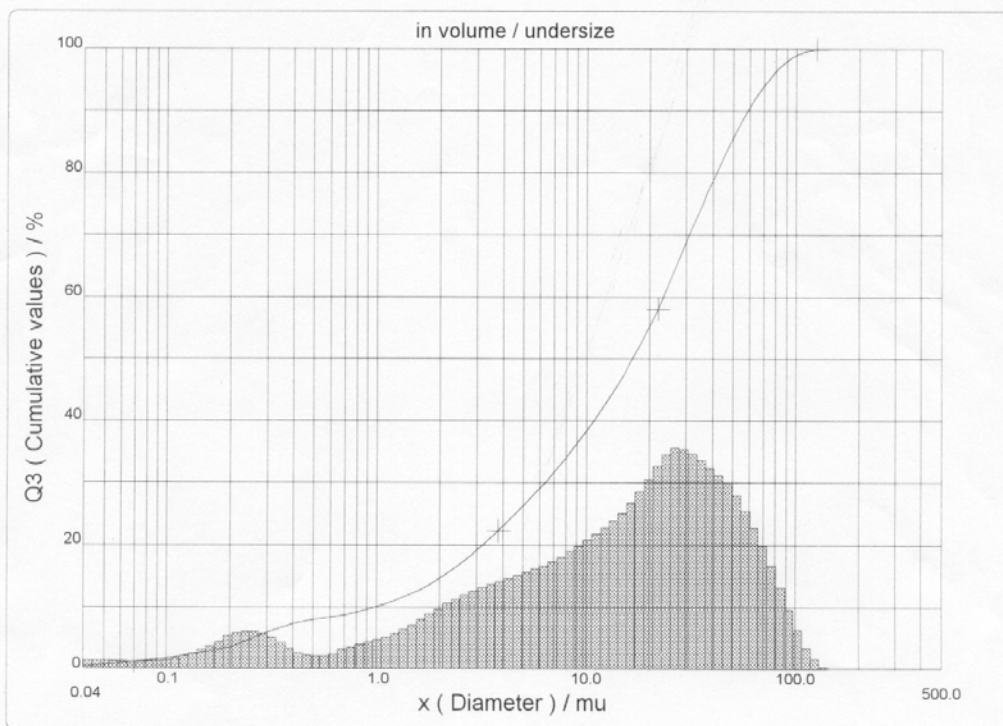


PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

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			



Serial nb : 1

Ref : 2.r44.m3.66M1818/3.36/822/m1.20.5.10.1Fh.20.5.10.1Bh/Q-.0.0.0.0/300.0.15.g60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.0/V 2.12

**ANEXO 8: RELATÓRIO DO ENSAIO DE 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*.

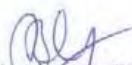
TABELA - Grau de vitrificação e índice de refração

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. Vagner Maringolo
 Assessor Técnico


 Geól. Arnaldo Forti Battagin
 Chefe do Laboratório

ANEXO 9: 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 DATA: 05/07/01
 CLIENTE: FUNDIÇÃO BECKER DATA DA COLETA: 03/04/01
 ENDEREÇO: Rua Acelino Francisco de Medeiros, 430 CEP: 94010-590 CIDADE: Gravataí
 DESCRIÇÃO DA AMOSTRA: Escória de Fundição.

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
Mercurio (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.
Mercurio (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
Mercúrio (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 Maris Leonardis
Stella Maris Leonardis
CRQ - 11 - 05200398

**ANEXO 10: RELATÓRIO DO ENSAIO QUÍMICO DE ATIVIDADE POZOLÂNICA
DA EGF, REALIZADO PELA CIENTEC**

Documento **RELATÓRIO DE ENSAIO** Número **2900/7399**

Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e aplicam-se exclusivamente ao(s) item(ns) ensaiado(s) ou calibrado(s).
Este documento somente poderá ser publicado na íntegra.

ENSAIO QUÍMICO

Cliente: CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL/NORIE - UFRGS
Av. Osvaldo Aranha, 99/3.º andar
90035-190 – Porto Alegre – RS

Item ensaiado: uma amostra de escória granulada de fundição entregue à CIENTEC pelo Cliente.

Data do recebimento do item: 04 de março de 2002.

Período da realização dos ensaios: 19 de março a 01 de abril de 2002.

Métodos: foi realizada a determinação da pozolanicidade por volumetria de neutralização com ácido clorídrico e volumetria de complexação com EDTA. Os valores obtidos foram interpretados graficamente conforme previsto na NBR 5753/91 e classificados quanto à pozolanicidade.

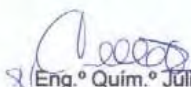
RESULTADOS:

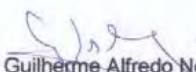
Alcalinidade total, milimoles de OH⁻/L.....54,9

Teor em CaO, milimoles de CaO/L..... 10,4

Conclusão: a amostra é considerada não pozolânica.

Porto Alegre, 01 de abril de 2002.


Eng.º Quím.º Júlio César Trois Endres
Gerente do Departamento de Química


Quím.º Guilherme Alfredo Noschang
Responsável Técnico, CRQ 05200689 – 5.ª Região
Coordenador do Laboratório de Análises Inorgânicas

1/1

**ANEXO 11: TABELAS UTILIZADAS NO PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DAS
MOLDAGENS DOS CONCRETOS**

PLANEJAMENTO MOLDAGENS - PROJETO EGF

BLOCO 1A - TERÇA - 05/03/2002 - manhã

H = 77 / 73 %

T = 27 / 28 °C

1 : 1,50 : 2,22			
Traço nº 01	Material:	Quant.:	Unid.:
CP II - F <i>a agt. = 0,40</i> 0%	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	11730,00	g
	Areia	17590,00	g
	EGF	0,00	g
	Água	4691,00	g
	Aditivo	0,00	g
	Slump =	8,5 cm	

1 : 3,07 : 3,61			
Traço nº 02	Material:	Quant.:	Unid.:
CP II - F <i>a agt. = 0,70</i> 0%	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	7210,00	g
	Areia	22110,00	g
	EGF	0,00	g
	Água	4694,70	g
	Aditivo		
	Slump =	7,0 cm	

0,9 : 0,091 de EGF : 2,28 : 2,91			
Traço nº 03	Material:	Quant.:	Unid.:
CP II - F <i>a agt. = 0,55</i> 10% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	8030,00	g
	Areia	20390,00	g
	EGF	820,00	g
	Água	4486,60	g
	Aditivo		
	Slump =	7,0 cm	

0,7 : 0,273 de EGF : 1,50 : 2,22			
Traço nº 04	Material:	Quant.:	Unid.:
CP II - F <i>a agt. = 0,40</i> 30% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	8210,00	g
	Areia	17590,00	g
	EGF	3220,00	g
	Água	4560,80	g
	Aditivo	0,00	g
	Slump =	8,5 cm	

0,7 : 0,273 de EGF : 3,07 : 3,61			
Traço nº 05	Material:	Quant.:	Unid.:
CP II - F <i>a agt. = 0,70</i> 30% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	5040,00	g
	Areia	22110,00	g
	EGF	1980,00	g
	Água	4796,40	g
	Aditivo		
	Slump =	7,5 cm	

0,5 : 0,455 de EGF : 2,28 : 2,91			
Traço nº 06	Material:	Quant.:	Unid.:
CP II - F <i>a agt. = 0,55</i> 50% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	4460,00	g
	Areia	20390,00	g
	EGF	4090,00	g
	Água	4703,00	g
	Aditivo		
	Slump =	7,5 cm	

slump desejado = 8 (+/- 1 cm)

PLANEJAMENTO MOLDAGENS - PROJETO EGF

BLOCO 1B - QUINTA - 07/03/2002 - manhã

H = 81 / 81 %

T = 27 / 27,5 °C

1 : 2,28 : 2,91			
Traço nº 07	Material:	Quant.:	Unid.:
CP II - F <i>a/agl.=0,55</i> 0%	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	8930,00	g
	Areia	20390,00	g
	EGF	0,00	g
	Água	-4480,00	g
	Slump =	7,5 cm	

0,9 : 0,091 de EGF : 1,50 : 2,22			
Traço nº 08	Material:	Quant.:	Unid.:
CP II - F <i>a/agl.=0,40</i> 10%	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	10550,00	g
	Areia	17590,00	g
	EGF	1070,00	g
	Água	-4472,00	g
	Aditivo	0,00	g
Slump =	9,0 cm		

0,9 : 0,091 de EGF : 3,07 : 3,61			
Traço nº 09	Material:	Quant.:	Unid.:
CP II - F <i>a/agl.=0,70</i> 10% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	6480,00	g
	Areia	22110,00	g
	EGF	660,00	g
	Água	-4738,00	g
	Slump =	8,0 cm	

0,7 : 0,273 de EGF : 2,28 : 2,91			
Traço nº 10	Material:	Quant.:	Unid.:
CP II - F <i>a/agl.=0,55</i> 30% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	6250,00	g
	Areia	20390,00	g
	EGF	2450,00	g
	Água	-4488,00	g
	Slump =	8,5 cm	

0,5 : 0,455 de EGF : 1,50 : 2,22			
Traço nº 11	Material:	Quant.:	Unid.:
CP II - F <i>a/agl.=0,40</i> 50% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	5860,00	g
	Areia	17590,00	g
	EGF	5370,00	g
	Água	-4316,00	g
	Aditivo	0,00	g
Slump =	7,00 cm		

0,5 : 0,455 de EGF : 3,07 : 3,61			
Traço nº 12	Material:	Quant.:	Unid.:
CP II - F <i>a/agl.=0,70</i> 50% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	3600,00	g
	Areia	22110,00	g
	EGF	3300,00	g
	Água	4832,00	g
	Slump =	6,0 cm	

slump desejado = 8 (+/-1 cm)

PLANEJAMENTO MOLDAGENS - PROJETO EGF

BLOCO 2A - TERÇA - 26/03/2002 - manhã

H = 78 / 78%

T = 25,8 / 26,3 °C

Traço nº 13 (05)		0,7 : 0,273 de EGF : 3,07 : 3,61	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a agl. = 0,70</i> 30% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	5040,00	g
	Areia	22110,00	g
	EGF	1980,00	g
	Água	4796,40	g
	Slump =	8,5 cm	

Traço nº 14 (06)		0,5 : 0,455 de EGF : 2,28 : 2,91	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a agl. = 0,55</i> 50% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	4460,00	g
	Areia	20390,00	g
	EGF	4090,00	g
	Água	4703,00	g
	Slump =	10,0 cm	

Traço nº 15 (04)		0,7 : 0,273 de EGF : 1,50 : 2,22	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a agl. = 0,40</i> 30% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	8210,00	g
	Areia	17590,00	g
	EGF	3220,00	g
	Água	4560,80	g
	Aditivo	0,00	g
	Slump =	8,5 cm	

Traço nº 16 (03)		0,9 : 0,091 de EGF : 2,28 : 2,91	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a agl. = 0,55</i> 10% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	8030,00	g
	Areia	20390,00	g
	EGF	820,00	g
	Água	4486,60	g
	Slump =	8,0 cm	

Traço nº 17 (01)		1 : 1,50 : 2,22	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a agl. = 0,40</i> 0%	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	11730,00	g
	Areia	17590,00	g
	EGF	0,00	g
	Água	4691,00	g
	Aditivo	0,00	g
Slump =	12,0 cm		

Traço nº 18 (02)		1 : 3,07 : 3,61	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a agl. = 0,70</i> 0%	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	7210,00	g
	Areia	22110,00	g
	EGF	0,00	g
	Água	4694,70	g
	Slump =	7,0 cm	

slump desejado = 8 (+/-1 cm)

PLANEJAMENTO MOLDAGENS - PROJETO EGF

BLOCO 2B - QUINTA - 14/03/2002 - manhã

H = 81%

T = 27°C

Traço nº 19 (11)		0,5 : 0,455 de EGF : 1,50 : 2,22	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a/agl.=0,40</i> 50% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	5860,00	g
	Areia	17590,00	g
	EGF	5370,00	g
	Água	4316,00	g
	Aditivo	0,00	g
	Slump =	7,0 cm	

Traço nº 20 (12)		0,5 : 0,455 de EGF : 3,07 : 3,61	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a/agl.=0,70</i> 50% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	3600,00	g
	Areia	22110,00	g
	EGF	3300,00	g
	Água	4832,00	g
	Aditivo	0,00	g
	Slump =	5,0 cm	

Traço nº 21 (10)		0,7 : 0,273 de EGF : 2,28 : 2,91	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a/agl.=0,55</i> 30% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	6250,00	g
	Areia	20390,00	g
	EGF	2450,00	g
	Água	4488,00	g
	Aditivo	0,00	g
	Slump =	6,5 cm	

Traço nº 22 (09)		0,9 : 0,091 de EGF : 3,07 : 3,61	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a/agl.=0,70</i> 10% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	6480,00	g
	Areia	22110,00	g
	EGF	660,00	g
	Água	4738,00	g
	Aditivo	0,00	g
	Slump =	6,0 cm	

Traço nº 23 (07)		1 : 2,28 : 2,91	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a/agl.=0,55</i> 0%	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	8930,00	g
	Areia	20390,00	g
	EGF	0,00	g
	Água	4480,00	g
	Aditivo	0,00	g
	Slump =	7,5 cm	

Traço nº 24 (08)		0,9 : 0,091 de EGF : 1,50 : 2,22	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a/agl.=0,40</i> 10%	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	10550,00	g
	Areia	17590,00	g
	EGF	1070,00	g
	Água	4472,00	g
	Aditivo	0,00	g
	Slump =	7,5 cm	

slump desejado = 8 (+/-1 cm)

PLANEJAMENTO MOLDAGENS - PROJETO EGF

BLOCO 3A - TERÇA - 19/03/2002 - manhã

H = 82 / 77 %

T = 28,4 / 28,9 °C

Traço nº 25 (06)		0,5 : 0,455 de EGF : 2,28 : 2,91		
Material:	Quant.:	Unid.:		
Brita	26000,00	g		
Cimento CP II-F	4460,00	g		
Areia	20390,00	g		
EGF	4090,00	g		
Água	4703,00	g		
Slump =		8,0 cm		

CP II - F
a agl. = 0,55
50% de EGF

Traço nº 26 (03)		0,9 : 0,091 de EGF : 2,28 : 2,91		
Material:	Quant.:	Unid.:		
Brita	26000,00	g		
Cimento CP II-F	8030,00	g		
Areia	20390,00	g		
EGF	820,00	g		
Água	4486,60	g		
Slump =		8,0 cm		

CP II - F
a agl. = 0,55
10% de EGF

Traço nº 27 (05)		0,7 : 0,273 de EGF : 3,07 : 3,61		
Material:	Quant.:	Unid.:		
Brita	26000,00	g		
Cimento CP II-F	5040,00	g		
Areia	22110,00	g		
EGF	1980,00	g		
Água	4796,40	g		
Slump =		9,5 cm		

CP II - F
a agl. = 0,70
30% de EGF

Traço nº 28 (01)		1 : 1,50 : 2,22		
Material:	Quant.:	Unid.:		
Brita	26000,00	g		
Cimento CP II-F	11730,00	g		
Areia	17590,00	g		
EGF	0,00	g		
Água	4691,00	g		
Aditivo	0,00	g		
Slump =		10,0 cm		

CP II - F
a agl. = 0,40
0%

Traço nº 29 (02)		1 : 3,07 : 3,61		
Material:	Quant.:	Unid.:		
Brita	26000,00	g		
Cimento CP II-F	7210,00	g		
Areia	22110,00	g		
EGF	0,00	g		
Água	4694,70	g		
Slump =		11,00 cm		

CP II - F
a agl. = 0,70
0%

Traço nº 30 (04)		0,7 : 0,273 de EGF : 1,50 : 2,22		
Material:	Quant.:	Unid.:		
Brita	26000,00	g		
Cimento CP II-F	8210,00	g		
Areia	17590,00	g		
EGF	3220,00	g		
Água	4560,80	g		
Aditivo	0,00	g		
Slump =		10,5 cm		

CP II - F
a agl. = 0,40
30% de EGF

slump desejado = 8 (+/-1 cm)

PLANEJAMENTO MOLDAGENS - PROJETO EGF

BLOCO 3B - QUINTA - 21/03/2002 - manhã

H = 73 / 74 %

T = 26,5 / 26,1 °C

Traço nº 31 (12)		0,5 : 0,455 de EGF : 3,07 : 3,61	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a agl.=0,70</i> 50% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	3600,00	g
	Areia	22110,00	g
	EGF	3300,00	g
	Água	4832,00	g
	Slump =		5,5 cm

Traço nº 32 (09)		0,9 : 0,091 de EGF : 3,07 : 3,61	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a agl.=0,70</i> 10% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	6480,00	g
	Areia	22110,00	g
	EGF	660,00	g
	Água	4738,00	g
	Slump =		7,5 cm

Traço nº 33 (11)		0,5 : 0,455 de EGF : 1,50 : 2,22	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a agl.=0,40</i> 50% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	5860,00	g
	Areia	17590,00	g
	EGF	5370,00	g
	Água	4316,00	g
	Aditivo	0,00	g
	Slump =		8,5 cm

Traço nº 34 (07)		1 : 2,28 : 2,91	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a agl.=0,55</i> 0%	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	8930,00	g
	Areia	20390,00	g
	EGF	0,00	g
	Água	4480,00	g
	Slump =		8,0 cm

Traço nº 35 (08)		0,9 : 0,091 de EGF : 1,50 : 2,22	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a agl.=0,40</i> 10%	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	10550,00	g
	Areia	17590,00	g
	EGF	1070,00	g
	Água	4472,00	g
	Aditivo	0,00	g
	Slump =		9,0 cm

Traço nº 36 (10)		0,7 : 0,273 de EGF : 2,28 : 2,91	
Material:	Quant.:	Unid.:	
CP II - F <i>a agl.=0,55</i> 30% de EGF	Brita	26000,00	g
	Cimento CP II-F	6250,00	g
	Areia	20390,00	g
	EGF	2450,00	g
	Água	4488,00	g
	Slump =		7,5 cm

slump desejado = 8 (+/-1 cm)

**ANEXO 12: RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA
MECÂNICA DOS CONCRETOS**

Rompimento dos Corpos-de-Prova

Datas		Idade (dias)	Bloco	Ensaio	Traço		Nº de CP's	Carga (kN)	(MPa)
Moldagem	Ruptura				Nº	Descrição			
05/03/2002	12/03/2002	7	1A	f_{c7} (9,5x19)cm	01	0% a/agl.=0,40	1	243,00	34,28
					02	0% a/agl.=0,651	1	95,50	13,47
					03	10% a/agl.=0,507	1	146,50	20,67
					04	30% a/agl.=0,399	1	134,50	18,98
					05	30% a/agl.=0,683	1	58,00	8,18
					06	50% a/agl.=0,55	1	57,00	8,04
				f_t'D₇ (9,5x19)cm	01	0% a/agl.=0,40	1	101,00	3,03
					02	0% a/agl.=0,651	1	58,50	1,75
					03	10% a/agl.=0,507	1	74,50	2,23
					04	30% a/agl.=0,399	1	68,50	2,05
					05	30% a/agl.=0,683	1	37,00	1,11
					06	50% a/agl.=0,55	1	27,50	0,82
				f_t'F₇ (10x10x35)cm	01	0% a/agl.=0,40	1	13,50	4,05
					02	0% a/agl.=0,651	1	7,50	2,25
					03	10% a/agl.=0,507	1	9,50	2,85
					04	30% a/agl.=0,399	1	13,00	3,90
					05	30% a/agl.=0,683	1	-	-
					06	50% a/agl.=0,55	1	6,00	1,80

Rompimento dos Corpos-de-Prova

<i>Datas</i>		<i>Idade</i> (dias)	<i>Bloco</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Traço</i>		<i>Nº de</i> <i>CP's</i>	<i>Carga</i> (kN)	<i>(MPa)</i>
<i>Moldagem</i>	<i>Ruptura</i>				<i>Nº</i>	<i>Descrição</i>			
07/03/2002	14/03/2002	7	1B	f_{c7} (9,5x19)cm	07	0% a/agl.=0,502	1	175,50	24,76
					08	10% a/agl.=0,385	1	237,00	33,44
					09	10% a/agl.=0,664	1	89,00	12,56
					10	30% a/agl.=0,516	1	111,00	15,66
					11	50% a/agl.=0,384	1	110,00	15,52
					12	50% a/agl.=0,70	1	31,50	4,44
				f_tD₇ (9,5x19)cm	07	0% a/agl.=0,502	1	80,50	2,41
					08	10% a/agl.=0,385	1	104,00	3,12
					09	10% a/agl.=0,664	1	48,50	1,45
					10	30% a/agl.=0,516	1	43,50	1,30
					11	50% a/agl.=0,384	1	50,00	1,50
					12	50% a/agl.=0,70	1	16,00	0,48
				f_tF₇ (10x10x35)cm	07	0% a/agl.=0,502	1	12,25	3,68
					08	10% a/agl.=0,385	1	13,35	4,01
					09	10% a/agl.=0,664	1	7,65	2,30
					10	30% a/agl.=0,516	1	9,90	2,97
					11	50% a/agl.=0,384	1	8,40	2,52
					12	50% a/agl.=0,70	1	4,10	1,23

Rompimento dos Corpos-de-Prova

Datas		Idade (dias)	Bloco	Ensaio	Traço		Nº de CP's	Carga (kN)	(MPa)
Moldagem	Ruptura				Nº	Descrição			
14/03/2002	21/03/2002	7	2B	fc₇ (9,5x19)cm	19	50% a/agl.=0,384	1	104,50	14,74
					20	50% a/agl.=0,70	1	37,00	5,22
					21	30% a/agl.=0,516	1	84,00	11,85
					22	10% a/agl.=0,664	1	78,00	11,00
					23	0% a/agl.=0,502	1	154,00	21,73
					24	10% a/agl.=0,385	1	219,00	30,90
				ft'D₇ (9,5x19)cm	19	50% a/agl.=0,384	1	47,50	1,42
					20	50% a/agl.=0,70	1	17,50	0,52
					21	30% a/agl.=0,516	1	41,00	1,23
					22	10% a/agl.=0,664	1	40,50	1,21
					23	0% a/agl.=0,502	1	65,50	1,96
					24	10% a/agl.=0,385	1	100,50	3,01
				ft'F₇ (10x10x35)cm	19	50% a/agl.=0,384	1	9,85	2,96
					20	50% a/agl.=0,70	1	3,55	1,07
					21	30% a/agl.=0,516	1	9,55	2,87
					22	10% a/agl.=0,664	1	7,70	2,31
					23	0% a/agl.=0,502	1	10,00	3,00
					24	10% a/agl.=0,385	1	13,20	3,96

Rompimento dos Corpos-de-Prova

Datas		Idade (dias)	Bloco	Ensaio	Traço		Nº de CP's	Carga (kN)	(MPa)
Moldagem	Ruptura				Nº	Descrição			
19/03/2002	26/03/2002	7	3A	fc₇ (9,5x19)cm	25	50% a/agl.=0,55	1	52,00	7,34
					26	10% a/agl.=0,507	1	133,00	18,76
					27	30% a/agl.=0,683	1	53,00	7,48
					28	0% a/agl.=0,40	1	225,00	31,74
					29	0% a/agl.=0,651	1	93,50	13,19
					30	30% a/agl.=0,399	1	163,00	23,00
				ft'D₇ (9,5x19)cm	25	50% a/agl.=0,55	1	26,50	0,79
					26	10% a/agl.=0,507	1	52,50	1,57
					27	30% a/agl.=0,683	1	30,00	0,90
					28	0% a/agl.=0,40	1	83,00	2,49
					29	0% a/agl.=0,651	1	41,00	1,23
					30	30% a/agl.=0,399	1	65,02	1,95
				ft'F₇ (10x10x35)cm	25	50% a/agl.=0,55	1	6,00	1,80
					26	10% a/agl.=0,507	1	10,95	3,29
					27	30% a/agl.=0,683	1	6,05	1,82
					28	0% a/agl.=0,40	1	15,60	4,68
					29	0% a/agl.=0,651	1	7,60	2,28
					30	30% a/agl.=0,399	1	12,45	3,74

Rompimento dos Corpos-de-Prova

<i>Datas</i>		<i>Idade</i> (dias)	<i>Bloco</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Traço</i>		<i>Nº de</i> <i>CP's</i>	<i>Carga</i> (kN)	<i>(MPa)</i>
<i>Moldagem</i>	<i>Ruptura</i>				<i>Nº</i>	<i>Descrição</i>			
21/03/2002	28/03/2002	7	3B	f_{c7} (9,5x19)cm	31	50% a/agl.=0,70	1	28,00	3,95
					32	10% a/agl.=0,664	1	69,00	9,73
					33	50% a/agl.=0,384	1	106,00	14,95
					34	0% a/agl.=0,502	1	172,00	24,27
					35	10% a/agl.=0,385	1	228,50	32,24
					36	30% a/agl.=0,516	1	100,00	14,11
				f_tD₇ (9,5x19)cm	31	50% a/agl.=0,70	1	15,00	0,45
					32	10% a/agl.=0,664	1	39,50	1,18
					33	50% a/agl.=0,384	1	59,00	1,77
					34	0% a/agl.=0,502	1	85,00	2,55
					35	10% a/agl.=0,385	1	95,50	2,86
					36	30% a/agl.=0,516	1	47,50	1,42
				f_tF₇ (10x10x35)cm	31	50% a/agl.=0,70	1	3,15	0,95
					32	10% a/agl.=0,664	1	7,90	2,37
					33	50% a/agl.=0,384	1	8,30	2,49
					34	0% a/agl.=0,502	1	12,05	3,62
					35	10% a/agl.=0,385	1	13,55	4,07
					36	30% a/agl.=0,516	1	9,45	2,84

Rompimento dos Corpos-de-Prova

Datas		Idade (dias)	Bloco	Ensaio	Traço		Nº de CP's	Carga (kN)	(MPa)
Moldagem	Ruptura				Nº	Descrição			
26/03/2002	02/04/2002	7	2A	f_{c7} (9,5x19)cm	13	30% a/agl.=0,683	1	55,50	7,83
					14	50% a/agl.=0,55	1	45,50	6,42
					15	30% a/agl.=0,399	1	145,00	20,46
					16	10% a/agl.=0,507	1	123,00	17,35
					17	0% a/agl.=0,40	1	175,00	24,69
					18	0% a/agl.=0,651	1	83,50	11,78
				f_tD₇ (9,5x19)cm	13	30% a/agl.=0,683	1	22,50	0,67
					14	50% a/agl.=0,55	1	23,50	0,70
					15	30% a/agl.=0,399	1	56,00	1,68
					16	10% a/agl.=0,507	1	55,50	1,66
					17	0% a/agl.=0,40	1	85,50	2,56
					18	0% a/agl.=0,651	1	47,50	1,42
				f_tF₇ (10x10x35)cm	13	30% a/agl.=0,683	1	4,50	1,35
					14	50% a/agl.=0,55	1	6,85	2,06
					15	30% a/agl.=0,399	1	10,65	3,20
					16	10% a/agl.=0,507	1	10,30	3,09
					17	0% a/agl.=0,40	1	12,40	3,72
					18	0% a/agl.=0,651	1	8,15	2,45

Rompimento dos Corpos-de-Prova

Datas		Idade (dias)	Bloco	Ensaio	Traço		Nº de CP's	Carga (kN)	(MPa)
Moldagem	Ruptura				Nº	Descrição			
05/03/2002	02/04/2002	28	1A	fc₂₈ (9,5x19)cm	01	0% a/agl.=0,40	1	279,00	39,36
					02	0% a/agl.=0,651	1	170,00	23,98
					03	10% a/agl.=0,507	1	213,00	30,05
					04	30% a/agl.=0,399	1	200,00	28,22
					05	30% a/agl.=0,683	1	85,50	12,06
					06	50% a/agl.=0,55	1	87,50	12,34
				ft'D₂₈ (9,5x19)cm	01	0% a/agl.=0,40	1	75,00	2,25
					02	0% a/agl.=0,651	1	63,50	1,90
					03	10% a/agl.=0,507	1	102,50	3,07
					04	30% a/agl.=0,399	1	74,50	2,23
					05	30% a/agl.=0,683	1	34,00	1,02
					06	50% a/agl.=0,55	1	45,00	1,35
				ft'F₂₈ (10x10x35)cm	01	0% a/agl.=0,40	1	16,70	5,01
					02	0% a/agl.=0,651	1	9,60	2,88
					03	10% a/agl.=0,507	1	14,40	4,32
					04	30% a/agl.=0,399	1	16,25	4,88
					05	30% a/agl.=0,683	1	9,55	2,87
					06	50% a/agl.=0,55	1	9,10	2,73

Rompimento dos Corpos-de-Prova

Datas		Idade (dias)	Bloco	Ensaio	Traço		Nº de CP's	Carga (kN)	(MPa)
Moldagem	Ruptura				Nº	Descrição			
07/03/2002	04/04/2002	28	1B	fc₂₈ (9,5x19)cm	07	0% a/agl.=0,502	1	233,00	32,87
					08	10% a/agl.=0,385	1	231,00	32,59
					09	10% a/agl.=0,664	1	109,50	15,45
					10	30% a/agl.=0,516	1	146,50	20,67
					11	50% a/agl.=0,384	1	151,00	21,30
					12	50% a/agl.=0,70	1	59,00	8,32
				ft'D₂₈ (9,5x19)cm	07	0% a/agl.=0,502	1	88,50	2,65
					08	10% a/agl.=0,385	1	103,00	3,09
					09	10% a/agl.=0,664	1	49,00	1,47
					10	30% a/agl.=0,516	1	55,50	1,66
					11	50% a/agl.=0,384	1	81,00	2,43
					12	50% a/agl.=0,70	1	26,50	0,79
				ft'F₂₈ (10x10x35)cm	07	0% a/agl.=0,502	1	15,70	4,71
					08	10% a/agl.=0,385	1	16,10	4,83
					09	10% a/agl.=0,664	1	8,50	2,55
					10	30% a/agl.=0,516	1	12,15	3,65
					11	50% a/agl.=0,384	1	12,70	3,81
					12	50% a/agl.=0,70	1	6,15	1,85

Rompimento dos Corpos-de-Prova

Datas		Idade (dias)	Bloco	Ensaio	Traço		Nº de CP's	Carga (kN)	(MPa)
Moldagem	Ruptura				Nº	Descrição			
14/03/2002	11/04/2002	28	2B	fc₂₈ (9,5x19)cm	19	50% a/agl.=0,384	1	142,00	20,03
					20	50% a/agl.=0,70	1	51,50	7,27
					21	30% a/agl.=0,516	1	131,00	18,48
					22	10% a/agl.=0,664	1	104,50	14,74
					23	0% a/agl.=0,502	1	186,50	26,31
					24	10% a/agl.=0,385	1	270,00	38,09
				ft'D₂₈ (9,5x19)cm	19	50% a/agl.=0,384	1	74,00	2,22
					20	50% a/agl.=0,70	1	30,50	0,91
					21	30% a/agl.=0,516	1	66,00	1,98
					22	10% a/agl.=0,664	1	42,00	1,26
					23	0% a/agl.=0,502	1	81,00	2,43
					24	10% a/agl.=0,385	1	101,50	3,04
				ft'F₂₈ (10x10x35)cm	19	50% a/agl.=0,384	1	14,60	4,38
					20	50% a/agl.=0,70	1	5,40	1,62
					21	30% a/agl.=0,516	1	10,70	3,21
					22	10% a/agl.=0,664	1	8,65	2,60
					23	0% a/agl.=0,502	1	11,65	3,50
					24	10% a/agl.=0,385	1	14,65	4,40

Rompimento dos Corpos-de-Prova

<i>Datas</i>		<i>Idade (dias)</i>	<i>Bloco</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Traço</i>		<i>Nº de CP's</i>	<i>Carga (kN)</i>	<i>(MPa)</i>
<i>Moldagem</i>	<i>Ruptura</i>				<i>Nº</i>	<i>Descrição</i>			
19/03/2002	16/04/2002	28	3A	fc₂₈ (9,5x19)cm	25	50% a/agl=0,55	1	92,50	13,05
					26	10% a/agl=0,507	1	174,50	24,62
					27	30% a/agl=0,683	1	82,50	11,64
					28	0% a/agl=0,40	1	276,00	38,94
					29	0% a/agl=0,651	1	126,00	17,78
					30	30% a/agl=0,399	1	209,00	29,49
				ft'D₂₈ (9,5x19)cm	25	50% a/agl=0,55	1	28,50	0,85
					26	10% a/agl=0,507	1	77,50	2,32
					27	30% a/agl=0,683	1	39,00	1,17
					28	0% a/agl=0,40	1	117,50	3,52
					29	0% a/agl=0,651	1	72,50	2,17
					30	30% a/agl=0,399	1	88,00	2,64
				ft'F₂₈ (10x10x35)cm	25	50% a/agl=0,55	1	8,90	2,67
					26	10% a/agl=0,507	1	13,20	3,96
					27	30% a/agl=0,683	1	6,95	2,09
					28	0% a/agl=0,40	1	15,50	4,65
					29	0% a/agl=0,651	1	9,80	2,94
					30	30% a/agl=0,399	1	14,65	4,40

Rompimento dos Corpos-de-Prova

<i>Datas</i>		<i>Idade</i> (dias)	<i>Bloco</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Traço</i>		<i>Nº de</i> <i>CP's</i>	<i>Carga</i> (kN)	<i>(MPa)</i>
<i>Moldagem</i>	<i>Ruptura</i>				<i>Nº</i>	<i>Descrição</i>			
21/03/2002	18/04/2002	28	3B	fc₂₈ (9,5x19)cm	31	50% a/agl.=0,70	1	53,00	7,48
					32	10% a/agl.=0,664	1	112,00	15,80
					33	50% a/agl.=0,384	1	171,00	24,12
					34	0% a/agl.=0,502	1	203,50	28,71
					35	10% a/agl.=0,385	1	288,50	40,70
					36	30% a/agl.=0,516	1	128,00	18,06
				ft'D₂₈ (9,5x19)cm	31	50% a/agl.=0,70	1	30,00	0,90
					32	10% a/agl.=0,664	1	47,00	1,41
					33	50% a/agl.=0,384	1	76,50	2,29
					34	0% a/agl.=0,502	1	40,50	1,21
					35	10% a/agl.=0,385	1	115,50	3,46
					36	30% a/agl.=0,516	1	51,00	1,53
				ft'F₂₈ (10x10x35)cm	31	50% a/agl.=0,70	1	7,05	2,12
					32	10% a/agl.=0,664	1	10,85	3,26
					33	50% a/agl.=0,384	1	13,85	4,16
					34	0% a/agl.=0,502	1	13,00	3,90
					35	10% a/agl.=0,385	1	18,25	5,48
					36	30% a/agl.=0,516	1	12,50	3,75

Rompimento dos Corpos-de-Prova

Datas		Idade (dias)	Bloco	Ensaio	Traço		Nº de CP's	Carga (kN)	(MPa)
Moldagem	Ruptura				Nº	Descrição			
26/03/2002	23/04/2002	28	2A	fc₂₈ (9,5x19)cm	13	30% a/agl.=0,683	1	77,50	10,93
					14	50% a/agl.=0,55	1	89,00	12,56
					15	30% a/agl.=0,399	1	205,00	28,92
					16	10% a/agl.=0,507	1	156,50	22,08
					17	0% a/agl.=0,40	1	240,50	33,93
					18	0% a/agl.=0,651	1	106,00	14,95
				ft'D₂₈ (9,5x19)cm	13	30% a/agl.=0,683	1	47,00	1,41
					14	50% a/agl.=0,55	1	31,50	0,94
					15	30% a/agl.=0,399	1	64,50	1,93
					16	10% a/agl.=0,507	1	81,00	2,43
					17	0% a/agl.=0,40	1	68,50	2,05
					18	0% a/agl.=0,651	1	48,50	1,45
				ft'F₂₈ (10x10x35)cm	13	30% a/agl.=0,683	1	9,75	2,93
					14	50% a/agl.=0,55	1	6,85	2,06
					15	30% a/agl.=0,399	1	14,15	4,25
					16	10% a/agl.=0,507	1	10,85	3,26
					17	0% a/agl.=0,40	1	15,45	4,64
					18	0% a/agl.=0,651	1	9,25	2,78

Rompimento dos Corpos-de-Prova

Datas		Idade (dias)	Bloco	Ensaio	Traço		Nº de CP's	Carga (kN)	(MPa)
Moldagem	Ruptura				Nº	Descrição			
05/03/2002	04/06/2002	91	1A	f_{C91} (9,5x19)cm	01	0% a/agl.=0,40	1	272,00	38,37
					02	0% a/agl.=0,651	1	149,00	21,02
					03	10% a/agl.=0,507	1	216,00	30,47
					04	30% a/agl.=0,399	1	251,50	35,48
					05	30% a/agl.=0,683	1	113,50	16,01
					06	50% a/agl.=0,55	1	123,50	17,42
				f_tD₉₁ (9,5x19)cm	01		1	102,50	3,07
					02	0% a/agl.=0,651	1	81,00	2,43
					03	10% a/agl.=0,507	1	106,50	3,19
					04	30% a/agl.=0,399	1	90,00	2,70
					05	30% a/agl.=0,683	1	53,50	1,60
					06	50% a/agl.=0,55	1	55,00	1,65
				f_tF₉₁ (10x10x35)cm	01	0% a/agl.=0,40	1	16,75	5,03
					02	0% a/agl.=0,651	1	10,10	3,03
					03	10% a/agl.=0,507	1	12,15	3,65
					04	30% a/agl.=0,399	1	17,65	5,30
					05	30% a/agl.=0,683	1	11,30	3,39
					06	50% a/agl.=0,55	1	11,40	3,42

Rompimento dos Corpos-de-Prova

<i>Datas</i>		<i>Idade (dias)</i>	<i>Bloco</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Traço</i>		<i>Nº de CP's</i>	<i>Carga (kN)</i>	<i>(MPa)</i>
<i>Moldagem</i>	<i>Ruptura</i>				<i>Nº</i>	<i>Descrição</i>			
07/03/2002	06/06/2002	91	1B	fc₉₁ (9,5x19)cm	07	0% a/agl.=0,502	1	222,00	31,32
					08	10% a/agl.=0,385	1	354,00	49,94
					09	10% a/agl.=0,664	1	137,50	19,40
					10	30% a/agl.=0,516	1	184,50	26,03
					11	50% a/agl.=0,384	1	203,00	28,64
					12	50% a/agl.=0,70	1	74,00	10,44
				ft'D₉₁ (9,5x19)cm	07	0% a/agl.=0,502	1	95,00	2,85
					08	10% a/agl.=0,385	1	103,50	3,10
					09	10% a/agl.=0,664	1	78,00	2,34
					10	30% a/agl.=0,516	1	71,00	2,13
					11	50% a/agl.=0,384	1	96,00	2,88
					12	50% a/agl.=0,70	1	40,50	1,21
				ft'F₉₁ (10x10x35)cm	07	0% a/agl.=0,502	1	13,65	4,10
					08	10% a/agl.=0,385	1	16,15	4,85
					09	10% a/agl.=0,664	1	8,60	2,58
					10	30% a/agl.=0,516	1	12,90	3,87
					11	50% a/agl.=0,384	1	14,40	4,32
					12	50% a/agl.=0,70	1	6,45	1,94

Rompimento dos Corpos-de-Prova

Datas		Idade (dias)	Bloco	Ensaio	Traço		Nº de CP's	Carga (kN)	(MPa)
Moldagem	Ruptura				Nº	Descrição			
14/03/2002	13/06/2002	91	2B	fc₉₁ (9,5x19)cm	19	50% a/agl.=0,384	1	186,50	26,31
					20	50% a/agl.=0,70	1	83,00	11,71
					21	30% a/agl.=0,516	1	155,00	21,87
					22	10% a/agl.=0,664	1	138,00	19,47
					23	0% a/agl.=0,502	1	158,00	22,29
					24	10% a/agl.=0,385	1	268,50	37,88
				ft'D₉₁ (9,5x19)cm	19	50% a/agl.=0,384	1	100,00	3,00
					20	50% a/agl.=0,70	1	39,00	1,17
					21	30% a/agl.=0,516	1	68,50	2,05
					22	10% a/agl.=0,664	1	71,50	2,14
					23	0% a/agl.=0,502	1	92,50	2,77
					24	10% a/agl.=0,385	1	106,50	3,19
				ft'F₉₁ (10x10x35)cm	19	50% a/agl.=0,384	1	15,00	4,50
					20	50% a/agl.=0,70	1	6,20	1,86
					21	30% a/agl.=0,516	1	9,35	2,81
					22	10% a/agl.=0,664	1	7,80	2,34
					23	0% a/agl.=0,502	1	10,65	3,20
					24	10% a/agl.=0,385	1	16,60	4,98

Rompimento dos Corpos-de-Prova

<i>Datas</i>		<i>Idade (dias)</i>	<i>Bloco</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Traço</i>		<i>Nº de CP's</i>	<i>Carga (kN)</i>	<i>(MPa)</i>
<i>Moldagem</i>	<i>Ruptura</i>				<i>Nº</i>	<i>Descrição</i>			
19/03/2002	18/06/2002	91	3A	fc₉₁ (9,5x19)cm	25	50% a/agl.=0,55	1	116,50	16,44
					26	10% a/agl.=0,507	1	190,50	26,88
					27	30% a/agl.=0,683	1	107,50	15,17
					28	0% a/agl.=0,40	1	348,50	49,17
					29	0% a/agl.=0,651	1	155,00	21,87
					30	30% a/agl.=0,399	1	252,50	35,62
				ft'D₉₁ (9,5x19)cm	25	50% a/agl.=0,55	1	65,50	1,96
					26	10% a/agl.=0,507	1	67,50	2,02
					27	30% a/agl.=0,683	1	51,00	1,53
					28	0% a/agl.=0,40	1	126,50	3,79
					29	0% a/agl.=0,651	1	64,50	1,93
					30	30% a/agl.=0,399	1	94,50	2,83
				ft'F₉₁ (10x10x35)cm	25	50% a/agl.=0,55	1	9,35	2,81
					26	10% a/agl.=0,507	1	14,15	4,25
					27	30% a/agl.=0,683	1	9,85	2,96
					28	0% a/agl.=0,40	1	18,10	5,43
					29	0% a/agl.=0,651	1	11,30	3,39
					30	30% a/agl.=0,399	1	15,40	4,62

Rompimento dos Corpos-de-Prova

Datas		Idade (dias)	Bloco	Ensaio	Traço		Nº de CP's	Carga (kN)	(MPa)
Moldagem	Ruptura				Nº	Descrição			
21/03/2002	20/06/2002	91	3B	fc ₉₁ (9,5x19)cm	31	50% a/agl.=0,70	1	72,00	10,16
					32	10% a/agl.=0,664	1	136,00	19,19
					33	50% a/agl.=0,384	1	207,00	29,20
					34	0% a/agl.=0,502	1	244,00	34,42
					35	10% a/agl.=0,385	1	346,00	48,81
					36	30% a/agl.=0,516	1	152,00	21,44
				ft'D ₉₁ (9,5x19)cm	31	50% a/agl.=0,70	1	36,50	1,09
					32	10% a/agl.=0,664	1	55,00	1,65
					33	50% a/agl.=0,384	1	102,00	3,06
					34	0% a/agl.=0,502	1	93,50	2,80
					35	10% a/agl.=0,385	1	102,00	3,06
					36	30% a/agl.=0,516	1	78,00	2,34
				ft'F ₉₁ (10x10x35)cm	31	50% a/agl.=0,70	1	8,15	2,45
					32	10% a/agl.=0,664	1	9,30	2,79
					33	50% a/agl.=0,384	1	14,75	4,43
					34	0% a/agl.=0,502	1	12,80	3,84
					35	10% a/agl.=0,385	1	19,65	5,90
					36	30% a/agl.=0,516	1	13,90	4,17

Rompimento dos Corpos-de-Prova

Datas		Idade (dias)	Bloco	Ensaio	Traço		Nº de CP's	Carga (kN)	(MPa)
Moldagem	Ruptura				Nº	Descrição			
26/03/2002	25/06/2002	91	2A	f _c 91 (9,5x19)cm	13	30% a/agl.=0,683	1	120,00	16,93
					14	50% a/agl.=0,55	1	115,50	16,29
					15	30% a/agl.=0,399	1	218,00	30,76
					16	10% a/agl.=0,507	1	193,50	27,30
					17	0% a/agl.=0,40	1	242,00	34,14
					18	0% a/agl.=0,651	1	117,00	16,51
				f _t 'D ₉₁ (9,5x19)cm	13	30% a/agl.=0,683	1	58,00	1,74
					14	50% a/agl.=0,55	1	43,00	1,29
					15	30% a/agl.=0,399	1	78,00	2,34
					16	10% a/agl.=0,507	1	90,50	2,71
					17	0% a/agl.=0,40	1	92,00	2,76
					18	0% a/agl.=0,651	1	55,00	1,65
				f _t 'F ₉₁ (10x10x35)cm	13	30% a/agl.=0,683	1	10,50	3,15
					14	50% a/agl.=0,55	1	9,05	2,72
					15	30% a/agl.=0,399	1	15,40	4,62
					16	10% a/agl.=0,507	1	11,50	3,45
					17	0% a/agl.=0,40	1	14,80	4,44
					18	0% a/agl.=0,651	1	9,60	2,88

**ANEXO 13: RESUMO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO LINEAR
MÚLTIPLA, REALIZADA PARA OBTENÇÃO DO MODELO DE f_c**

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: FC

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-215,576	42,2421	-5,10335	0,0000
1/AC ^{1,2}	-25,3684	6,08615	-4,16823	0,0001
1/TE ^{0,1}	224,691	46,0976	4,87424	0,0000
1/ID ³	-0,820909	0,14814	-5,54145	0,0000
1/(AC+TE)	30,1479	5,20482	5,79231	0,0000
ID ^{0,1} /AC	40,5266	7,89852	5,13091	0,0000
ID ^{0,1} /TE	-17,1615	3,64178	-4,71239	0,0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	10584,0	6	1764,0	237,67	0,0000
Residual	742,216	100	7,42216		
Total (Corr.)	11326,2	106			

R-squared = 93,4469 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 93,0537 percent
Standard Error of Est. = 2,72436
Mean absolute error = 1,87324
Durbin-Watson statistic = 2,6593

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between FC and 6 independent variables. The equation of the fitted model is

$$FC = -215,576 - 25,3684 \cdot 1/AC^{1,2} + 224,691 \cdot 1/TE^{0,1} - 0,820909 \cdot 1/ID^3 + 30,1479 \cdot 1/(AC+TE) + 40,5266 \cdot ID^{0,1}/AC - 17,1615 \cdot ID^{0,1}/TE$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 93,4469% of the variability in FC. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 93,0537%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 2,72436. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 1,87324 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is greater than 1.4, there is probably not any serious autocorrelation in the residuals.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,0001, belonging to 1/AC^{1,2}. Since the P-value is less than 0.01, the highest order term is statistically significant at the 99% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

**ANEXO 14: RESUMO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO LINEAR
MÚLTIPLA, REALIZADA PARA OBTENÇÃO DO MODELO DE $f^{\sim}D$**

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: FD

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-34,506	10,03	-3,44027	0,0008
1/AC^5	0,01612	0,00460548	3,50018	0,0007
1/TE^0,1	10,4931	5,18531	2,02361	0,0457
ID^0,1	23,7707	7,66843	3,09981	0,0025
1/(AC+TE)^0,3	9,54919	1,30025	7,34414	0,0000
(ID^0,3)/(TE^0,2)	-5,63454	2,51782	-2,23787	0,0274
(ID^0,1)/(AC*TE)^	-0,0172324	0,00424275	-4,06161	0,0001

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	56,1105	6	9,35176	94,38	0,0000
Residual	9,90886	100	0,0990886		
Total (Corr.)	66,0194	106			

R-squared = 84,991 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 84,0904 percent
Standard Error of Est. = 0,314783
Mean absolute error = 0,229113
Durbin-Watson statistic = 2,07239

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between FD and 6 independent variables. The equation of the fitted model is

$$FD = -34,506 + 0,01612 \cdot 1/AC^5 + 10,4931 \cdot 1/TE^{0,1} + 23,7707 \cdot ID^{0,1} + 9,54919 \cdot 1/(AC+TE)^{0,3} - 5,63454 \cdot (ID^{0,3})/(TE^{0,2}) - 0,0172324 \cdot (ID^{0,1})/(AC \cdot TE)^3$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 84,991% of the variability in FD. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 84,0904%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,314783. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0,229113 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is greater than 1.4, there is probably not any serious autocorrelation in the residuals.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,0457, belonging to $1/TE^{0,1}$. Since the P-value is less than 0.05, that term is statistically significant at the 95% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

**ANEXO 15: RESUMO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO LINEAR
MÚLTIPLA, REALIZADA PARA OBTENÇÃO DO MODELO DE $f\hat{t}^F$**

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: FF

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	85,751	25,4551	3,36871	0,0011
(1/(AC^0,1))	21,6992	0,96694	22,4411	0,0000
(1/(TE^0,1))	-49,4963	12,6246	-3,92061	0,0002
(ID^3)	-0,997984	0,247625	-4,03022	0,0001
((TE^5)/(AC^0,4))	-0,0713845	0,0194859	-3,6634	0,0004
((AC^0,2)/(ID^3))	0,216881	0,0872456	2,48587	0,0147
((TE/ID)^0,1)	-53,0664	13,0971	-4,05176	0,0001

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	107,006	6	17,8343	159,35	0,0000
Residual	10,7441	96	0,111917		
Total (Corr.)	117,75	102			

R-squared = 90,8755 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 90,3052 percent
Standard Error of Est. = 0,334541
Mean absolute error = 0,269549
Durbin-Watson statistic = 2,32626

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between FF and 6 independent variables. The equation of the fitted model is

$$FF = 85,751 + 21,6992 \cdot (1/(AC^{0,1})) - 49,4963 \cdot (1/(TE^{0,1})) - 0,997984 \cdot (ID^3) - 0,0713845 \cdot ((TE^5)/(AC^{0,4})) + 0,216881 \cdot ((AC^{0,2})/(ID^3)) - 53,0664 \cdot ((TE/ID)^{0,1})$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 90,8755% of the variability in FF. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 90,3052%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,334541. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0,269549 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is greater than 1.4, there is probably not any serious autocorrelation in the residuals.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,0147, belonging to $((AC^{0,2})/(ID^3))$. Since the P-value is less than 0.05, that term is statistically significant at the 95% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.