

**Utilização de Escória Granulada de Fundação (EGF)  
em Blocos de Concreto para Pavimentação**

**Daniel Tregnago Pagnussat**

Porto Alegre  
junho 2004



**Daniel Tregnago Pagnussat**

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA GRANULADA DE FUNDIÇÃO  
EM BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO**

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

Porto Alegre  
junho 2004

P139u	Pagnussat, Daniel Tregnago Utilização de escória granulada de fundição em blocos de concreto para pavimentação / Daniel Tregnago Pagnussat. – 2004.  Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2004.  Orientadora : Prof <sup>a</sup> . Dr. <sup>a</sup> Angela Borges Masuero Co-Orientador : Prof. Dr. Antonio Cezar Faria Vilela  1. Pavimentação. 2. Blocos de concreto. 3. Escória de fundição – Reciclagem . I. Masuero, Angela Borges, orient. II. Vilela, Antonio Cezar Faria, co-orient. III. Título.  CDU-691.002.8(043)
-------	--

**DANIEL TREGNAGO PAGNUSSAT**

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA GRANULADA DE FUNDIÇÃO  
EM BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO**

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

Porto Alegre, 18 de junho de 2004

Profa. Angela Borges Masuero  
Dra. pela UFRGS  
orientadora

Prof. Antonio Cezar Faria Vilela  
Dr. Ing pela Aachen University of  
Technology, Alemanha  
co-orientador

Prof. Américo Campos Filho  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Washington Almeida Moura (UEFS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul(UFRGS)

**Prof. Luiz Roberto Prudêncio Jr (UFSC)**  
Dr. pela Universidade de São Paulo (EPUSP)

**Prof. Ruy Alberto Cremonini (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade de São Paulo (EPUSP)

*Aos meus pais, Ampélio e Vera,  
e meu irmão Eduardo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Lendo a página de agradecimentos de diversas dissertações e teses, não raro percebo as pessoas reconhecerem serem estas as páginas mais difíceis de serem escritas. Pois eu penso exatamente o contrário. Este momento é de alegria, redenção... do reconhecimento indispensável e inequívoco.

Uma frase atribuída à Aristóteles diz que “a grandeza não consiste em receber honras, mas em merecê-las.” Dedico este trabalho a todos aqueles que merecidamente fizeram e fazem parte desta minha caminhada.

A Deus, acima de tudo, e à minha família. Sem eles nada seria possível.

À grande responsável por esta etapa da minha vida. À minha orientadora e amiga Angela Borges Masuero, por quem guardo uma admiração e respeito sem limites. Nossa convivência ao longo dos anos só tem contribuído para que eu me torne, cada dia mais, um engenheiro e sobretudo um ser humano melhor. Muito obrigado por tudo.

Ao Professor Antônio Cezar Vilela, pela co-orientação deste trabalho.

Ao professor e amigo Washington Moura, da UEFS, que juntamente com a professora Angela desenvolveu meu gosto pela pesquisa acadêmica. Valeu, doctor!

Ao professor e amigo Ruy Cremonini, pela consideração – duvido que exista alguém que tenha sido seu aluno e não o admire.

À professora Denise Dal Molin, pela amizade e sobretudo pela competência e serenidade com que conduz o grupo de materiais.

Ao todos os demais professores, que sem exceção contribuíram sobremaneira para minha formação e minha admiração pela instituição NORIE. Obrigado Bonin, Formoso, Isatto, Carin, Sattler.

À Adriana Gumieri, de quem fui bolsista de iniciação científica, pela confiança que sempre depositou em mim.

*“Quem caminha sozinho pode até chegar mais rápido, mas quem caminha acompanhado certamente vai mais longe”* – Aos meus amigos que, acompanhando-me, me fizeram ir muito mais longe.

Ao meus grandes amigos Cristóvão Cordeiro, Tiago Marder e à Aline Barroso, pela amizade e cumplicidade. Valeram as “discussões dos problemas do mundo”, as histórias que ficaram e ficarão para contar. Obrigado pela convivência nestes últimos anos, quando conseguimos compartilhar as alegrias e as incertezas do trabalho (e da vida, nós bem sabemos). Vocês foram e são essenciais.

Às minhas companheiras de créditos e materiais, Natália Posser e Cristiane Pauletti, e minha sempre querida Geilma Vieira, por toda amizade e consideração. Vocês são especiais, conviver com vocês é muito bom!

Ao Grupo de Materiais do NORIE: Alexandre Vargas, Ana Paula Kirchheim, Marlova Kulakowski, Paulo Sérgio Souza ( demais membros da confraria das 17:30 – “Fecha a porta...”), Aguida Abreu, Bernardo Tutikian, Edna Possan, Elaine Moreira, Fernanda Costa, Diana Ceccatto, Juliana Reschke, Ludmila Mattos, Lucília Bernardino, Sandro Mendes, Simone Venquiaruto.

Ao Aldo Boggio, sem o qual este trabalho não teria se viabilizado. Obrigado pelo suporte na dosagem dos blocos, e no apoio às questões do laboratório.

À todos os colegas do NORIE, do presente e do passado: Daniel Pinho e Fernanda Leite, estimados amigos, César Mello, Henrique Coelho (O quarto elemento), Renato Neves, Fabrício Cambraia, Morello (meu sócio no ramo de “manutenção” em informática...), Fábio Schraam, Manuel Barreras (“Me voy”), Vladimir Stello, Gustavo Oliveira, Dayana Bastos, Ricardo Codinhoto, Andrea Kern, Lu Miron, Denise Pithan, Marcelo Azambuja, Karina Barth, Mônica Leite, Valéria Pereira, Patrícia Pedroso, Thaís Alves, Antônio Eduardo Cabral, Roberto Santos, Maurício Mancio, Anelise Hoffman, Gustavo Schettert, Guilherme Lovato, Alexandre Salani.

Aos meus amigos de faculdade, pelas vezes (e foram muitas) que não pude estar presente nestes últimos dois anos, mas que, ao seu modo, sempre acreditaram e incentivaram meu mestrado: Gustavo Pibernat, Fernando Silveira, Marcel Lieban, Eduardo Masiero, André Bicca e Ricardo Locatteli, dentre outros.

Às integrantes do reduto nordestino, Mara, Carla e Raquel, que tanto acolheu gaúchos, mineiros, baianos...em especial à Mara, pela amizade e pelo auxílio fundamental na revisão deste trabalho.

Aos amigos do LOPP, Leandro Gabrieli e Gustavo Meneses.

Aos amigos do PPGEM, amizade construída desde os tempos do Projeto Escória – Gerdau Riograndense.

Quem foi bolsista de iniciação científica como eu sabe que mais do que tudo, o reconhecimento do trabalho realizado é fundamental. Por isso não posso deixar de agradecer aqueles que tornam possíveis as pesquisas de mestrandos, doutorandos e professores. Obrigado aos graduandos que trabalharam comigo – aprendendo e ensinando: Diego Altieri, Lucas Coradin, Mario Flores, Valter Guerra Jr., e em especial Andreas Berwaldt e Roger Madail, pelo auxílio e amizade.

Ao Airton e ao Éderson, pela ajuda no laboratório, principalmente na fase final do trabalho.

Ao "*NORIE Futebol Clube*", pelas terças e quartas-feiras de muitas risadas e vez por outra algum futebol...

À CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro e institucional.

À empresa de fundição que cedeu a escória para a realização deste trabalho.

Por fim, ao NORIE como um todo, que me acolhe, entre idas e vindas, há quase seis anos (primeiro como bolsista, depois como pesquisador e agora mestrando). Relembrando o que um dia disse na minha cerimônia de colação de grau, o NORIE foi, é, e sempre será meu segundo lar. Muito obrigado a todos!

***Daniel Tregnago Pagnussat***

*“Enquanto estivermos tentando, estaremos felizes,  
lutando pela definição do indefinido,  
pela conquista do impossível, pelo limite do  
ilimitado, pela ilusão de viver.  
Quando o impossível torna-se um desafio,  
a satisfação está no esforço,  
e não apenas na realização final.”*  
**(Gandhi)**

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>14</b>
<b>SIGLAS .....</b>	<b>16</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>17</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>18</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1 OBJETIVOS .....	21
1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA .....	22
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	22
<b>2 A TEMÁTICA DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E DA RECICLAGEM DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....</b>	<b>24</b>
2.1 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	29
2.2 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM BLOCOS DE CONCRETO ....	34
<b>3 O PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM FORNO CUBILÔ.....</b>	<b>38</b>
3.1 AREIA DE FUNDIÇÃO .....	40
3.2 ESCORIA GRANULADA DE FUNDIÇÃO (EGF) .....	42
3.3 PANORAMA DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO .	46
3.3.1 Utilização de Areia de Fundição .....	48
3.3.2 Utilização de Escórias de Fundição .....	49
<b>4 BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO .....</b>	<b>52</b>

4.1 A UTILIZAÇÃO DE BLOCOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO .....	52
4.2 PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO .....	53
4.3 CONSIDERAÇÕES A PARTIR DAS PROPOSIÇÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	56
<b>5 ESTUDO DA EGF EM BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO .....</b>	<b>60</b>
5.1 PLANEJAMENTO DOS PARÂMETROS EXPERIMENTAIS .....	60
5.1.1 Escolha das Variáveis do Projeto Experimental .....	61
5.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	64
5.2.1 Materiais Utilizados .....	64
5.2.1.1 Cimento .....	65
5.2.1.2 Agregado miúdo .....	66
5.2.1.3 Agregado graúdo .....	67
5.2.1.4 Água .....	68
5.2.1.5 Escória Granulada de Fundação (EGF) .....	68
5.2.2 Amostragem e Moagem da EGF .....	72
5.2.3 Produção dos Blocos .....	74
5.2.3.1 Dosagem Preliminar do Concreto Referência .....	76
5.2.3.2 Controle das Características dos blocos produzidos .....	82
5.2.4 Ensaio Realizados .....	85
5.2.4.1 Resistência à Compressão .....	85
5.2.4.2 Resistência ao Desgaste por Abrasão .....	87
5.2.4.3 Absorção de Água .....	88
<b>6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>90</b>
6.1 EFEITO DA POSIÇÃO DOS BLOCOS NA VIBRO-PRENSA .....	90
6.2 INCORPORAÇÃO DA EGF COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO .....	95
6.2.1 Resistência à Compressão .....	96

6.2.1.1 Análise Estatística do Efeito das Variáveis Independentes .....	98
6.2.1.2 Análise da Relação Consumo de Cimento / Resistência à compressão obtida .....	101
6.2.2 Resistência ao Desgaste por Abrasão .....	102
6.2.3 Absorção de Água .....	104
<b>6.3 INCORPORAÇÃO DA EGF COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO .....</b>	<b>105</b>
6.3.1 Resistência à Compressão .....	105
6.3.1.1 Análise Estatística do Efeito das Variáveis Independentes .....	108
6.3.1.2 Análise da Relação Consumo de Areia / Resistência à compressão obtida .....	110
6.3.2 Resistência ao Desgaste por Abrasão .....	111
6.3.3 Absorção de Água .....	113
<b>7 CONCLUSÕES .....</b>	<b>114</b>
7.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	114
7.2 QUANTO À UTILIZAÇÃO DA EGF COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO .....	115
7.3 QUANTO À UTILIZAÇÃO DA EGF COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO .....	116
<b>8 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>118</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>119</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>127</b>
APÊNDICE 1: VALORES INDIVIDUAIS DE $f_c$ DOS BLOCOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR EGF .....	128
APÊNDICE 2: VALORES INDIVIDUAIS DE $f_c$ DOS BLOCOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADO MIÚDO POR EGF.....	130
APÊNDICE 3: RESUMO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO MÚLTIPLA LINEAR PARA $f_c$ (BLOCOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR EGF) .....	132

APÊNDICE 4: RESUMO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO MÚLTIPLA LINEAR PARA $f_c$ (BLOCOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADO MIÚDO POR EGF) .....	134
APÊNDICE 5: RESULTADOS INDIVIDUAIS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS BLOCOS .....	136
<b>ANEXOS</b> .....	138
ANEXO 1: ANÁLISE GRANULOMÉTRICA A LASER DA EGF APÓS MOAGEM ...	139
ANEXO 2: RELATÓRIO TÉCNICO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESGASTE POR ABRASÃO (BLOCOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR EGF E REFERÊNCIA) .....	141
ANEXO 3: RELATÓRIO TÉCNICO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESGASTE POR ABRASÃO (BLOCOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADO MIÚDO POR EGF) .....	144

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: pavimento tipo <i>unystein</i> .....	23
Figura 2: ciclo de vida dos resíduos a ser considerado quando da sua utilização na Indústria da Construção (Gidley; Sack, 1984) .....	30
Figura 3: detalhamento dos diferentes constituintes de um forno cubilô (Pieske, 1984 apud Ceccatto, 2003) .....	38
Figura 4: ferro fundido e escória sendo vertidos na lateral do forno cubilô .....	42
Figura 5: aspecto da escória granulada de fundição após resfriamento.....	43
Figura 6: modelo representativo da situação atual da interação entre os setores da Construção Civil e Indústria de Fundição para reaproveitamento de resíduos .....	57
Figura 7: difratograma da escória granulada de fundição (EGF).....	69
Figura 8: valores individuais de resistência à compressão, aos 28 dias, de argamassas para ensaio de pozolanicidade.....	72
Figura 9: escória sendo vertida para canal de resfriamento com fluxo de água contínuo.....	73
Figura 10: escória sendo retirada do canal após seu resfriamento.....	73
Figura 11: equipamento de vibro-prensagem utilizado na moldagem dos blocos.....	75
Figura 12: numeração das fôrmas para identificação dos blocos de concreto junto ao equipamento de vibro-prensagem. ....	75
Figura 13: aspecto superficial do bloco de concreto de pavimentação no traço piloto.....	77
Figura 14: aspecto superficial dos blocos de concreto para pavimentação com teores de argamassa de (a) 75%, (b) 78% e (c) 81%.....	79
Figura 15: aspecto dos blocos de concreto com H = 7,5% - detalhe para a presença de nata de cimento junto aos moldes.....	80
Figura 16: aspecto superficial dos blocos produzidos com diferentes teores (%) de substituição de cimento por EGF e referência.....	84
Figura 17: aspecto superficial dos blocos produzidos com diferentes teores (%) de substituição de areia média por EGF. ....	85
Figura 18: ensaio de resistência à compressão dos blocos .....	86
Figura 19: detalhe do gabarito de madeira utilizado junto à prensa .....	86
Figuras 20a e 20b: equipamento utilizado no ensaio de desgaste por abrasão, e corpos-de-prova antes (A) e após o ensaio (B) .....	88
Figura 21: resistência à compressão ao longo do tempo dos blocos de concreto referência (0% de EGF) .....	90
Figura 22: resistência à compressão ao longo do tempo dos blocos de concreto para pavimentação com substituição de 10% de cimento por EGF .....	91
Figura 23: resistência à compressão ao longo do tempo dos blocos de concreto de pavimentação com substituição de 30% de cimento por EGF .....	91
Figura 24: resistência à compressão ao longo do tempo dos blocos de concreto para pavimentação com substituição de 50% de cimento por EGF .....	92
Figura 25: resistência à compressão ao longo do tempo dos blocos de concreto para pavimentação com substituição de 10% de areia média por EGF.....	92
Figura 26: resistência à compressão ao longo do tempo dos blocos de concreto para pavimentação com substituição de 30% de areia média por EGF.....	93
Figura 27: resistência à compressão dos blocos de concreto com substituição de 50% de areia média por EGF .....	93

Figura 28: efeito da posição na forma da vibro-prensa sobre a resistência à compressão dos blocos de concreto com substituição de cimento por EGF ..	94
Figura 29: efeito da posição na forma da vibro-prensa sobre a resistência à compressão dos blocos de concreto com substituição de areia média por EGF ..	95
Figura 30: evolução da resistência à compressão ( $f_c$ ) de blocos de concreto para pavimentação com substituição parcial de cimento por EGF, ao longo do tempo.....	96
Figura 31: percentual de hidratação do concreto em relação a resistência à compressão aos 28 dias.....	97
Figura 32: evolução do ganho (%) de resistência à compressão de blocos de concreto para pavimentação com substituição parcial de cimento por EGF, em diferentes idades.....	98
Figura 33: efeito principal da idade sobre a resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação com EGF .....	99
Figura 34: efeito principal do teor de EGF sobre a resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação.....	99
Figura 35: custo percentual para a produção de 1 MPa de concreto, em relação ao consumo de cimento do concreto referência.....	102
Figura 36: evolução da resistência à compressão de blocos com substituição parcial de agregado miúdo por EGF, em diferentes idades .....	106
Figura 37: percentual de hidratação do concreto em relação a resistência à compressão aos 28 dias.....	107
Figura 38: evolução do ganho (%) de resistência à compressão de blocos com substituição parcial de agregado miúdo por EGF, em diferentes idades .....	107
Figura 39: efeito principal da idade sobre a resistência mecânica dos blocos com EGF.....	108
Figura 40: efeito principal do teor de substituição de agregado miúdo por EGF sobre a resistência mecânica dos blocos de concreto para pavimentação ..	109
Figura 41: custo percentual para a produção de 1 MPa de concreto, em relação ao consumo de areia média do concreto referência.....	111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: composição química típica de uma escória de cubilô ( <i>European IPPC Bureau, 2002</i> ) .....	45
Tabela 2: produção mundial de fundidos (base 1997) .....	46
Tabela 3: exemplos de reciclagem interna e externa de resíduos sólidos de fundição (adaptado de Moraes,2002) .....	47
Tabela 4: características do cimento CPV-ARI utilizado.....	66
Tabela 5: distribuição granulométrica e caracterização física da areia média utilizada .....	67
Tabela 6: distribuição granulométrica e caracterização física da areia fina utilizada .....	67
Tabela 7: distribuição granulométrica da brita utilizada.....	68
Tabela 8: granulometria da escória granulada de fundição.....	69
Tabela 9: composições químicas entre diferentes materiais pozolânicos (adaptado de Ceccatto, 2003).....	70
Tabela 10: índice de atividade pozolânica da EGF com cimento Portland, aos 28 dias .....	71
Tabela 11: Estudo dos blocos dosados no ensaio piloto .....	77
Tabela 12: traços, em massa, empregados para o ajuste do teor de argamassa dos blocos de concreto referência.....	78
Tabela 13: traços, em massa, empregados no primeiro ajuste do teor de umidade dos blocos referência .....	80
Tabela 14: resistência à compressão, aos 7 e 28 dias, obtidos no primeiro ajuste do teor de umidade dos blocos referência.....	81
Tabela 15: traços, em massa, empregados no segundo ajuste do teor de umidade dos blocos referência .....	81
Tabela 16: resistência à compressão, aos 7 e 28 dias, obtidos no segundo ajuste do teor de umidade dos blocos referência.....	81
Tabela 17: massa, em gramas, dos blocos de concreto para pavimentação produzidos. ....	82
Tabela 18: volume dos blocos de concreto para pavimentação produzidos.....	83
Tabela 19: fator multiplicativo da resistência obtida no ensaio de resistência à compressão de blocos para pavimentação .....	87
Tabela 20: análise de Variância (ANOVA) do efeito da posição na fôrma da vibroprensa sobre a resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação com EGF como aglomerante.....	94
Tabela 21: análise de Variância (ANOVA) do efeito da posição na fôrma da vibroprensa sobre a resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação com EGF como agregado.....	94
Tabela 22: resistência à compressão média ( $f_c$ ), em MPa, dos blocos de concreto para pavimentação com substituição parcial de cimento por EGF .....	96
Tabela 23: análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, teor de EGF e da interação das duas variáveis sobre a resistência à compressão .....	98
Tabela 24: análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, teor de EGF e da interação das duas variáveis sobre a resistência à compressão .....	100
Tabela 25: relação do consumo de cimento (%) para cada MPa produzido, nos diferentes traços estudados.....	101

Tabela 26: resultados médios e individuais de desgaste por abrasão nos corpos-de-prova extraídos dos blocos com substituição parcial de cimento por EGF e referência.....	103
Tabela 27: análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, teor de EGF e da interação das duas variáveis sobre o índice de desgaste por abrasão. ....	103
Tabela 28: resultados da absorção dos blocos de concreto com distintos teores de EGF e dos blocos referência após imersão em água.....	104
Tabela 29: análise de Variância (ANOVA) do efeito do teor de EGF sobre a absorção de água dos blocos.....	104
Tabela 30: resistência à compressão média ( $f_c$ ), em MPa, dos blocos de concreto para pavimentação com substituição parcial de agregado miúdo por EGF..	105
Tabela 31: análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, teor de EGF e da interação das duas variáveis sobre a resistência à compressão .....	108
Tabela 32: relação do consumo de areia (%) para cada MPa produzido, nos diferentes traços estudados.....	110
Tabela 33: resultados médios e individuais de desgaste por abrasão nos corpos-de-prova extraídos dos blocos com substituição parcial de areia média por EGF e referência.....	112
Tabela 34: análise de Variância (ANOVA) do efeito do teor de EGF sobre o índice de desgaste por abrasão.....	112
Tabela 35: resultados da absorção dos blocos de concreto com distintos teores de EGF e dos blocos referência após imersão em água.....	113
Tabela 36: análise de Variância (ANOVA) do efeito do teor de EGF sobre a absorção de água dos blocos para pavimentação .....	113

## **SIGLAS**

ABIFA - Associação Brasileira de Fundição

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CIENTEC: Fundação de Ciência e Tecnologia

CP-II-Z: Cimento Portland tipo II composto com pozolana

CP-V-ARI : Cimento Portland tipo V de alta resistência inicial

C.V. : Coeficiente de Variação

EGF: Escória Granulada de Fundição

LEME: Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

MPa: Mega-Pascal

NBR: Norma Brasileira Registrada

NM: Norma Mercosul

NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação na Edificação

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

PPGEM: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e Materiais

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## RESUMO

PAGNUSSAT, D.T. **Utilização de Escória Granulada de Fundição (EGF) em Blocos de Concreto para Pavimentação**. 2004. Dissertação (Mestrado Acadêmico) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Pesquisas de ordem ambiental têm sido objeto de estudos de diversas áreas do conhecimento. No âmbito da Engenharia Civil, o foco tem se voltado no gerenciamento e redução do volume de resíduos gerados, bem como no aprimoramento dos materiais e sistemas utilizados. Conseqüência direta disso são os recentes avanços no desenvolvimento de novos materiais e no aproveitamento de resíduos de outros setores produtivos como subprodutos de valor agregado na cadeia produtiva da construção civil. Desse modo, estudar as possibilidades de reciclagem de resíduos em materiais de construção adquire uma nova dimensão, que extrapola a intenção pura e simples de desenvolver um novo produto. Dentro de uma abordagem holística, deve-se pensar em trabalhos que envolvam reciclagem como contribuintes na criação de subprodutos com valor agregado, bem como suscitadores de discussões mais amplas de desenvolvimento sustentado. O setor de blocos de concreto para pavimentação, por sua vez, tem demonstrado um grande potencial de expansão de mercado, tanto na pavimentação de vias de tráfego intenso como também na urbanização de cidades como elementos de paisagismo. Feitas tais considerações, este trabalho objetiva avaliar as potencialidades de utilização de escórias granuladas de fundição, resíduos da produção de ferro fundido, aqui denominadas EGF, na fabricação de blocos intertravados de concreto para pavimentação. A partir de contextualização do tema, procura-se avaliar as vantagens da EGF nestes blocos, como substituição parcial do cimento e também como substituição parcial do agregado miúdo. Para ambas as situações, foram realizados ensaios de resistência mecânica à compressão, desgaste por abrasão e absorção de água, em concretos com diferentes teores de substituição (10, 30 e 50%). O teor de 10% de EGF como substituição parcial de cimento foi o que mais se aproximou do desempenho dos blocos referência. Os resultados também demonstram que não há diferenças significativas entre os blocos referência e o blocos com EGF, quanto ao desgaste por abrasão e absorção de água.

**Palavras-chave:** reciclagem; escória granulada de fundição; blocos de concreto para pavimentação

## ABSTRACT

PAGNUSSAT, D.T. **The Use of Granulated Foundry Slag (GFS) in Concrete Pavement Blocks**. 2004. Dissertação (Mestrado Acadêmico) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Environmental research studies have been carried out in several fields of knowledge. In Civil Engineering, the focus has been on the management and on the reduction of generated waste volume, as well as on the improvement of materials and systems used. A direct consequence is the recent advance in the development of new materials and the use of waste from other productive sectors as value-added by-products in the Construction sector. In this sense, studying the possibilities of recycling waste in construction materials acquires a greater dimension that goes beyond the pure and simple intention of developing a new product. In a holistic approach, studies that involve recycling, as a contribution to the creation of value-added by-products, as well as a wide discussion of sustained development, should be considered. The concrete pavement blocks industry has demonstrated great market growth potential, both in intense traffic road pavements, as well as in the urbanization of cities as landscape elements. The objective of this research is to evaluate the potential of use of granulated foundry slag, waste in the cast iron production, named as GFS in this study, in the production of interlocked concrete pavement blocks. This dissertation discusses the advantages of GFS in these blocks as a partial substitute of cement and also partial substitute of fine aggregate. Mechanical strength, skid resistance and water absorption tests were performed in different substitution contents (10, 30 and 50%). The replacement of 10% of cement by GFS has shown similar performance in comparison with the control blocks. The results have shown that blocks with GFS did not have significant performance deviation with regard to skid resistance and water absorption of the control blocks.

**Key-words:** recycling; granulated foundry slag; concrete pavement blocks

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, tem sido grande o impulso dado pelas diversas áreas do conhecimento para a realização de pesquisas de ordem ambiental. No âmbito da Engenharia Civil, o foco tem se voltado, principalmente, no aprimoramento dos materiais e sistemas utilizados, bem como no gerenciamento e redução do volume de resíduos gerados. Conseqüência direta disso são os recentes avanços no desenvolvimento de novos materiais e o aproveitamento de resíduos de outros setores produtivos como subprodutos de valor agregado na cadeia produtiva da construção civil.

Aquilo que, no passado, poderia ser identificado como uma simples mudança de pensamento – a maior relevância que as empresas deveriam continuamente dar à gestão dos resíduos produzidos – está se tornando uma premissa básica para todos os setores que esperam ter seus produtos e processos otimizados. A acirrada disputa de mercados não concebe mais que empresas negligenciem questões como desperdício de materiais, gestão ineficiente dos processos internos de produção e, mais recentemente, a emissão e controle dos seus resíduos.

A consagração do processo de reciclagem dentro da própria indústria (como por exemplo na fabricação de aço), bem como a incorporação de resíduos de outros setores (como o uso de cinzas e escórias na construção civil) transformaram definitivamente a questão de gerenciamento e reaproveitamento de subprodutos. Atualmente esta questão representa um paradigma de desenvolvimento sustentado inevitável à sociedade.

Dentro deste cenário, desenvolver linhas de trabalho que conjuguem desenvolvimento tecnológico e mudanças nos paradigmas de produção de bens na sociedade passa a constituir-se em um desafio maior imposto aos pesquisadores.

O setor de blocos de concreto para pavimentação, por sua vez, tem demonstrado um grande potencial de expansão de mercado. Atualmente, nota-se um

crescimento significativo deste tipo de solução construtiva, seja para a pavimentação de vias de tráfego intenso, seja como solução arquitetônica para composição de calçamentos e outros elementos de paisagismo. Além disso, dentro de uma tendência de intensiva industrialização do setor de construção civil, os sistemas de pré-fabricados passam a ser importantes agentes deste processo.

Dados da Associação Brasileira dos Fabricantes de Concreto para Alvenaria e Pavimentação mostram que o consumo dos pisos intertravados de concreto no país dobrou nos últimos três anos, assim como o número de fábricas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002a).

Isto se deve principalmente à características do sistema, o qual propicia agilidade e rapidez na sua construção, além de não exigir mão de obra especializada. Como consequência, obtém-se pisos com ótimo acabamento e econômicos. Outro dado importante é que os blocos intertravados constituem pisos permeáveis, o que contribui sobremaneira para uma melhor drenagem de águas pluviais nos centros urbanos. Por esta razão, muitas prefeituras têm incentivado e investido neste tipo de pavimentação.

Nesse contexto, estudar as possibilidades de reciclagem de resíduos em materiais de construção (como, por exemplo, em blocos intertravados de concreto) adquire uma nova dimensão, que extrapola a intenção pura e simples de desenvolver um novo produto. Dentro de uma abordagem ampla, deve-se pensar na reciclagem como contribuinte na transformação de resíduos em subprodutos com valor agregado. Mais do que isto, uma tarefa muito importante destas pesquisas consiste em suscitar a discussão a respeito dos porquês das escolhas tecnológicas que estão sendo feitas, confrontando a conjunção dos interesses de todos os agentes envolvidos nesse processo:

- a) fornecedores de matérias-primas para construção civil, responsáveis pela extração e consumo de recursos naturais;
- b) mercado consumidor, e sua demanda por novos produtos, preços competitivos e qualidade dos materiais e serviços oferecidos;

c) indústrias geradoras de resíduos, que pretendem reduzir seus gastos com emissão, disposição e controle de resíduos ;

d) órgãos ambientais, que cada vez mais exigem políticas públicas e privadas de controle ambiental;

e) anseios da sociedade em geral, e sua perspectiva social, econômica e ambiental para as gerações futuras.

Feitas tais considerações, este trabalho objetiva a avaliação das potencialidades de utilização de escórias granuladas de fundição, resíduos da produção de ferro fundido, aqui denominadas EGF, na fabricação de blocos intertravados de concreto para pavimentação. A partir de apresentação do tema, procura-se avaliar o efeito do uso da EGF nestes blocos intertravados, frente a questões de resistência à compressão, desgaste por abrasão e absorção de água.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho consiste na avaliação do desempenho de blocos de concreto para pavimentação moldados com escória granulada de fundição (EGF), quanto a características de resistência mecânica à compressão, resistência ao desgaste por abrasão e absorção de água. Para tanto, a influência da EGF foi avaliada em duas situações distintas: em blocos de concreto para pavimentação com diferentes teores de substituição de cimento e como substituição do agregado miúdo por EGF.

Como objetivos complementares, pretende-se a identificação do teor ótimo de substituição dos materiais por EGF, em ambas as situações propostas, bem como avaliar características de trabalhabilidade e compactação do concreto e do acabamento superficial dos blocos produzidos (textura e coloração aparente).

## 1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este trabalho é composto de oito capítulos. O primeiro capítulo contém uma breve introdução, onde são abordados o panorama geral do tema e o enfoque a que se propõe o trabalho. Os capítulos seguintes procuram contextualizar o tema, através de revisão bibliográfica. No capítulo dois apresenta-se uma abordagem sobre a questão do gerenciamento de resíduos pela sociedade, através de uma temática de desenvolvimento sustentável. Além disso, discute-se a questão de utilização dos resíduos, inclusive escórias de fundições, as experiências existentes e as eventuais dificuldades na implementação de processos de reciclagem. No capítulo três apresenta-se o processo de fundição que gera as escórias granuladas de fundição, objeto deste trabalho. No capítulo quatro se explicitam alguns conceitos relevantes na tecnologia de produção de blocos de concreto. No capítulo cinco é descrita a metodologia de pesquisa proposta para aplicação da EGF em blocos de pavimentação, através do programa experimental, ao passo que o capítulo seis apresenta os resultados dos ensaios propostos. Estes são, finalmente, objeto de discussão no capítulo sete, onde são apresentadas as considerações finais. No capítulo oito abre-se espaço para sugestões de trabalhos futuros.

## 1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Para a realização deste trabalho, foram observadas algumas limitações de pesquisa, abaixo relacionadas:

- a) Originalmente, estava prevista a inclusão de um estudo amplo do efeito da finura da escória granulada de fundição nas propriedades pozolânicas do material, através de estudos de tempo de moagem. Todavia, a baixa eficiência apresentada pelos moinhos disponíveis, associada ao tempo necessário para a moagem inviabilizaram o estudo, em tempo hábil para apresentação. Desse modo, foi utilizada uma escória moída até que se alcançassem os requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 12653 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992c), que classifica materiais pozolânicos.

b) Os blocos de concreto foram produzidos utilizando uma vibroprensa de limitada capacidade de produção, sendo utilizada uma matriz do tipo *unystein*, disponível no laboratório de materiais do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (NORIE/UFRGS). A figura 1 ilustra um pavimento do tipo *unystein*. Os traços estudados foram obtidos a partir das condições de trabalho e desempenho do equipamento de vibro-prensagem.



Figura 1: pavimento tipo *unystein*

c) os teores de substituição de agregado miúdo por escória granulada de fundição ficaram condicionados à quantidade de material disponível para tal. Por esse motivo, decidiu-se não trabalhar com teores mais elevados de escória de fundição (70%, 100% de EGF).

## **2 GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS E SUSTENTABILIDADE DENTRO DE UMA PERSPECTIVA AMBIENTAL**

No Brasil, a gestão ambiental ainda não foi assumida de forma adequada e seu panorama atual caracteriza-se pela falta de articulação entre as diferentes instituições envolvidas, pela ausência de coordenação e acompanhamento e pela crônica carência de recursos financeiros e humanos para o gerenciamento das questões relativas ao meio ambiente(DONAIRE, 1996).

Uma vez que esta falta de articulação ainda é presente, fica mais fácil perceber nas empresas a necessidade de incorporação de pensamentos voltados a um desenvolvimento ambiental sustentável. Segundo Bordeau (2000), o conceito de sustentabilidade foi definido em 1987, pelo "Brundtland Commission" das Organizações das Nações Unidas, como sendo o desenvolvimento que atende as necessidades de hoje sem comprometer a capacidade de gerações futuras atenderem suas próprias demandas.

Por sua vez, Klang et al. (2003,p.2) enfatizam que, nas últimas décadas, o debate científico em torno de questões de sustentabilidade tem se concentrado em níveis muito abrangentes. O objetivo tem sido descrever como o conjunto da sociedade, ou mesmo as nações, tem ou não se aproximado do conceito de desenvolvimento dito sustentável. Embora isto seja importante, Read (1999), citado por Klang et al. (2003, p.2) considera que há a necessidade de se avaliar a questão de desenvolvimento sustentável também em menor escala, tal como no ambiente de projetos e negócios.

Quando se trabalha com a questão de gerenciamento de resíduos, é importante atentar para o fato de que ciclos fechados de reutilização e reciclagem não significam necessariamente ganhos ambientais. Conforme ressaltam Gidley e Sack (1984, p.1118) e Klang (2003,p.4), muitas vezes o esforço em reciclar pode em si mesmo causar impactos negativos. Por esse motivo, é importante, quando da avaliação das medidas de gestão de resíduos a adotar, uma perspectiva de ciclo de reciclagem ou reutilização adequada. É preciso, acima de

tudo, avaliar as principais potencialidades de utilização para os subprodutos gerados.

Para Ângulo et al. (2001, p.1) a intensa industrialização, conjugada a outros fatores como crescimento populacional e diversificação no consumo de bens e serviços, fez com que os resíduos se tornassem graves problemas urbanos. Em vista do grande volume produzido e acumulado, o gerenciamento destes passou a ser extremamente oneroso e complexo. Grimberg (2002) reitera que as dificuldades e desvantagens de destinação para aterros são tão importantes quanto os altos custos para instalação e gerenciamento deste tipo de estrutura. As cidades, especialmente as grandes, enfrentam crescente falta de espaços, para a construção de locais onde estes resíduos estão sendo estocados. Cidades de pequeno e médio porte, por sua vez, podem ter estes espaços destinados para atividades mais nobres, tais como agricultura, turismo e lazer.

A legislação ambiental tem sido sempre pauta de inúmeros debates, na busca de normas e leis que disciplinem o tratamento de resíduos, seja no âmbito dos poderes públicos federal, estaduais e municipais, seja na iniciativa privada. Ao poder público cabe gerenciar os resíduos que a sociedade em geral produz. Sobretudo, porém, caberá a ele estruturar estratégias de gestão sócio-ambiental, bem como regulamentar e fiscalizar a produção e disposição dos resíduos, incentivando políticas de tratamento e reciclagem.

Por sua vez, a responsabilidade das indústrias envolve desde o processo de produção de bens e serviços até o pós consumo, o que deverá levar à revisão de processos produtivos com vistas à redução da geração de resíduos (GRIMBERG, 2002). Confirmando esta idéia, o parágrafo segundo do artigo 218 do Código Estadual (2000) reitera que cessará a responsabilidade do gerador de resíduos somente quando estes, após utilização por terceiros, e licenciado pelo órgão ambiental, sofrer transformações que o caracterizem como tais.

Shrivastava e Hart (1995) complementam este pensamento, afirmando que todas atividades organizacionais, desde o consumo de insumos e energia até o uso e descarte dos produtos, passando pela sua produção, envolve algum problema ambiental. A gestão ambiental deve envolver, então, o tratamento destes problemas, a partir de uma perspectiva de sistemas holísticos.

Nesse sentido, Moura (2000, p.1) comenta que a necessidade de formação de quadros técnicos com o intuito de eliminar a cultura do desperdício tem sido foco de investimento por parte das empresas. Segundo o autor, isso leva não só a uma nova cultura de redução de perdas, mas também a um menor dispêndio econômico, fruto da minimização do consumo de recursos naturais e energéticos. Esta melhora dos processos de produção, confirmam Shrivastava e Hart (1995), deve ser uma extensão natural dos programas de gestão da qualidade implantados nas empresas.

Souza (2000, p.33), no entanto, ao considerar medidas de redução de impacto ambiental, ressalta que ações mitigadoras devem ser compostas por medidas factíveis, ou seja, que apresentem possibilidade de execução e obtenção dos resultados preconizados sem assumir riscos desproporcionais de não funcionamento. Desta forma, é preciso que novas práticas sejam analisadas tecnicamente de modo a serem viabilizadas e não descartadas por falta da análise adequada.

Mehta e Monteiro (1994, p.568) ponderam que preocupações relativas às propriedades ecológicas devem ser levadas em consideração: por exemplo, no tocante à extração de matérias-primas, no consumo de energia e água, bem como os resíduos gerados dos processos de fabricação.

Os resíduos, como parte dos processos de fabricação, poderiam ser projetados como subprodutos úteis. Tais resíduos deveriam ser percebidos mais como subprodutos do que como sobras ou perdas indesejáveis. O processo de otimização incluiria a minimização dos resíduos e o impacto de custo de alternativas como, por exemplo, a da reutilização ou disposição final. Essa prática já ocorre em alguns setores, mas não de maneira generalizada (FROSCH, 1997, p.43).

A idéia global é considerar como o sistema industrial poderia evoluir na direção de uma cadeia de suprimento interconectada, para que a minimização dos resíduos passe a constituir um atributo ou propriedade do sistema industrial, mesmo quando não pertinente a um determinado processo, fábrica ou indústria (FROSCH, 1997, p.43).

No caso da construção civil, este panorama de desenvolvimento tecnológico conjugado a preocupações de ordem ambiental também deve existir. Para Teixeira (2002), um ponto fundamental deste novo pensamento deve ser o de “construir economicamente”. Esta visão deve se estender desde a concepção dos projetos até a seleção dos materiais e métodos construtivos, passando pela fase de implementação e gerenciamento. As principais vertentes desta atitude são a otimização dos volumes de construção, a redução do peso dos edifícios e a maximização da eficiência de materiais e componentes. As análises de gestão de valor (*value management*) poderão também alargar-se às considerações de natureza ambiental.

Frosch (1997,p.54) coloca, de maneira muito pertinente, que para processar a reutilização de quantidades significativas de um material, o sistema utilizado deve ser assentado em uma economia realista, na qual os processos alternativos e o material comercializado façam um sentido financeiro, incluindo custos de processamento e do produto, custos de informação e transporte em várias alternativas, e custos da possível disposição final, seja por meio das alterações ou depósitos em aterros.

Além da questão da geração e disposição de resíduos, a reciclagem também pode contribuir sobremaneira na redução do consumo de bens naturais. De acordo com Sjöström<sup>1</sup> (1996, *apud* John, 2000, p.15 e Vargas, 2002, p.3), a construção civil consome entre 14% a 50% dos recursos naturais extraídos no planeta. Nacionalmente, as estatísticas são escassas. Considerando que no Brasil são produzidas aproximadamente 35 milhões de toneladas de cimento por ano. Assumindo que este cimento é misturado com agregados a um traço médio de 1:5 (cimento : agregados), em massa, pode-se estimar um consumo anual de 210 milhões de toneladas de agregados somente na produção de concretos e argamassas. A este valor é necessário somar o volume de agregados utilizados em pavimentação e as perdas.

Dentro deste contexto de busca pela sustentabilidade, parece claro que a reciclagem deve constituir-se em importante alternativa de preservação e

---

<sup>1</sup> SJÖSTRÖM, Ch. Durability and sustainable use of building materials. *In: Sustainable use of materials*. J.W. Llewellyn & H. Davies editors. [London] BRE/RILEM, 1992]

recuperação ambiental. Para Ângulo et al. (2001,p.3), esta reciclagem de resíduos como materiais de construção ainda é tímida, se comparada à países do primeiro mundo, com exceção da intensa reciclagem das indústrias de cimento e aço.

Ângulo et al. (2001, p.4) reiteram que sem sombra de dúvida a maior experiência brasileira na área de reciclagem de produtos gerados por outras indústrias na produção de materiais de construção civil é a conduzida pela indústria cimenteira, que recicla principalmente escórias de alto-forno e cinzas volantes.

No caso de resíduos de fundição, um grande volume de resíduos também é gerado. Todo ano, cerca de 4,5 a 7 milhões de metros cúbicos de resíduos de fundição são dispostos em aterros, somente nos Estados Unidos (Olenbush, 1999). No Brasil, os dados referentes a geração de resíduos de fundição ainda são escassos e pouco precisos. Uma estimativa pode ser feita comparando a produção de fundidos entre Brasil e Estados Unidos. A produção de fundidos nos Estados Unidos, em 1997, foi da ordem de 14,3 milhões de toneladas, ao passo que no Brasil este valor foi de aproximadamente 1,66 milhões de toneladas<sup>2</sup>. Considerando uma mesma proporção de geração de resíduos de fundição, no Brasil, o resultado seria da ordem de 0,5 à 0,8 milhões de metros cúbicos.

A oportunidade de reutilizar tais materiais, conforme afirma Olenbush (1999), pode proporcionar uma economia potencial, somente nos Estados Unidos, da ordem de 100 a 250 milhões de dólares em custos de disposição, o que caracterizaria a reciclagem não apenas como uma "política de boa vizinhança" para as empresas, mas uma linha base para discussão.

Hiltunen et al.(1992, p.1) corroboram com este pensamento quando afirmam que o aumento do interesse por questões ambientais faz com que a disposição completa de resíduos de fundição se torne um "dilema moral" para as empresas.

Infelizmente, os potenciais beneficiários (destes subprodutos) em geral não procuram a Indústria da Fundição em busca destes materiais para uso em seus respectivos setores produtivos. A Indústria da Construção, por exemplo, utiliza

---

<sup>2</sup> Fonte: Revista Modern Casting, dezembro de 1998

milhões de toneladas de muitos materiais semelhantes, porém ainda utiliza timidamente resíduos de fundição como insumos para construção. Diversos estados americanos conduziram pesquisas onde demonstram claramente que resíduos de fundição são aplicáveis em muitos empreendimentos construtivos. Em muitos casos, o problema não é apenas de aplicabilidade, mas de falta de comunicação apropriada entre os agentes do processo. A Indústria da Fundição não possui compreensão dos requisitos necessários para a aceitação destes resíduos como materiais de construção; a Indústria da Construção, por sua vez, desconhece as propriedades dos resíduos gerados, ou mesmo não se interessa diretamente em obtê-los para utilizá-los. Como consequência, pesquisas tornam-se inevitáveis para prover o vínculo essencial entre Indústria da fundição e Indústria da Construção, de modo a solucionar o sério problema de comunicação ainda existente e que evita a utilização benéfica destes subprodutos (Hiltunen et al., 1992, p.1).

## 2.1 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Conforme citado no capítulo um, a Indústria da Construção Civil há muito tem se constituído em um setor com grande capacidade de absorver subprodutos gerados de outros processos de produção.

Shen e Tam (2001, p.536) indicam que existem benefícios óbvios através da implementação de gerenciamento ambiental nas atividades de construção para a comunidade, como a redução da geração de resíduos e a minimização do uso de materiais e técnicas que podem causar efeitos prejudiciais ao meio ambiente.

Para Gidley e Sack (1984, p.1117), uma vasta variedade de resíduos são utilizados ou potencialmente utilizáveis na construção civil. Dentre outros, podem ser citados resíduos de rocha e outros rejeitos da indústria de mineração; cinzas volantes e pesadas de processos de combustão; escórias provenientes da indústria metalúrgica; lama de tratamento de esgotos, resíduos municipais em geral e resíduos de construção e demolição. A utilização de tais materiais inclui aterros, barragens, base para pavimentação de estradas, agregados para concreto e asfalto, adições pozolânicas, tijolos e cerâmicas.

Gidley e Sack (1984, p.1118) sugerem que, antes de se utilizar um resíduo como material alternativo, deve-se questionar primeiramente qual o impacto ambiental geral que um resíduo específico causará em particular. Concomitantemente, deve-se questionar se o impacto da utilização de um subproduto originalmente gerado como resíduo será maior ou menor do que a matéria-prima originalmente especificada. As considerações de impactos ambientais não devem, contudo, se restringirem ao local ou setor em que será utilizado o subproduto. Deve-se considerar também os impactos gerados no próprio ambiente da geradora do resíduo, no que se refere à questão de estocagem, tratamento e processamento e transporte dos materiais. Este "ciclo de vida" proposto está descrito na figura 2.

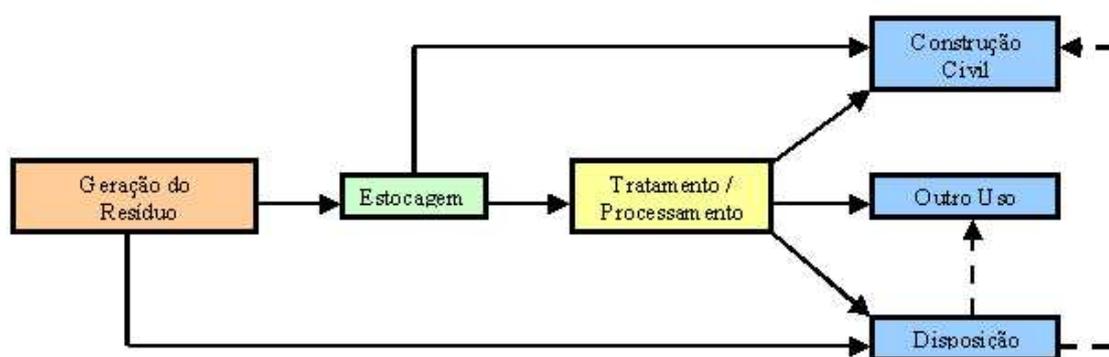


Figura 2: ciclo de vida dos resíduos a ser considerado quando da sua utilização na Indústria da Construção (Gidley; Sack, 1984)

A consideração da reciclagem ou não de um resíduo deverá, então, levar em conta todos estes aspectos, de modo que o resultado final se reflita de fato em benefícios técnicos e ambientais.

Nesse sentido, a utilização de resíduos siderúrgicos e metalúrgicos tem se demonstrado bastante relevante em estudos com cimentos e concretos. Embora a tecnologia de materiais produzidos pela solidificação de metais fundidos a altas temperaturas ou pela sinterização de partículas finas não seja diretamente aplicável aos materiais estruturais de baixo custo (ou seja, produtos cimentícios

hidráulicos de baixo custo) (MEHTA E MONTEIRO 1994, p.571), seu uso como adições pozolânicas pode gerar benefícios significativos na resistência e durabilidade de concretos. Mehta e Monteiro (1994, p.571) consideram que:

Dado que o uso de aditivos redutores de água e adições minerais no concreto é economicamente viável, a conscientização entre os produtores de concreto de que a aplicação de tais aditivos e adições pode ajudar a produzir um produto muito mais homogêneo e melhor acarretaria seu uso rotineiro na produção de concreto comum.

Estudos englobando uma variedade muito grande de materiais alternativos foram e continuam sendo objeto de trabalhos em diversos centros de pesquisa. De modo particular, o NORIE – Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação, da Universidade Federal do Rio Grande dos Sul, vem realizando diversos estudos, como os propostos por Moura (2000) e Masuero (2001), na utilização, respectivamente, de escórias de cobre e aciaria elétrica em concretos, Gonçalves (2000), em trabalhos com lama de corte de granito, Mancio (2001) na estabilização volumétrica de escórias de aciaria e Leite (2001) e Vieira (2003) na utilização de resíduos de construção como agregados para concreto. Nacionalmente, existem também muitos outros trabalhos desenvolvidos nessa área da reciclagem, demonstrando o grande interesse acadêmico nesta área do conhecimento. Nesse sentido, pode-se citar também os trabalhos realizados por Cincotto et al.(1992),na caracterização de escórias de alto-forno para produção de argamassas e concretos; Guedert (1989) e Santos (1998), que trabalharam na viabilização de cinzas de casca de arroz como material pozolânico, John (1995), que desenvolveu cimentos de escória mediante uso de ativadores à base de silicato de sódio; Zordan (1997), que utilizou resíduos de construção e demolição (RCD) como agregado para concretos; Machado (2000), na avaliação da expansibilidade de escórias de aciaria; Levy (2001) que verificou quesitos de durabilidade em concretos com RCD, dentre muitos outros.

De um modo particular, resíduos provenientes de operações de siderurgia e metalurgia aparecem como exemplos claros. Muitos destes materiais já têm seu uso consagrado e disseminado. O melhor exemplo disso são as escórias granuladas de alto-forno, resíduos provenientes da produção de ferro-gusa. Hooton (1987, p.250) cita que a produção de cimentos com tais escórias granuladas na Europa é antiga, tendo sido desenvolvidas já em 1863. A utilização e o estudo das propriedades da escória granulada de alto-forno já

encontra-se em um patamar muito avançado, sendo muitos os estudos publicados sobre este tipo de subproduto (HOOTON, 1987; MALHOTRA, 1987; CINCOTTO et al., 1992; TAN e PU, 1998; FU et al., 2000; JOHN, 2000; SAMET e CHAABOUNI, 2004).

Skvara et al. (2001) estudaram a inclusão de pó de aciaria em cimentos Portland. Os autores identificaram vantagens na utilização destes material, principalmente pelo fato do mesmo apresentar características físico-químicas muito similares a outro resíduo já consagrado como adição para concretos, a sílica ativa.

Mancio (2001) faz incursões na área da estabilização volumétrica de escórias de aciaria. Seu estudo procura identificar os fenômenos de expansão destes materiais, o que lhes confere um potencial deletério que restringe sua aplicação na construção civil. O autor procura, através de diferentes ensaios acelerados, identificar o comportamento das escórias de modo a criar possibilidades de cura que garantam propriedades compatíveis para uso em materiais de construção. O seu trabalho demonstra a importância de um processo padronizado de descarte das escórias, bem como a não inclusão de contaminantes junto às pilhas de estocagem, como elementos fundamentais na otimização do material.

Masuero (2001) avalia a utilização de escórias de aciaria, provenientes de fornos elétricos à arco, como substituição parcial do cimento. Para sanar a questão da instabilidade volumétrica do material, sugere um processo de granulação da escória, através de resfriamento brusco em água. O resultado deste resfriamento é a criação de um material amorfo (vítreo), com grande potencial de utilização com substituição parcial do cimento. Além disso, o processo de granulação permitiu uma recuperação de quase 30% da fase metálica presente na escória, que pode retornar ao processo siderúrgico, gerando enormes benefícios econômicos. Os estudos em argamassas com *ACIGRAN* (denominação dada ao produto da granulação da escória de aciaria elétrica) demonstraram vantagens na maioria dos quesitos estudados, tanto em termos de resistência mecânica, como de durabilidade.

Cerjan-Stefanovic et al. (1997) apresentam resultados satisfatórios em estudos de misturas de cimento e escória de aciaria. Para os autores, a melhor faixa de

utilização seria alcançada com 15% de adição de escória ao cimento, em termos de resistência mecânica.

Rai et al. (2002) trabalharam com escórias metalúrgicas provenientes da produção de ferro-manganês. Em seu estudo foram analisadas diferentes escórias, com teores altos e baixos de óxido de manganês (MnO), curadas ao ar ou granuladas. Após estudos de caracterização físico-química e de ensaios com substituição parcial de cimento Portland, os autores concluíram que escórias granuladas com baixos teores de MnO poderiam ser utilizadas como substituição parcial do cimento Portland. Escórias curadas ao ar e com altos teores de MnO, porém, apresentavam potencial deletério e não poderiam ser utilizados em concretos estruturais.

Moura (2000), avaliou as potencialidades de utilização de escórias provenientes da produção de cobre. As escórias foram estudadas como adição ao cimento e como agregado miúdo para a produção de concretos. Entre os resultados mais significativos, pode-se citar um aumento da resistência à compressão axial, para todas idades de referência (7,28 e 91 dias), no caso de adição de escória de cobre ao concreto, bem como um melhor desempenho nos ensaios de absorção por sucção capilar e por imersão, além de uma menor profundidade de carbonatação. No caso da escória como substituição de parte do agregado miúdo, os concretos com utilização de 40% de escória de cobre foram os que apresentaram melhor desempenho quanto à resistência à compressão.

Finalmente, Silva Filho (2001) trabalhou com concretos que incorporavam escória de ferro-cromo como agregado graúdo. Como resultados mais significativos, o autor identificou um melhor desempenho mecânico à compressão axial para concretos com a escória estudada em relações água/cimento inferiores a 0,55. Para relações água/cimento superiores a 0,55, os concretos com escória de ferro-cromo apresentaram desempenho menor do que os concretos referência. Outro aspecto relevante do trabalho foi a possibilidade do encapsulamento do cromo na matriz rígida do concreto, gerando grandes benefícios ambientais.

## 2.2 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM BLOCOS DE CONCRETO

Como já citado anteriormente, a utilização de resíduos industriais em concretos, como se apresenta, não é um fato novo, e pode contribuir não só para a redução da extração e consumo de matérias-primas naturais, bem como para a redução da disposição de resíduos de outras indústrias (ou do próprio setor) em aterros. Todavia, os trabalhos específicos de resíduos em blocos de concreto ainda são muito incipientes, quando comparados à estudos em concretos convencionais.

Conforme afirmam Shen e Tam (2001, p.535), a Indústria da Construção não é, naturalmente, um setor com atividades ambientalmente pouco impactantes. Por isso, buscar alternativas que reduzam o consumo de matérias-primas e otimizem produtos e processos pode contribuir sobremaneira para que essa visão mude.

Salas et al. (1987, p.177) consideram que alguns pré-requisitos devem ser estabelecidos quando da utilização de resíduos em blocos de concreto, entre os quais se pode destacar:

- a) trabalhabilidade adequada, sem que haja alteração de propriedades mecânicas;
- b) tecnologia envolvida para implementação efetiva do produto deve ser facilmente assimilada;
- c) mínimo investimento em equipamentos (adicionais para produção);

Isto posto, alguns exemplos de subprodutos que foram incorporados em artefatos de concreto estão descritos a seguir.

Vargas (2002) estudou a viabilidade da utilização de pó de aciaria elétrica em blocos de pavimentação, o que permitiu o encapsulamento de metais pesados em uma matriz rígida de concreto, gerando um grande benefício ambiental. Seu estudo consistiu na moldagem de blocos com teores de pó de aciaria que variavam de 5% à 25%. As análises de ensaios de resistência mecânicas à compressão e de desgaste por abrasão acabaram por indicar o teor de 15% como sendo o mais viável. O mesmo autor realizou ainda estudos com pastas de cimento. Os resultados de ensaios de calor de hidratação demonstraram que o resíduo age, também, como retardador de pega.

Salas et al. (1987) estudaram o efeito da adição conjunta de cinzas volantes e cinzas de casca de arroz em blocos de concreto. Além da variação na dosagem das cinzas, o trabalho propõe cinco diferentes relações água/(cimento+cinza volante) (0,45 à 0,65), bem como tempos diferenciados de vibração para produção das peças (entre 1 e 3 minutos). Os melhores desempenhos quanto à resistência mecânica foram obtidos com relações água/(cimento+cinza volante) de 0,45 e um proporcionamento de 40% de cimento Portland ARI (alta resistência inicial), 20% de cinza volante e 20% de cinza de casca de arroz.

Da mesma forma Nishigaki (2000) sugere a produção de blocos permeáveis e tijolos para pavimentação utilizando escórias granuladas ou curadas ao ar. Estas escórias seriam fruto da fusão das cinzas volantes e cinzas pesadas geradas no processos de incineração de resíduos sólidos municipais. Os resultados apresentados demonstraram que os blocos produzidos alcançaram as exigências de absorção de água e resistência exigidas pelas normas japonesas, configurando uma alternativa interessante de reciclagem.

Kouda (1996) também procura, em seu trabalho, avaliar a utilização de duas diferentes escórias granuladas de incineração de cinzas, provenientes de resíduos sólidos municipais, em materiais para pavimentação. Louzada (1991) faz incursões no estudo de escórias siderúrgicas como insumos para a produção de blocos de concreto, apontando boas possibilidades de utilização.

A reciclagem de resíduos industriais em fornos cubilôs e a posterior utilização em tijolos e blocos é uma prática comum no Japão e em outros países do oriente. Empresas disponibilizam em seus *websites* relatórios de gestão ambiental, apontando esta prática como uma alternativa viável de redirecionamento dos seus resíduos.<sup>3</sup> Práticas como estas podem levar à um “círculo virtuoso”, onde outras empresas podem se beneficiar de novos subprodutos oferecendo materiais ecologicamente mais eficientes. Isto já ocorre, por exemplo, com diversas empresas, como por exemplo a australiana *TecEco Sustainable*

---

<sup>3</sup> Exemplos dessas práticas podem ser identificados nos relatórios ambientais disponíveis nos *websites* da Yamaha (<http://www.yamaha.co.jp/english/yamaha/environment>), Mazda (<http://www.mazda.com/environment>) e Kubota (<http://www.kubota.co.jp/eng/>), dentre outros.

*Technologies*, que oferecem blocos de concreto que incorporam resíduos industriais nos chamados produtos para “eco-alvenarias”<sup>4</sup>

Maia et al. (2002) propõem a dosagem de blocos de concreto com substituição parcial do cimento e substituição parcial ou total da areia fina por cinza pesada. A cinza, coletada do fundo das caldeiras de usinas termelétricas, possuem uma granulometria bem mais grosseira do que cinzas volantes, embora também possam apresentar propriedades pozolânicas. Os resultados obtidos pelos traços estudados indicaram melhor desempenho para substituições de 100% de areia fina + 10% de cimento por cinza, evidenciando, segundo os autores, as propriedades pozolânicas do material.

Watanabe et al. (2002) estudaram o uso de areia de fundição em blocos de concreto para pavimentação, alcançando resultados satisfatórios com até 25% de substituição da areia natural frente à questões de resistência mecânica à compressão.

Blocos de concreto também podem incorporar resíduos da própria Indústria da Construção. Sousa (2001) e Poon et al. (2002) estudaram a utilização de resíduos de construção e demolição como agregado reciclado em tais materiais. Poon et al. (2002) citam que as desvantagens do uso de agregados reciclados em concretos estruturais, quanto à questão de absorção de água (pelos agregados) e a conseqüente perda de trabalhabilidade não se refletem nas misturas de concretos para blocos. Os testes realizados verificaram que a substituição de agregados graúdo e miúdo natural por agregados reciclados, em níveis de 25 a 50%, não afetaram significativamente a resistência dos blocos. Entretanto, teores mais elevados de agregados reciclados reduziram a resistência à compressão.

Por sua vez, Sousa (2001) relata em seu trabalho que é extremamente considerável a influência do entulho nas propriedades dos blocos, inclusive a questão de absorção de água. Os resultados de resistência e absorção para traços com 30 e 50% de substituição e agregados naturais por reciclados não atenderam as especificações da norma para alvenaria de vedação (NBR 7173, 1982).

---

<sup>4</sup> Disponível em <http://www.tececo.com>

Tendo em vista todas as boas experiências relatadas na bibliografia e citadas neste capítulo, pode-se verificar que o estudo da reciclagem de resíduos como subprodutos na construção civil é uma interessante alternativa. Para isto, é claro, é preciso que se conheçam as propriedades do material que se está querendo incorporar. Desta análise é que se poderá avaliar as principais potencialidades do resíduo e eventuais fatores limitantes. Para tal, o próximo capítulo remete ao processo de geração de resíduos na Indústria de Fundição, e suas possíveis aplicações.

### 3 O PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM FORNO CUBILÔ

A escória granulada de fundição (EGF), resíduo gerado a partir da produção de ferro fundido e objeto deste trabalho, é obtida através de processo de fusão em forno cubilô.

O forno cubilô é um forno de fusão que, utilizando matérias-primas metálicas ferrosas, permite a obtenção (por aquecimento e reações físico-químicas) de ferro fundido com composição, produção e temperaturas determinadas. Em geral, o cubilô é um forno vertical feito de chapa de aço revestida (internamente) de tijolos refratários; a parte superior é aberta e o fundo consta de um par de portas de ferro fundido cuja finalidade é permitir a remoção do coque não consumido e do metal não fundido após cada corrida (VALLINA, 1998, p.1).

A figura 3 apresenta o detalhamento de um forno cubilô típico.

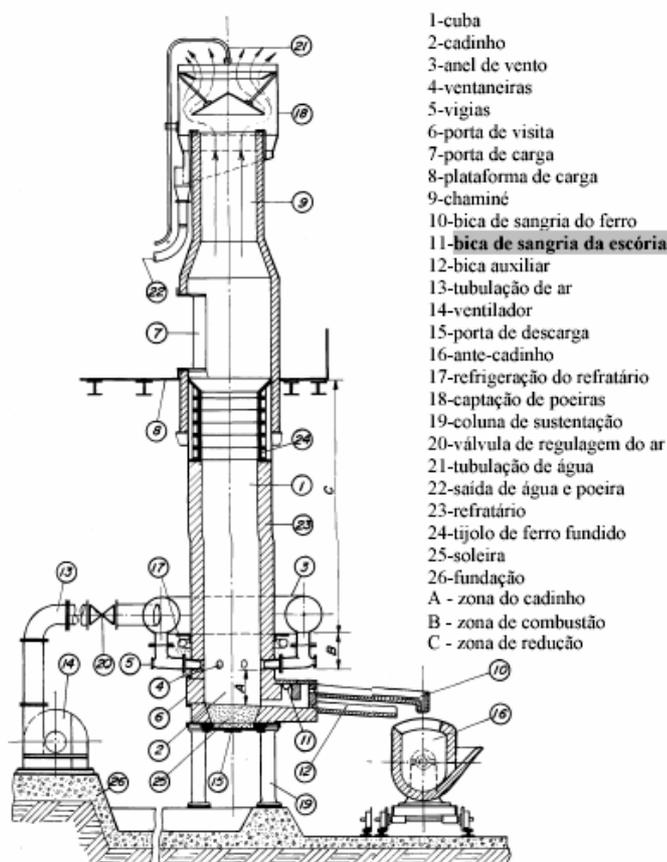


Figura 3: detalhamento dos diferentes constituintes de um forno cubilô (Pieske, 1984 apud Ceccatto, 2003)

Para a produção de ferro fundido via forno cubilô, são utilizados coque de fundição, calcário, ferro-gusa, sucatas de aço e ferroligas (VALLINA, 1998, p. 45-47).

O custo de instalação do forno cubilô convencional é considerado relativamente baixo, particularmente para fundições pequenas, sendo capaz de propiciar a qualidade apropriada ao ferro, especialmente ao ferro fundido cinzento. (POWEN; SMITH, 1999, p.20).

Mais recentemente, foram desenvolvidos fornos cubilôs sem uso de coque. Esta melhoria de projeto, que pode ser adequada para fornos existentes, adiciona eficiência, além de benefícios metalúrgicos e ambientais quando comparados a cubilôs tradicionais, como redução da emissão de material particulado, metal gerado de melhor qualidade e menor quantidade de escória gerada(UNEP WORKING GROUP FOR CLEANER PRODUCTION, 1999, P.31).

Para Caspers (1999, p.37) o resultado da fusão no forno cubilô é determinado pela carga e pelos processos de combustão e também, de maneira significativa, pela quantidade e composição da escória. O mesmo autor ainda considera que nos fornos cubilôs ácidos convencionais, a retenção e a reunião da escória com basicidade oscilante ocasiona dispersões consideráveis nos teores de carbono, silício, manganês e enxofre. O teor final do ferro líquido é o resultado de várias reações, que são parcialmente opostas.

O forno cubilô é revestido com material refratário, que é erodido química e mecanicamente à medida que se realiza a fusão. O material de revestimento erodido, junto com a cinza de coque, sujeira de materiais da carga e fluxos apropriados ( normalmente calcário) resulta na formação de uma escória ácida, que é vazada em conjunto ou separada do metal. (POWEN; SMITH, 1999, p.21-22).

O *UNEP Working Group for Cleaner Production* (1999) faz um apanhado dos principais processos de fundição existentes para a produção de ferros fundidos. No que se refere ao processo em forno cubilô, considera que este tipo de forno tem recebido muita publicidade negativa nos últimos anos. Contudo, o sistema possuiria um grande número de vantagens inerentes, quando comparado à fornos elétricos mais modernos:

- a) economia e simplicidade no manuseio;
- b) capacidade de aceitar grandes quantidades de materiais não metálicos sem reduzir qualidade de fusão;
- c) em uma perspectiva de ciclo de vida mais ampla, cubilôs são mais eficientes e menos nocivos para o meio ambiente do que fornos elétricos. Isto porque ele obtém energia diretamente do coque, ao invés de eletricidade que deve ser previamente gerada.

A última consideração parece ser a mais controversa, de modo que uma análise mais detalhada deveria ser feita para se analisar a viabilidade energética de cada solução, o que não é objeto de estudo deste trabalho.

Seguindo a mesma tendência de outros setores industriais, o controle da emissão de rejeitos não apenas de fornos cubilôs, mas também de todos os demais fornos utilizados para fusão de materiais ferrosos e não-ferrosos tende a se tornar oneroso. Uma alternativa é a utilização do próprio forno cubilô para reprocessamento de materiais residuais, e que segundo Powen e Smith (1999, p.20) se tornará uma importante alternativa no futuro. Isto se dá principalmente pela capacidade de refino do cubilô e à sua maior tolerância a materiais não metálicos incluídos.

A produção de fundidos, no entanto, envolve também a geração de resíduos. Nesse contexto, os principais resíduos gerados pela indústria de fundição – areia e escória – são descritos nos itens subjacentes.

### 3.1 AREIA DE FUNDIÇÃO

Dentre os resíduos gerados pelas empresas de fundição, a que sem dúvida apresenta o maior volume produzido é a chamada areia de fundição. Obtida a partir da junção de areia fina com uma resina fenólica alcalina, é produzida para a fabricação dos moldes e dos machos<sup>5</sup> das peças de ferro fundido. Ceccatto (2003, p.23) e Watanabe et al (2002) citam que esta é uma prática corrente na

---

<sup>5</sup> “Machos” são pequenas peças de areia aglomerada utilizados para o detalhamento dos moldes onde serão produzida as peças de ferro fundido

maioria das fundições, de modo que aproximadamente 80% das peças fundidas produzidas mundialmente se originam de moldes de areia aglomerada.

As areias de fundição podem ter usos distintos após sua geração como moldes e machos para peças de ferro fundido. As práticas mais comuns incluem a recirculação, a regeneração e a reciclagem (em outros sistemas produtivos).

Mariotto (2000) atenta para o fato de não se confundir os processos de recirculação e regeneração. A prática normal de recirculação de uma areia, isto é, a reutilização da areia no próprio sistema de produção, requer, via de regra, algum tratamento de recuperação (tais como desagregação de grumos, remoção de poeiras e materiais metálicos). Por sua vez, a regeneração envolve um processo mais complexo, com a limpeza superficial dos grãos (destacamento das substâncias aderentes) e posterior remoção destas partículas resultantes da limpeza. Este processo, ressalta Mariotto (2000), tem como objetivo conduzir a areia usada à condição de nova. Em outras palavras, areia é considerada regenerada quando permitir a substituição parcial da areia nova sem detrimento da qualidade dos moldes e machos produzidos.

Lahl (1991, p.185) ressalta que a regeneração conduz não só à vantagens econômicas, mas também ecológicas, uma vez que areias de fundição podem conter hidrocarbonetos poliaromáticos (PAH), muitos destes com elevado potencial carcinogênico.

Para Silva et al. (1999, p.610), existem diversos métodos de regeneração das areias de fundição, tais como processos de recuperação mecânica, a úmido, térmica e termo-mecânica. O grande problema, citado pelos autores, consiste no fato que não existe um método ideal de regeneração das areias. Os pré-requisitos das matérias-primas e do sistema aglomerante, envolvidos no processo de confecção dos moldes, são muito diferenciados. Isto faz com que uma solução ideal para um determinado tipo de areia gerada em uma fundição não seja adequada para outra.

Porém, a alternativa mais promissora para as areias de fundição parece ser mesmo o processo de reciclagem externa das mesmas. Conforme ponderam Mariotto (2000) e Ceccatto (2003, p.24), atualmente os problemas ambientais decorrentes da geração e descarte destes resíduos encontram alternativa viável

justamente no processo de reciclagem. Por conseguinte, a busca de alternativas de utilização destes materiais passou a receber maior atenção. O item 3.3.1 deste capítulo descreve algumas destas alternativas.

### 3.2 ESCÓRIA GRANULADA 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 (Ceccatto,2003,p.27). A figura 4 ilustra o forno cubilô vertendo a escória produzida.



Figura 4: ferro fundido e escória sendo vertidos na lateral do forno cubilô

Existe um relação direta entre a qualidade do ferro fundido produzido, a escória gerada e a eficiência do forno cubilô. Sobre este aspecto, Caspers (1999, p.40) reitera que a escória deve:

- a) conter o mínimo possível de óxidos de ferro e manganês;
- b) não prejudicar o aumento de carbono e não aumentar a queima de silício e manganês;

- c) ocasionar a mínima incrustação sobre o refratário (corpo do forno, canal de vazamento e sifão de pressão);
- d) absorver o enxofre.

Miranda et al. (1998) ponderam que a escória de fundição é friável, o que permite a obtenção de partículas finas com tempos razoáveis de moagem. Sendo um rejeito industrial descartado diretamente na natureza, sob a forma de aterros, passa a tornar-se um problema ambiental.

A escória é vazada em um canal com água corrente, onde se solidifica e adquire forma próxima a de uma areia grossa. Conforme ratificam diversos autores (Uehara e Sakurai, 1996; Ceccatto, 2003; Reschke, 2003), a escória decorrente de fornos de fusão de ferro fundido, quando resfriada bruscamente, adquire uma forma amorfa (vitrea). Na figura 5 apresenta-se uma amostra da EGF.



Figura 5: aspecto da escória granulada de fundição após resfriamento

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 do material, simplificação nas condições de disposição e, até mesmo, produção de um material 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)

Rachner (2001, p.32) cita que nas instalações que entraram em operação recentemente, a escória é granulada e seca, sendo solidificada inicialmente sob a forma de cubos de aproximadamente  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ . Segundo o autor, a operação de granulação seca evita a formação de ácido sulfídrico, de odor desagradável, que é gerado no contato da escória com a água.

Escórias granuladas de fundição diferem quimicamente de outras escórias já utilizadas em cimentos e concretos, como por exemplo escórias de alto-forno, provenientes da produção de ferro-gusa. Sobre este aspecto, Stroup et al (2003) consideram que:

escórias granuladas de fundição em cubilô contém mais sílica e menor quantidade de óxido de cálcio do que escórias de alto-forno. Enquanto alto-fornos a coque operam utilizando escórias básicas, fornos cubilôs geralmente operam usando uma escória ácida para a produção de ferro fundido cinzento. (Escórias básicas são usadas eventualmente em fornos cubilôs para a produção de ferros dúcteis, pois a escória básica remove o enxofre do cubilô durante o processo de fusão)

Operações em alto-fornos produzem aproximadamente 30% de escória por tonelada de ferro produzido, ao passo que em fornos cubilôs se produz 5% a 6% de escória por tonelada de ferro. (STROUP et. al, 2003) Citando Meyst (1984), Ceccatto (2003, p.31) coloca que *“a taxa de escória granulada de fundição gerada pode variar muito dependendo da quantidade de calcário e outros materiais de carga, bem como da qualidade destes materiais (ocorrência de impureza, areia)”*.

Os três principais componentes da escória de forno cubilô, segundo Moraes (2000, p.13), são: a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), proveniente do desgaste do refratário; a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), originada também do refratário, da cinza de coque e da areia aderente ao materiais de carga; por fim, o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), originado do calcário. A relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  é o que confere o caráter de acidez da escória gerada. A tabela 1 ilustra uma composição química típica de escória de forno cubilô, citado pela *European IPPC Bureau* (2002):

Tabela 1: composição química típica de uma escória de cubilô (*European IPPC Bureau, 2002*)

<b>Composto</b>	<b>%</b>
SiO <sub>2</sub>	45-55
CaO	25-40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8-20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1-3
MgO	1-4
MnO	1-6
Sulfetos	<1
TiO <sub>2</sub>	<1
ZnO	<1

Hooton (1987,p.249) comenta que o estado físico de uma escória é fundamental na consideração das suas eventuais propriedades cimentícias. Escórias resfriadas lentamente ao ar dispõem de tempo suficiente para que o arranjo molecular de seus compostos se organize de maneira cristalina. Infelizmente, esta composição cristalina possui pequena ou nenhuma capacidade cimentícia. Contudo, quando rapidamente resfriada, as moléculas de escória não conseguem ter tempo para cristalizarem-se. Como resultado, a estrutura desorganizada das moléculas é retida em um estado amorfo (vítreo) metaestável. Esta condição é particularmente interessante, pois pode conferir à escória propriedades cimentícias.

Ambientalmente, a escória é classificada, segundo a NBR 10004 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987c) como um resíduo classe III - inerte. A norma classifica os resíduos sólidos em três classes: classe I - perigosos; classe II, não-inertes; classe III – inertes. Resíduos são considerados perigosos quando não se enquadram em limites de inflamabilidade, corrosividade, toxicidade ou patogeneidade. Por sua vez, resíduos não-inertes não são considerados necessariamente perigosos, mas podem apresentar solubilidade em água ou combustibilidade. Resíduos inertes, como a EGF, não apresentam perigo de solubilização de elementos químicos perigosos acima dos padrões de potabilidade da água. Esta condição foi comprovada pelos trabalhos de Ceccatto (2003) e Reschke (2003) através de ensaios de caracterização, lixiviação e solubilização da mesma EGF utilizada neste trabalho.

### 3.3 PANORAMA DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO

O Brasil ocupa uma posição de relativo destaque na produção de metais fundidos. Conforme demonstra a tabela 2, são produzidos anualmente mais de um milhão e seiscentas mil toneladas, o que coloca o país entre os dez principais produtores mundiais.

Tabela 2: produção mundial de fundidos (base 1997)

<b>Colocação</b>	<b>Países</b>	<b>Produção (t)</b>
1º	Estados Unidos	14.333.000
2º	China	11.080.442
3º	CEI (ex-URSS)	8.895.000
4º	Japão	7.082.427
5º	Alemanha	4.120.048
6º	Índia	3.385.900
7º	França	2.433.951
8º	Itália	2.243.986
<b>9º</b>	<b>BRASIL</b>	<b>1.657.993</b>
10º	Coreia	1.554.500
11º	Reino Unido	1.453.100
12º	Taiwan	1.390.908
13º	México	1.227.000
14º	Ucrânia	998.800
15º	Turquia	941.599

Fonte: Revista Modern Casting/Dezembro de 1998

Historicamente, as fundições adotam opções de reutilização benéfica dos resíduos de maneira isolada (Olenbush, 1999), o que faz com que as boas práticas existentes muitas vezes não se difundam, dificultando a criação de uma referência específica para a reciclagem nestas indústrias.

Nacionalmente, ainda há muito por se fazer no sentido de se viabilizar a gestão de resíduos de fundição como subprodutos de uso disseminado na construção civil. Para Kauffman et al. (1996) a existência de barreiras criadas pelo gerador, regulador e possível usuário do resíduo determina a dificuldade de que ocorra um uso benéfico para o resíduo de fundição.

Moraes (2002) coloca que resíduos como escórias, em especial as produzidas por forno cubilô, já podem ser recicladas em cimentos e concretos, pois a granulação através de resfriamento brusco permite a amorfização da escória, o que é uma

das características desejadas. O mesmo autor apresenta ainda alguns exemplos de reciclagem interna e externa de resíduos de fundição, descritas na tabela 3:

Tabela 3: exemplos de reciclagem interna e externa de resíduos sólidos de fundição (adaptado de Moraes,2002)

<b>Resíduo</b>	<b>Aplicação</b>
Areia usada – verde ou quimicamente ligada	Recuperação – Regeneração
	Blocos
	Tijolos
	Concreto
	Asfalto (Massa Asfáltica)
	Sub-base de pavimentos asfálticos
	Sílica para produção de clínquer
	Agricultura (corretivo de solo)
	Cobertura de aterros
	Cobertura de canais de corrida de altos fornos
Barragens e diques	
Escória	Cerâmica (Porcelana)
Cavaco <sup>6</sup>	Sucata para fusão

Olenbush (1999) cita esforços de grupos de pesquisa específicos nos Estados Unidos para estimular a reciclagem na Indústria da Fundição, disseminando modelos de cooperação entre empresas do setor e usuários finais dos subprodutos gerados. Estes modelos estão descritos a seguir:

a) modelo “ *do it yourself* ”: comum em empresas com grande volume de saída de materiais, desenvolvem na própria empresa quadros de especialistas ambientais, bem como pesquisas e testes para projetos de reciclagem e reutilização.

b) modelo de parceria: nesta abordagem, as fundições associam-se à empresas de outros setores com experiência no mercado de reciclagem, como cimenteiras, fornecedores de concreto usinado, produtores de asfalto, produtores de artefatos de concreto e outros, que passam a fazer o beneficiamento (britagem, transporte) dos resíduos gerados. Esta abordagem apresenta muitas vantagens para

<sup>6</sup> “Cavacos” são resíduos provenientes da usinagem das peças de ferro fundido.

as fundições, que podem aprender com seus parceiros as especificações e requisitos para utilização dos seus subprodutos.

c) Modelo Cooperativo: considerado o modelo mais promissor, embora pouco compreendido. Preconiza o manuseio e processamento dos subprodutos de maneira cooperativa pelas diferentes empresas de fundição. É o modelo mais adequado para pequenas fundições, onde se deseja reduzir o custo de reciclagem por tonelada.

### 3.3.1 Utilização de Areia de Fundição

A ABIFA - Associação Brasileira de Fundição (1999, p.37) ressalta que ainda há carência de experiências no país, quanto ao uso da areia de fundição na construção civil. A mesma publicação considera que o assunto é incipiente mesmo nos Estados Unidos e na Europa.

Os dados disponíveis, segundo a ABIFA (1999), relatam experiências de uso de areia de fundição (substituindo o agregado miúdo) em concretos de baixa resistência para enchimento. Também cita a utilização em pavimentação asfáltica, artefatos de concreto e como fonte de sílica para o cimento Portland.

Ceccatto (2003) faz uma revisão muito pertinente de alguns autores que buscaram alternativas de reciclagem de areias de fundição, principalmente na área de construção civil, identificando possibilidades claras de reciclagem deste material na própria indústria de fundição, bem como na indústria da construção civil.

Como exemplos de trabalhos desenvolvidos com areia de fundição, pode-se citar o realizado por Watanabe et al. (2002). Os autores avaliaram a utilização de areia de fundição como agregado miúdo na fabricação de blocos intertravados de concreto para pavimentação. O estudo, que englobou quatro diferentes teores de substituição da areia comum por areia de fundição (25%, 50%, 75% e 100%) apresentou resultados bastante satisfatórios. Como resultado, observaram que o teor de 25% de substituição de areia comum por areia de fundição apresentou melhores resultados, quando avaliados na sua resistência à compressão.

Problemas com a hidratação de cimento foram também observados, principalmente em teores mais elevados de substituição. Isto ocorreu devido à presença de bentonita contaminando o material. Porém, nos teores de 25% esta presença não chegou a ser significativa, não prejudicando o desempenho dos blocos.

Aranzabal et al. (1999) testaram a areia de fundição como agregado em misturas asfálticas e concretos, além da produção de cimento. A possibilidade de utilização em concretos foi constatada a partir dos resultados satisfatórios de resistência à compressão, tração e permeabilidade, quando comparados aos concretos referência. No caso de misturas asfálticas, teores próximos de 10% foram os que apresentaram melhores resultados.

A grande quantidade de sílica presente na composição das areias de fundição as torna, segundo Regan et al.(1998), potenciais fontes deste composto para a produção de cimento Portland. Entretanto, os autores ressaltam que alguns quesitos técnicos devem ser observados, tais como nível de álcalis menor que 0,1% e um mínimo de 80% de sílica presente na areia, dentre outras características físico-químicas.

### 3.3.2 Utilização de Escórias de Fundição

Já foi comentado que escórias metalúrgicas podem ser reprocessadas em materiais para a indústria da construção. Em seu processo de geração, estas escórias podem ser resfriadas lentamente, resultando em compostos cristalinos, ou resfriadas de forma brusca. Este resfriamento brusco, através de um canal com água ou por aspersão, confere uma estrutura vítrea (amorfa) à escória, sendo este processo chamado simplesmente de *granulação*. O material granular formado pode ter uma grande variedade de aplicações, como fillers para concretos e produção de cimentos e blocos (MISHULOVICH et al.<sup>7</sup>, 1996 apud PIORO E PIORO, 2004).

---

<sup>7</sup> Mishulovich, A., Bhatti, J.I., Rue, D., Olabin, V.M., Pioro, L.S. Manufacture of supplementary cementitious materials from industrial wastes. In: **Proceedings of the 1996 International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies**, Savannah, Georgia, USA, 1996

Sobre esta perspectiva, escórias granuladas de fundição (EGF) também podem apresentar-se como potenciais subprodutos para fabricação de materiais de construção.

Para Boehm (2003), a escória de forno cubilô (avaliada em seu estudo) tem valor comercial através de reciclagem, não sendo mais aplicável a consideração de custos de disposição para este tipo de resíduo, na região analisada (Estado americano de Wisconsin). Analisando comparativamente fornos cubilôs e fornos elétricos de média frequência, a mesma autora considera que os custos de tratamento e disposição do pó de fundição e das cinzas (que contenham metais pesados) são menores para os fornos elétricos. Todavia, fornos de média frequência não produzem escórias com valor comercial para reutilização.

Olenbush (1999) cita a parceria entre fundições americanas e indústrias de reciclagem, produtores de asfalto, cimenteiras, produtores de artefatos (tijolos e blocos) de concreto, dentre outros, como exemplos bem sucedidos de interação entre os setores. A autora ilustra que em 1984, a fundição americana Wheland associou-se à fornecedora de agregados Vulcan, que britava a escória granulada de forno cubilô, revendendo-a como agregado para base de rodovias e para a produção de asfalto. Recentemente, a Vulcan associou-se à uma das principais cimenteiras americanas, fornecendo matérias-primas para a produção de cimentos.

Aderibigbe e Ojobo (1982) avaliaram as propriedades pozolânicas de escórias de forno cubilô e seu efeito como substituição parcial do cimento em argamassas. A escória estudada pelos autores apresentou baixos valores de índice de atividade pozolânica (25%), o que teve reflexo negativo na resistência das argamassas estudadas.

Porém, o exemplo mais promissor é o apresentado por Stroup et al. (2003), que desenvolveram e patentearam nos Estados Unidos um cimento com escória de forno cubilô. Segundo os autores, a utilização destas escórias granuladas combinada ao cimento proporcionou concretos com acréscimo de resistência em idades avançadas (28,56 e 91 dias), bem como resistência à reação álcali-agregado e ataque de sulfatos. Nos estudos realizados, as diferentes misturas apresentaram adições de escória da ordem de 30% à 40% em relação ao

cimento Portland como sendo as composições ideais do material. Em todos os casos estudados, um parâmetro importante considerado foi a superfície específica da escória utilizada, que ficou sempre acima de 4000 cm<sup>2</sup>/g, chegando até à 6000 cm<sup>2</sup>/g em alguns traços estudados.

No Brasil, estudos englobando a utilização de escórias granuladas de fundição (EGF), são recentes, e sua disseminação como subproduto para materiais de construção depende de diversas avaliações. Recentemente, Ceccatto (2003) foi uma das pioneiras, em termos nacionais, na pesquisa de propriedades mecânicas de concretos com substituição parcial de cimento por escórias granuladas de fundição. Em seu trabalho, a autora avaliou diferentes teores de substituição de cimento por escória, chegando a resultados bastante satisfatórios mesmo em teores elevados (até 50% de escória em relação ao cimento). Apresentou também um comparativo econômico, demonstrando que o custo de concretos com EGF é bastante vantajoso, gerando uma economia potencial de até 25,87% no consumo de cimento, para um mesmo patamar de resistência, adicionando até 50% de escória (estimado em termos de custo dos materiais empregados por MPa do concreto).

Reschke (2003) avaliou a durabilidade de concretos estruturais produzidos com EGF, na questão de penetração de cloretos e de absorção capilar. Seus estudos demonstraram que a EGF não prejudica as características de qualidade e durabilidade dos concretos produzidos, tendo, inclusive, ganhos de durabilidade. A autora demonstra que, comparando uma mesma taxa de absorção ou de penetração de cloretos, é possível ter economia no consumo de cimento, utilizando escória granulada de fundição, sem perda de durabilidade do concreto produzido.

## 4 BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

Neste capítulo são comentadas as principais características do mercado de blocos intertravados de concreto, bem como a questão da sua produção.

### 4.1 A UTILIZAÇÃO DE BLOCOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO

A produção de artefatos de concreto tem ganho progressivamente espaço como solução para a pavimentação de áreas urbanas. Isto se deve não só pelo aumento dos esforços de empresas e entidades representativas do setor em incentivar sua utilização, mas também pelas vantagens técnicas inerentes ao sistema.

Segundo artigos recentemente publicados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (2002b), existem no mercado diversos tipos de blocos, com diferentes formatos e espessuras. O seu uso não tem se restringido somente a vias de tráfego de veículos. O bloco de concreto pigmentado, um desenvolvimento dos anos 90 abriu novas possibilidades de uso em projetos paisagísticos. No Brasil e em todo o mundo, os blocos (também conhecidos por pavers) tem entrado cada vez mais em projetos de revitalização urbana. Este dado pode ser claramente notado, pois:

em países europeus, o paver tem seu uso disseminado há décadas. Na Alemanha, onde foi criado na década de 40, aplicam-se cerca de 40 milhões de m<sup>2</sup> em áreas diversas. Aí se incluem desde vias de tráfego pesado ou pátios industriais, até peças e ruas residenciais. Nestes casos, é a solução mais indicada em razão da superfície anti-derrapante e por permitir a drenagem das águas da chuva (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002b).

Muitos trabalhos e publicações chamam a atenção para a questão da impermeabilização das áreas urbanas, que vem progressivamente causando problemas à sociedade através do aumento das enchentes e alagamentos nas cidades. Para Araújo et al. (2000,p.1), as ações públicas para questões de drenagem urbana estão voltadas, na maioria das vezes, tão somente para soluções estruturais como redes de drenagem, que simplesmente transferem a

inundação de um ponto para outro das bacias. Estas ações de visão local atuam sobre o efeito e não sobre as causas do aumento da vazão, que é o aumento das superfícies impermeáveis.

Sobre esta visão, a utilização de pavimentos semi-permeáveis, como blocos de concreto, pode contribuir sobremaneira para a minimização dos efeitos das enchentes sobre as cidades. Nos estudos realizados por Araújo et al. (2000), um pavimento de concreto impermeável gera um acréscimo no coeficiente de escoamento superficial em 44% em relação à um solo compactado, ao passo que em um pavimento semi-permeável com blocos intertravados de concreto este valor cai para apenas 22%.

#### 4.2 PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO

Para Rodrigues (1995, p.1) a consolidação do mercado para blocos de concreto depende da produção de elementos de boa qualidade e com resistência adequada. Por essa razão, torna-se imperativo que a tecnologia de fabricação de tais elementos garanta todos os requisitos técnicos exigidos.

Frasson Júnior (2000, p.6) diferencia os concretos ditos plásticos dos concretos "secos" (concretos com menor quantidade de água na mistura). As características de cada um seriam bastante diversificadas. Os concretos plásticos seriam os concretos convencionais utilizados em obras de concreto armado, concretos fluidos (auto-adensáveis) e o concreto graute utilizados em obras de alvenaria estrutural. Por sua vez, nos concretos "secos" estariam enquadrados o concreto projetado, concreto para blocos, tubos e pavimentos e o concreto compactado à rolo. Para Tango (1994, p.21), a diferença fundamental entre ambos está no fato de que em concretos plásticos, a pasta de cimento ocupa praticamente todos os espaços deixados pelos agregados, ao passo que concretos "secos" (especialmente os utilizados para blocos) existe presença de ar em quantidade significativa na mistura.

Frasson Júnior (2000, p.14) considera também que a produção de blocos de concreto envolve tecnologia peculiar - concretos que via de regra não seguem a Lei de Abrams. Em outras palavras, não há razão direta entre aumento do

consumo de água e perda de resistência mecânica. Como tais elementos são produzidos, em geral, em equipamentos de vibro-prensagem, muitas vezes um consumo maior de água pode contribuir para um melhor adensamento. Por outro lado, conforme ressalta Vargas (2002, p.71), se houver excesso de água na dosagem, podem ocorrer problemas de desmoldagem e deformações indesejadas nas peças. Para Tango (1994 p.26) a quantidade de água de cada mistura experimental deve ser a maior possível, suficiente para que os blocos não se desagreguem e não tão grande que faça com que os mesmos tenham dificuldade de desforma por aderência da mistura aos moldes, ou perda do formato adequado. Conseqüência direta disso, o maquinário utilizado passa a ser fundamental na qualidade final do bloco produzido.

Para a fabricação de blocos de concreto utiliza-se cimento Portland, agregado miúdo (areia natural e/ou artificial) e agregado graúdo (pedrisco)(VARGAS, 2002, p.51). Conforme Juvas (1991) pequenas mudanças nas matérias-primas causam grandes modificações na trabalhabilidade e na qualidade do produto final. A excelência das propriedades do produto final tem relação direta com a apropriada compactação.

A dosagem de blocos de concreto, seja para pavimentação ou para alvenaria, ainda não tem uma metodologia consagrada. Muitas das técnicas existentes ainda estão baseadas em práticas recomendadas pelos fabricantes de vibro-prensas ou produtores de blocos. Frasson Júnior (2000) faz uma análise crítica das principais técnicas existentes, procurando avaliar as principais características de cada método. Em todas elas, contudo, há pontos positivos e negativos, o que dificulta a escolha de uma delas como mais adequada do que outra.

Dentre os principais métodos existentes, podemos citar o proposto por Rodrigues (1995). Sua metodologia, específica para peças de pavimentação utilizando vibro-prensas, pressupõe a verificação da melhor relação pedrisco/areia, que seria obtida analisando o menor volume de vazios de diferentes misturas entre os dois materiais. Outro ponto relevante do ressaltado pelo autor é que o valor de "m" (areia+brita) vai depender do maquinário utilizado. Conseqüência disso, o consumo de cimento também irá variar, diminuindo à medida que as vibro-prensas possuam maior capacidade de compactação do concreto. Para Rodrigues (1995), o consumo de cimento em geral irá variar entre 210 e 436 kg/m<sup>3</sup>, para

um nível de resistência entre 25 a 35 MPa. Frasson Junior (2000,p. 39) comenta que este é um método fácil e prático, porém é falho ao não levar em conta a granulometria dos agregados nem considerar o cimento como um fino importante na diminuição dos vazios.

Tango (1994) propõe uma adaptação do método IPT/EPUSP para concretos secos em blocos estruturais. Apesar da dosagem ser mais criteriosa, a metodologia não identifica a necessidade de avaliar a capacidade do maquinário utilizado de conferir resistência às peças produzidas. Com isso, pode-se chegar a dosagens idênticas para vibro-prensas com capacidades completamente diferentes de conferir resistência e acabamento aos artefatos de concreto produzidos.

Frasson Junior (2000) cita ainda duas metodologias desenvolvidas pela Besser Company e pela Colúmbia, fábricas de vibro-prensas. A primeira se preocupa com a granulometria final das misturas, através de um módulo de finura que deveria estar entre 3,60 e 3,75. Já a segunda leva em conta a influência dos agregados nas diferentes propriedades dos concretos "secos".

Marques Filho (2001) faz considerações sobre concretos "secos" utilizados em CCR (concreto compactado a rolo). Embora a tecnologia de CCR envolva muitas particularidades inerentes da própria técnica, sua dosagem é, via de regra, similar a de um concreto seco, tal qual o utilizado em pré-fabricados. As diferenças básicas estão no diâmetro maiores dos agregados utilizados pelo CCR e pelo menor consumo de cimento (em geral situado em uma faixa de 100 à 150 kg/m<sup>3</sup>). As metodologias existentes para dosagem de CCR também são variadas, e levam em conta o teor de pasta, adições minerais, materiais disponíveis na região e o grau de compactação potencialmente atingível.

É importante, quando do proporcionamento dos materiais, que três pontos sejam considerados: satisfação dos parâmetros mecânicos especificados em projeto, trabalhabilidade compatível com o processo executivo e obtenção da mistura mais econômica possível. (MARQUES FILHO, 2001)

Por sua vez, a resistência à compressão é normalmente considerada como uma propriedade muito importante do concreto, visto que está diretamente relacionada com a estrutura interna do material, fornecendo uma estimativa do desempenho do concreto tanto em termos mecânicos bem como, indiretamente,

de sua durabilidade (DAL MOLIN, 1995). Ainda nesse sentido, Helene e Terzian (1992) consideram evidentemente importante a consideração da resistência como importante parâmetro de desempenho, que possui reflexos diretos na segurança das estruturas de concreto. No caso específico de blocos para pavimentação, a preocupação relativa com a resistência mecânica estende-se não somente à capacidade de suporte do pavimento, fruto de sua resistência à compressão associada às condições da base sobre a qual está assentado. O trânsito freqüente de veículos e pedestres gera um desgaste superficial das peças, o que faz com que a resistência ao desgaste por abrasão dos blocos também seja um importante parâmetro a ser considerado.

#### 4.3 CONSIDERAÇÕES A PARTIR DAS PROPOSIÇÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma vez verificada a questão da reciclagem nas indústrias, dentro de um paradigma de sustentabilidade, e analisando as características peculiares da tecnologia de blocos intertravados de concreto, pode-se partir para a proposição de um projeto que conjugue ambos. Para tal, a revisão bibliográfica dos capítulos anteriores procura identificar não só as características da EGF como um material passível de utilização mas remete também, ao contexto em que ele pode ser inserido, bem como os benefícios ambientais decorrentes e as experiências bem sucedidas de outros autores, com a EGF e outros tipos de resíduos.

Quando algum resíduo é gerado, mesmo depois da otimização dos processos produtivos, a reciclagem adquire grande papel na preservação do meio ambiente (CECCATTO, 2003, p.59). Por isso, é imprescindível buscar alternativas de aproveitamento de materiais que são simplesmente descartados depois de gerados, como é o caso das escórias.

Conforme abordado no capítulo 2, não existe ainda uma interação benéfica em larga escala entre as indústrias de fundição e da construção. Embora Olenbush (1999) cite os exemplos de boas práticas, estas ainda são muito tímidas frente ao potencial dos resíduos de fundição gerados. No Brasil, esta falta de comunicação apresenta-se ainda mais pronunciada. A existência de produtos

substitutos - subprodutos já consagrados como escórias de alto-forno, cinzas volantes, sílica ativa – pode ser um destes entraves, uma vez que a indústria da construção prefere o uso de materiais já conhecidos. Por outro lado, Hiltunen et al. (1992), citados no capítulo 2, corroboram ao afirmar que a indústria de fundição desconhece, ou mesmo ignora, os requisitos necessários para reutilização de resíduos, preferindo simplesmente dispô-los em aterros. A pressão dos órgãos ambientais sobre ambos os setores (construção e fundição), no entanto, obriga a uma mudança de postura. Este ciclo de interatividade entre os setores pode ser visualizado através da figura 6.

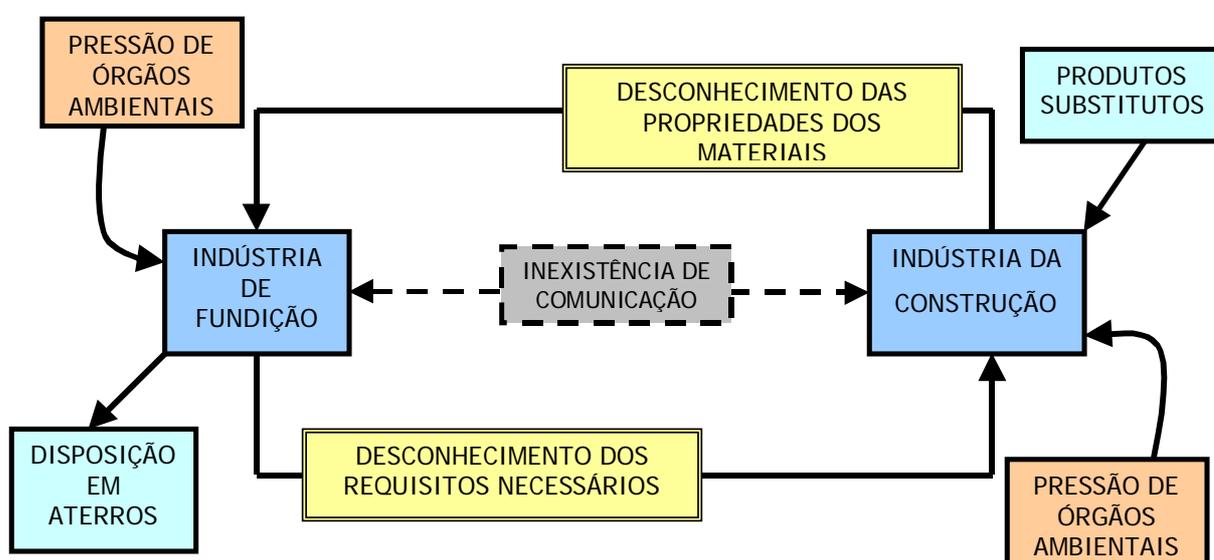


Figura 6: modelo representativo da situação atual da interação entre os setores da Construção Civil e Indústria de Fundição para reaproveitamento de resíduos

Assim sendo, a interação entre os setores pode gerar benefícios inegáveis para ambos. No caso específico das escórias de fundição, Ceccatto (2003, p.59) complementa:

a reciclagem de 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 ambientais, através de incentivos fiscais, a fim de aprimorar cada vez mais a concretização de práticas de qualidade

ambiental. Já para a indústria de construção civil, o uso de subprodutos industriais como matéria prima (como no caso da EGF) permitiria, além da conservação de fontes naturais não renováveis, a redução de impacto ambiental e economia de energia neste setor.

Dentre os principais constituintes do concreto (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água, adições) o que sem dúvida representa maior custo é o cimento, principalmente devido ao consumo de recursos naturais e energia envolvidos no seu processo de fabricação. Pesquisas que consigam substituir parte do cimento consumido por outro material, sem perda significativa das características de resistência e durabilidade, estarão gerando benefícios econômicos claros, além dos ambientais. Ainda sobre esta perspectiva, Aitcin (2000) enfatiza como elemento fundamental de desenvolvimento futuro da indústria da construção a consideração dos custos do concreto por MPa alcançado, ou então por ano de vida útil estimado pelas estruturas. Esta nova visão deveria prevalecer em detrimento da consideração pura e simples do custo do concreto por m<sup>3</sup>.

Por outro lado, materiais que substituam os agregados constituintes do concreto (areia, brita) também geram benefícios econômicos e ambientais. Além do mais, a substituição parcial dos agregados, embora tenha um impacto menor no custo final dos concretos produzidos, pode inclusive ser mais rapidamente assimilada pela indústria da construção civil. Isto porque não haveria necessidade de um passo intermediário como a moagem de materiais, necessários no caso da substituição parcial de cimento – quando da utilização de materiais de granulometria mais elevada.

Materiais com características vítreas (amorfas) podem apresentar características reativas, adquirindo propriedades pozolânicas e/ou cimentíceas. Escórias que sofrem um processo de granulação (através de resfriamento brusco), em particular, se enquadram nesta categoria. O exemplo mais clássico são as escórias de alto-forno, que têm seu uso disseminado e consagrado há muitos anos em cimentos e concretos.

A EGF, sendo uma escória resfriada também de maneira brusca (sobre um canal de água corrente), possui estrutura amorfa. Esta característica, conjugada às suas propriedades físico-químicas, a credencia como um potencial subproduto

para uso em concretos. O sucesso apresentado nos trabalhos de Ceccatto (2003), Reschke (2003) e Stroup et al. (2003) atestam estas considerações.

Nesse contexto, este trabalho procura avaliar a questão das escórias granuladas de fundição (EGF), enquanto materiais com amplo potencial de utilização em blocos intertravados de concreto para pavimentação. Para tal, a proposta de projeto experimental está descrita a seguir.

## 5 ESTUDO DA EGF EM BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

Neste capítulo é apresentada a definição dos parâmetros experimentais, que culminaram neste trabalho de utilização da escória granulada de fundição em blocos de pavimentação. O capítulo contempla também o programa experimental e a metodologia de trabalho proposta e realizada.

### 5.1 PLANEJAMENTO DOS PARÂMETROS EXPERIMENTAIS

Para Cervo e Bervian (2002, p.68), uma pesquisa experimental caracteriza-se por manipular diretamente as variáveis relacionadas ao objeto de estudo. A relação entre causa e efeito de um fenômeno se dá pela manipulação destas variáveis, através da criação de situações de controle.

Ribeiro e ten Caten (2001) avaliam que *"não é recomendável buscar soluções de um problema apenas na intuição, principalmente devido às decisões importantes que derivam de resultados experimentais, e do custo envolvido nos experimentos"*. Conseqüência disso, o planejamento de experimentos torna-se fundamental, pois os resultados encontrados tendem a ser mais eficientes em termos de informação em relação a qualquer outra seqüência não estruturada. Nesse sentido, pode-se afirmar que:

no momento em que se faz uso de métodos estatísticos para avaliação de experimentos, ressalta-se a importância de um planejamento prévio para que se obtenha, a um custo mínimo, a maior quantidade de informações sobre as características dos fatores considerados. (...) Além disso, ensaios não sistematizados, quando muitos fatores estão envolvidos, inviabilizam a análise estatística posterior dos dados. (DAL MOLIN, 1995)

Ribeiro e ten Caten (2001) reiteram a importância de definir-se uma seqüência de ensaios econômicos e eficientes, com uma avaliação estatística dos resultados que respalde cientificamente o experimento. Para tanto, definem uma série de parâmetros a serem considerados, quais sejam:

- a) variáveis de resposta (dependentes): são aspectos que quantificam a qualidade ou desempenho de um produto e que podem ser medidos;
- b) fatores controláveis (independentes): parâmetros do processo que são estudados em diferentes níveis, podendo ou não ter efeito sobre as variáveis de resposta;
- c) fatores constantes: parâmetros que não entram no experimento, mas que podem também influenciar nas variáveis de resposta, devendo ser mantidos constantes;
- d) fatores não controláveis (ruído): Variáveis sem possibilidade de controle experimental, são responsáveis pela variabilidade inerente ao processo experimental.

O conjunto de todos estes parâmetros é chamado de *parâmetros de sistema*. A correta definição destes é que permitirá que a expressão dos resultados se aproxime o máximo possível do comportamento que se deseja avaliar, sem perda de informação.

### 5.1.1 Escolha das Variáveis do Projeto Experimental

Feitas tais considerações, foram definidas as variáveis do projeto experimental. Como variáveis de resposta, definiram-se as seguintes características de qualidade a serem avaliadas:

- a) resistência à compressão ( $f_c$ );
- b) resistência à abrasão, expressa em termos de índice de desgaste por abrasão;
- c) absorção de água.

Uma vez definidas as variáveis de resposta, foram escolhidos os fatores controláveis, dos quais este trabalho procura avaliar a significância sobre as variáveis de resposta:

- a) teor de substituição de cimento ou agregado miúdo (10, 30 e 50%);
- b) idade de ruptura dos blocos (3, 7, 14 e 28 dias);
- c) posição dos blocos na vibro-prensa.

A escolha do intervalo de teores entre 10 e 50% se deu por dois motivos principais. Primeiramente, o objetivo do trabalho era o de investigar um espectro grande de possibilidades de utilização da EGF, tanto em teores baixos como em teores mais altos de substituição parcial. Ceccatto (2003) e Reschke (2003), em trabalhos anteriores com a mesma escória de fundição, tomaram como base as prescrições sugeridas pela NBR 11578 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991a), que estipula um valor entre 6 à 34% de escória de alto forno na constituição do cimento Portland composto (CP-II-E). As autoras escolheram, assim, um ponto médio de 30%, variando em 20% para mais e para menos a substituição do cimento por EGF.

Além disso, outro ponto considerado foi a necessidade de volumes muito grandes de escória para mais de três níveis, o que aumentaria muito a matriz experimental, e conseqüentemente a quantidade de blocos a serem produzidos.

Definidos os percentuais de substituição parcial, esta foi realizada em volume, de modo a manter as mesmas condições de concretagem, para um mesmo volume de concreto. Este procedimento se fez necessário, dada as diferenças entre as massas específicas do cimento e da escória de fundição. Deste modo, o cálculo da massa equivalente ao percentual de cimento substituído por EGF foi dado pela fórmula:

$$m_e = (\gamma_e/\gamma_c) \times m_c \times \%Subst.$$

Onde:

- a)  $m_e$  = massa de escória granulada de fundição (em kg), correspondente à porcentagem de substituição sobre o volume de cimento;

b)  $(\gamma_e/\gamma_c)$  = relação entre as massas específicas (em  $\text{kg}/\text{dm}^3$ ) de escória granulada de fundição ( $\gamma_e$ ) e de cimento ( $\gamma_c$ );

c)  $m_c$  = massa de cimento (em kg)

d) %Subst = teor de substituição de cimento por escória (10,30 ou 50%)

Procedimento similar foi adotado quando da substituição de parte do agregado miúdo (areia média) pela escória, sendo que apenas os fatores " $m_c$ " e " $\gamma_c$ " foram substituídos pelos valores equivalentes de areia média, e não de cimento.

A escolha das idades de ruptura foi feita a partir das especificações necessárias para blocos pré-fabricados. Além da idade característica de 28 dias, foram escolhidas idades de 3, 7 e 14 dias. Isto porque blocos de concreto em geral necessitam de resistências altas já em baixas idades, por uma questão técnica e também comercial. Com isso, procurou-se avaliar o comportamento dos blocos produzidos já nos primeiros dias de cura. Novamente, a incursão de mais níveis de análise demandaria um volume maior de materiais (EGF, cimento, agregados), o que poderia inviabilizar o projeto experimental.

Finalmente, o último parâmetro avaliado foi a posição dos blocos na máquina de vibro-prensagem. Embora não seja pretensão deste trabalho avaliar condições de produção dos blocos, esta se fez necessária. Isto porque, conforme estudos de caso realizados em fábricas pelo Núcleo de Pesquisa em Construção Civil da UFSC e citados por Frasson Junior (2000), muitas vezes a posição das fôrmas na máquina gera blocos com resistências diferenciadas. Para que esta possível dispersão dos resultados não afetasse a análise da EGF na resistência dos blocos, a posição das peças foi avaliada, na prensa utilizada, com o intuito de verificar se era significativa sua influência ou não.

A relação água/aglomerante ( $a/agl$ ) não foi colocada como um fator controlável do projeto experimental, bem como o teor de umidade (H%). Isso porque procurou-se trabalhar com o ajuste otimizado da máquina vibro-prensa, procurando a maior umidade possível para compactação sem perda de forma dos

blocos. Além disso, optou-se por não realizar-se fracionamento<sup>8</sup> do projeto. Com isso, a inclusão de mais um fator controlável na matriz experimental demandaria um volume muito elevado de materiais para a execução dos ensaios.

Uma vez definida a matriz experimental, a análise estatística dos dados foi realizada através da comparação múltipla de médias pelo teste ANOVA. O ANOVA permite que se possa avaliar não só o efeito isolado de uma variável independente sobre a dependente, mas também a interação entre variáveis. Neste trabalho, as análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software *STATISTICA (versão 5.0)*. Analogamente, fez-se o uso do software *Statgraphics plus* para a modelagem matemática do comportamento da resistência à compressão ( $f_c$ ) frente aos fatores controláveis. Nesta etapa procurou-se ajustar uma equação que fosse representativa do comportamento dos blocos de concreto, expresso nos resultados experimentais. Em outras palavras, procurou-se um ajuste satisfatório do coeficiente de determinação –  $R^2$ . Segundo afirmam Ribeiro e ten Caten (2000), o  $R^2$  representa percentualmente o quanto da variabilidade da variável de resposta é devida aos fatores controláveis, ou o quanto a equação ajustada explica a variação dos resultados.

## 5.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste item do capítulo cinco são explanados a caracterização dos materiais utilizados na fase experimental, bem como o processo de amostragem da EGF e os ensaios propostos e realizados.

### 5.2.1 Materiais Utilizados

A seguir estão caracterizados os materiais utilizados na fase experimental do trabalho.

---

<sup>8</sup> O fracionamento é um procedimento estatístico onde somente parte dos ensaios é realizado, sendo mais indicado para experimentos com cinco ou mais fatores controláveis.

### 5.2.1.1 Cimento

A escolha do tipo de cimento mais adequado deve sempre levar em conta quais as condições técnicas de desempenho necessárias, bem como a disponibilidade deste material na região. Em relação ao primeiro aspecto, para que se possa avaliar a real influência da EGF como substituição parcial (do cimento), é importante que o cimento utilizado também seja o mais puro possível. Desse modo, consegue-se avaliar a escória sem que o efeito de outras adições presentes interfira ou mascare o comportamento dos concretos moldados. Além disso, um aspecto importante diz respeito à observação da compatibilidade entre o tipo de cimento e os demais materiais (adições e aditivos principalmente), e entre o processo de cura utilizado, onde, dependendo das especificações, pode haver alterações nas propriedades dos blocos, afirmação confirmada por Sousa (2001, p.7)

Do ponto de vista da disponibilidade dos materiais, embora o Estado do Rio Grande do Sul seja predominantemente um consumidor de cimentos pozolânicos (CP-IV), esta realidade não se reflete nas principais indústrias de artefatos pré-moldados de concreto. Para a confecção dos blocos em empresas do Rio Grande do Sul são geralmente utilizados cimentos do tipo CP-II-Z, CP-V-ARI e CPV-ARI-RS - conforme classificação, respectivamente, das NBR 11578 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991a), NBR 5733 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991) e NBR5737 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992a).

Por conseguinte, optou-se pela utilização de um cimento CP-V-ARI, justamente por ser, dentre os disponíveis no mercado, o mais puro (livre de adições minerais), bem como por se constituir em um material comumente utilizado para confecção de pré-moldados de concreto. A tabela 4 apresenta as principais características do cimento CP-V-ARI utilizado para a confecção dos blocos.

Tabela 4: características do cimento CPV-ARI utilizado

<b>Compostos</b>	<b>Teor (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	26,70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,27
CaO	52,38
MgO	7,05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,60
SO <sub>3</sub>	4,80
Perda ao fogo	2,63
CaO livre	0,74
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,10
Finura #325	1,94
Finura (Blaine- CMK)	4837
Início de Pega (min)	198
Fim de Pega (min)	278

O uso dos cimentos de alta resistência inicial é particularmente interessante em pré-moldados de concreto. Isto porque é uma característica desejável que tais elementos adquiram resistências mais elevadas em baixas idades, uma vez que os tempos de desforma e cura são mais abreviados do que, por exemplo, concretos estruturais convencionais.

#### 5.2.1.2 Agregado Miúdo

Foram utilizadas duas areias para a confecção dos blocos, sendo uma areia média e outra areia fina (para correção do acabamento dos blocos). A areia média empregada neste trabalho é de origem quartzosa, provenientes do Rio Jacuí/RS, ao passo que a areia fina utilizada é de origem calcária. Os ensaios de caracterização, que incluem composição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima característica, foram realizados em conformidade com a NM 248 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001). A caracterização de ambas está exposta nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5: distribuição granulométrica e caracterização física da areia média utilizada

<b>Abertura</b>	<b>% retida</b>	<b>% acumulada</b>
<b>4,8 mm</b>	4	4
<b>2,4 mm</b>	9	13
<b>1,2 mm</b>	16	29
<b>600 µm</b>	25	44
<b>300 µm</b>	35	89
<b>150 µm</b>	11	100
<b>&lt; 150 µm</b>	0	100
Dimensão Máxima Característica (DMC): 4,8 mm		
Massa específica = 2,65 g/cm <sup>3</sup>		
Módulo de finura = 2,87		

Tabela 6: distribuição granulométrica e caracterização física da areia fina utilizada

<b>Abertura</b>	<b>% retida</b>	<b>% acumulada</b>
<b>4,8 mm</b>	0	0
<b>2,4 mm</b>	0	0
<b>1,2 mm</b>	0	0
<b>600 µm</b>	2	2
<b>300 µm</b>	36	38
<b>150 µm</b>	49	87
<b>&lt; 150 µm</b>	13	100
Dimensão Máxima Característica (DMC): 600 µm		
Massa específica = 2,83 g/cm <sup>3</sup>		
Módulo de finura = 1,28		

### 5.2.1.3 Agregado Graúdo

Foi utilizada neste trabalho a chamada brita zero (classificação segundo a NBR 7211 – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983) também conhecida comercialmente por pedrisco, desempenhando a função de agregado graúdo na dosagem dos blocos. Sua forma e granulometria devem garantir acabamento aos blocos. Neste trabalho, o pedrisco utilizado é de origem granítica, tendo sua granulometria exposta na tabela 7.

Tabela 7: distribuição granulométrica da brita utilizada

<b>Abertura</b>	<b>% retida</b>	<b>% acumulada</b>
<b>9,5 mm</b>	0	0
<b>6,3 mm</b>	33	33
<b>4,8 mm</b>	38	71
<b>2,4 mm</b>	21	92
<b>1,2 mm</b>	4	96
<b>600 µm</b>	1	97
<b>300 µm</b>	1	98
<b>150 µm</b>	1	99
<b>&lt; 150 µm</b>	1	100
Dimensão Máxima Característica (DMC): 9,5 mm		
Massa específica = 2,62 g/cm <sup>3</sup>		
Módulo de finura = 5,56		

#### 5.2.1.4 Água

A água utilizada nas concretagens foi a disponível para abastecimento local, fornecida pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre (DMAE).

#### 5.2.1.5 Escória Granulada de Fundição (EGF)

A EGF, tal qual mencionado no item 3.2 do capítulo 3, é um material classificado, através da NBR 10004 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987c) como classe III – inerte. Estudos realizados por Ceccatto (2003) e Reschke (2003) comprovaram, através de análise de lixiviação e solubilização, este caráter inerte da mesma escória utilizada nesta dissertação.

A caracterização da EGF *in natura*, logo após sua granulação, coleta e secagem, é descrita na tabela 8.

Tabela 8: granulometria da escória granulada de fundição

<b>Abertura</b>	<b>%Retida</b>	<b>%Acumulada</b>
<b>9,5 mm</b>	0	0
<b>6,3 mm</b>	1	1
<b>4,8 mm</b>	1	2
<b>2,4 mm</b>	23	25
<b>1,2 mm</b>	43	68
<b>600 <math>\mu\text{m}</math></b>	17	85
<b>300 <math>\mu\text{m}</math></b>	7	92
<b>150 <math>\mu\text{m}</math></b>	5	97
<b>&lt; 150 <math>\mu\text{m}</math></b>	3	100
Dimensão Máxima Característica (DMC): 4,8 mm		
Massa específica = 2,76 g/cm <sup>3</sup>		
Módulo de finura = 3,70		

Para a utilização como agregado, foi conservada a granulometria original da escória. No entanto, para sua utilização como substituição parcial do cimento, a mesma foi submetida a um processo de moagem, descrito no item 5.3.2. Como resultado deste processo de moagem, a escória granulada de fundição apresentou um diâmetro médio dos seus grãos de 19,94  $\mu\text{m}$  e uma massa específica de 2,81 g/cm<sup>3</sup>.

O caráter predominantemente amorfo da escória granulada de fundição, também foi verificado por Reschke (2003) e Ceccatto (2003). Este foi novamente foi comprovado através da realização de ensaio de difração de raios-x, apresentado na figura 7. O ensaio foi realizado no PPGEM/UFRGS, em Porto Alegre, em um equipamento marca SIEMENS, modelo D500, radiação CuK $\alpha$ , tensão de 36 kV, corrente de 20mA, varredura com passo de 0,02° .

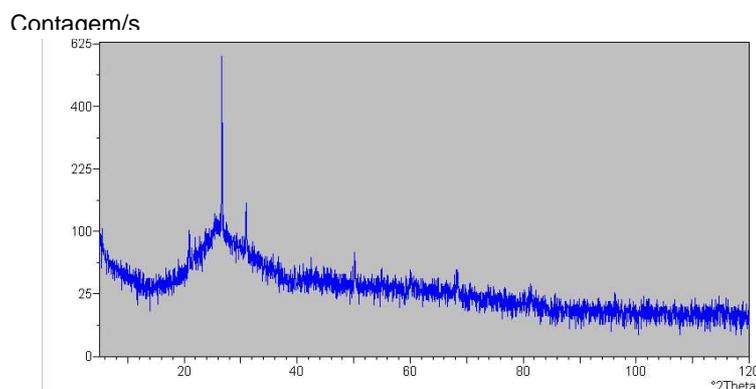


Figura 7: difratograma da escória granulada de fundição (EGF)

Tal qual o ensaio realizado por Ceccatto (2003) e Reschke (2003), não foi possível identificar qual o composto químico responsável pela presença do único pico cristalino presente no difratograma.

Quimicamente, foram caracterizadas amostras de EGF de diferentes dias de amostragem, não se obtendo grandes diferenças nas análises. O resultado da composição química média da EGF está expressa na tabela 9. A mesma tabela faz uma adaptação de dados apresentados por Ceccatto (2003), que compara diferentes escórias quanto à sua composição química. A estes dados foram adicionadas também as características de outros resíduos comumente utilizados como subprodutos na indústria da construção civil, como cinzas volantes e sílica ativa.

Tabela 9: composições químicas entre diferentes materiais pozolânicos (adaptado de Ceccatto, 2003)

Compostos (%)	Escória Granulada de Fundição – Forno Cubilô	Escória Granulada de Fundição – Forno Cubilô (Ceccatto, 2003)	Escória de Alto-Forno (John, 1995)	Cinza Volante classe F (Neville, 1997)	Sílica Ativa (Neville, 1997)	Escória de Aciaria Elétrica – granulada (Masuero, 2001)	Escória de Cobre (Moura, 2000)	Escória de Aciaria LD (Gumieri, 2002)
SiO <sub>2</sub>	53,52	49,20	34,48	59,40	93,70	33,50	26,00	13,14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,97	10,68	11,49	22,40	0,60	8,42	3,30	4,30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0,85	8,90	0,30	-	55,00	-
FeO	3,20	2,97	-	-	-	0,57	-	23,20
Fe	-	-	0,57	-	-	-	-	-
MnO	3,26	2,81	-	-	-	2,90	0,10	5,20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,02	1,04	-	-	0,01	-	1,60
S	0,66	0,64	-	-	-	0,06	-	0,08
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,14	0,05	-	-	-	0,06	0,10	0,26
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,04	0,67	-	-	-	0,40	-	-
TiO <sub>2</sub>	0,63	0,67	0,84	-	-	0,79	0,50	0,60
CaO	18,98	21,78	42,72	2,60	0,20	45,34	2,00	44,20
MgO	9,91	11,00	6,79	1,30	0,20	8,30	2,70	5,10
Na <sub>2</sub> O	-	-	0,28	2,20	0,20	0,001	1,10	<0,01
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	63,49	62,85	46,82	90,70	94,60	42,49	84,30	40,90

Verifica-se na tabela 9 que o somatório das porcentagens de SiO<sub>2</sub> , Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> , Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é de 63,49 %. Segundo a NBR 12653 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992c) , quando este somatório apresenta-se superior a 50%, sua classificação é de material pozolânico e/ou aglomerante (Classe E).

Com o intuito de comprovar a potencial atividade pozolânica da escória granulada de fundição com cimento Portland, foi realizado o ensaio prescrito pela NBR 5752 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992b), materiais pozolânicos: determinação da atividade pozolânica com cimento Portland.

O ensaio é realizado através da análise da resistência mecânica à compressão axial de duas diferentes argamassas, moldadas em corpos-de-prova cilíndricos de 50 X 100 mm. O primeiro traço é o referência, com 100% de cimento, ao passo que o segundo traço é moldado substituindo-se 35% do volume de cimento pelo material supostamente pozolânico. As argamassas têm sua quantidade de água determinada através de ensaio de consistência normal, proposto pela NBR 7215 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991), devendo o abatimento das mesmas estar em uma faixa de 225 mm  $\pm$  5mm.

Após a cura de 28 dias, em condições especificadas pela norma (38°C  $\pm$  2°C), realiza-se a ruptura dos corpos-de-prova de argamassa. O resultado de índice de atividade pozolânica é expresso pela relação percentual entre a resistência média à compressão da argamassa com escória e a resistência média da argamassa referência. A figura 8 ilustra os valores individuais de resistência obtidos para os corpos-de-prova das duas argamassas, ao, passo que a tabela 10 ilustra o índice de atividade pozolânica encontrado.

Tabela 10: índice de atividade pozolânica da EGF com cimento Portland, aos 28 dias

	<b>Carga de ruptura (KN)</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>
Referência	80,05	40,77
Referência	84,76	43,17
Referência	89,88	45,78
MÉDIA		43,24
Coeficiente de Variação (C.V.)		5,78
Desvio-padrão		2,50
EGF	80,35	40,92
EGF	77,9	39,67
EGF	81,65	41,58
MÉDIA		40,73
Coeficiente de Variação (C.V.)		2,38
Desvio-padrão		0,97
Índice de Atividade Pozolânica		94,32

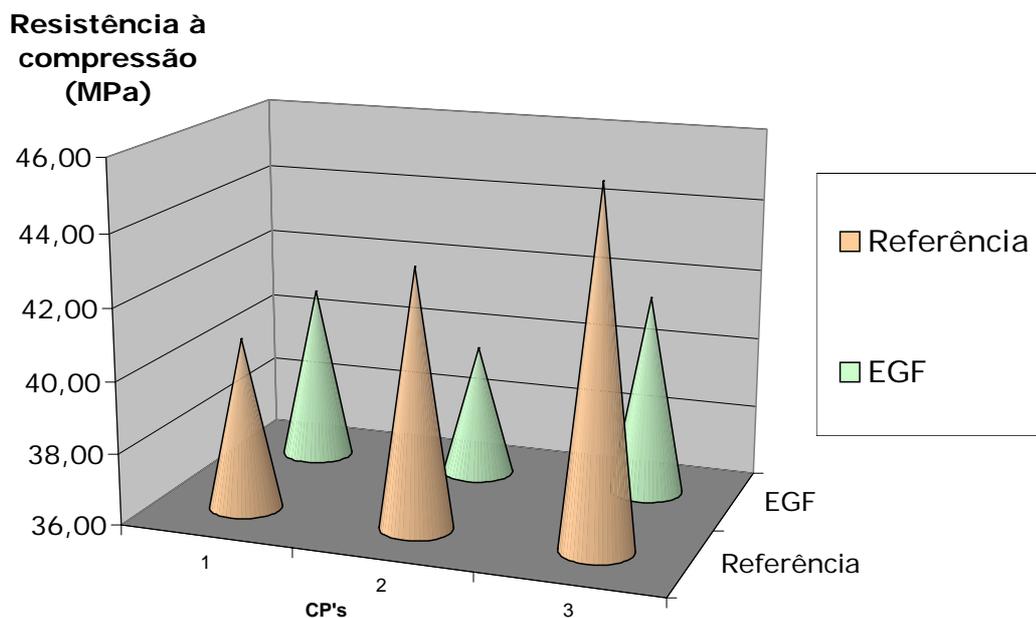


Figura 8: valores individuais de resistência à compressão, aos 28 dias, de argamassas para ensaio de pozolanicidade.

O resultado de 94,32% de índice de atividade pozolânica satisfaz o critério determinado pela NBR 12653 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992c), uma vez que esta estabelece um valor mínimo de 75% para que o material seja considerado pozolânico.

### 5.2.2 Amostragem e Moagem da EGF

Conforme exposto no capítulo 3, escória granulada de fundição utilizada neste estudo é proveniente da fusão em forno cubilô. As amostras foram coletadas ao longo de três meses junto a uma empresa localizada na região metropolitana de Porto Alegre. A produção desta indústria, voltada para a produção de ferros fundidos, gera uma quantidade aproximada de escória da ordem de 15 toneladas mensais.

A escória, vazada a uma temperatura aproximada de 1500 °C, é rapidamente resfriada junto a um canal com água na lateral ao forno cubilô (figura 9).



Figura 9: escória sendo vertida para canal de resfriamento com fluxo de água contínuo

Junto à calha lateral, a EGF, proveniente de diversas corridas do forno, acumula-se para ser posteriormente disposta em aterros sanitários adequados. A coleta da amostra foi realizada junto à esta calha, conforme ilustra a figura 10.



Figura 10: escória sendo retirada do canal após seu resfriamento

As diferentes amostras coletadas em diferentes dias foram, depois de secas em estufa até constância de massa, misturadas e homogeneizadas, perfazendo um total aproximado de 250 kg de EGF.

É muito importante, quando da utilização da EGF como substituição parcial do cimento, garantir que a mesma apresente uma finura compatível com as especificações da NBR 12653 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992c), que classifica os diferentes materiais pozolânicos. Além disso, quanto mais fina for a escória, maiores serão as potenciais reações de hidraulicidade da mesma, quando combinada ao cimento. É preciso, no entanto, levar em conta também o custo energético da moagem do material, de modo a não inviabilizar seu uso.

A moagem da escória, conforme citado nas limitações da pesquisa, originalmente deveria contemplar um estudo amplo de avaliação da finura através de tempos de moagem. Todavia, o tempo escasso para a realização de uma matriz experimental completa, aliada à baixa eficiência dos moinhos disponíveis para a realização dos ensaios com quantidades significativas de escória moída inviabilizaram esta etapa.

Após sucessivos testes de tempos de moagem, o beneficiamento do material terminou por ocorrer através da moagem da escória em um moinho de bolas de eixo horizontal, por um período de 20 horas. A granulometria da EGF moída está apresentada no anexo 1.

### 5.2.3 Produção dos Blocos

O concreto para a confecção dos blocos foi produzido em uma betoneira de eixo vertical, disponível no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Escola de Engenharia da UFRGS. Os blocos foram produzidos com uma vibroprensa PMB-10 VIBRAMAQ, ilustrada na figura 11, pertencente ao laboratório de materiais do NORIE/UFRGS, com capacidade de produção de seis blocos por ciclo. Após a vibroprensagem, em ciclos de vibração de 30 segundos, a prancha com os blocos era conduzida à uma estante metálica, onde equipamentos de aquecimento realizavam cura à vapor, por um período de 5 horas.



Figura 11: equipamento de vibro-prensagem utilizado na moldagem dos blocos

Para que se pudesse avaliar se a posição dos blocos na vibro-prensa exercia diferenças significativas na resistência alcançada pelas peças, conforme relata a bibliografia (Frasson Junior, 2000), estabeleceu-se uma numeração padrão das fôrmas junto à máquina, descrita na figura 12. A numeração inicia-se da esquerda para a direita, a partir do fundo da máquina, em direção à zona de alimentação das fôrmas.

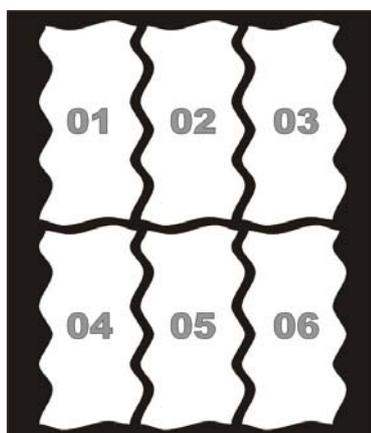


Figura 12: numeração das fôrmas para identificação dos blocos de concreto junto ao equipamento de vibro-prensagem.

### 5.2.3.1 Dosagem Preliminar do Concreto Referência

Embora não seja o objetivo principal deste trabalho estabelecer a dosagem para os blocos de pavimentação, a mesma se fez necessária quando da utilização do maquinário disponível para a realização da pesquisa. Isto porque não haviam dados precisos sobre o proporcionamento necessário de materiais para as condições de vibro-prensagem do equipamento.

A NBR 9781 (Associação Brasileira de Normas técnicas, 1987b) estabelece duas faixas de resistência à compressão - 35 e 50 MPa – conforme o tipo e a intensidade do tráfego de veículos ao qual o pavimento será submetido. Todavia, diversas empresas oferecem também pavimentos com resistências menores, na faixa de 25 MPa para situações específicas de menor solicitação de tráfego de veículos ou mesmo de trânsito de pedestres. A partir destas considerações, a dosagem dos blocos neste trabalho procura atender esta última faixa de resistência. Isto porque máquinas de pequeno porte como a disponível no laboratório do NORIE/UFRGS dificilmente conseguem produzir uma compactação eficiente que garanta blocos com resistências mais elevadas de maneira econômica. A produção de blocos de 35 ou 50 MPa demandaria um consumo muito mais elevado de cimento e de tempos maiores de vibro-compactação, o que poderia inviabilizar o programa experimental.

A primeira etapa de trabalho consistiu no teste de um traço piloto. A escolha do traço foi feita com base na dosagem para blocos produzidos por uma vibro-prensa similar (porém de maior capacidade de prensagem) existente em uma empresa da grande Porto Alegre. Os resultados, contudo, expressos na tabela 11, demonstraram um desempenho pífio, quanto à resistência à compressão, bem como um acabamento muito ruim dos blocos, conforme demonstra a figura 13.

Tabela 11: Estudo dos blocos dosados no ensaio piloto

Etapa: Estudo piloto											
H (%)	a/c	m	a <sup>9</sup>	p	C (kg/m <sup>3</sup> )*	C (kg/m <sup>3</sup> )**	( $\alpha$ )	fc 7 (MPa)	$\sigma$ 7	fc 28 (MPa)	$\sigma$ 28
7,0	0,42	5	3,86	1,14	379,76	364,57	0,81	7,90	1,24	14,11	2,23

H% - teor de umidade

a/c - relação água/cimento

m - areia + brita

C\* - consumo teórico de cimento, desprezando os vazios

C\*\* - consumo estimado de cimento considerando 4% de vazios no concreto

 $\sigma$  - desvio padrão

a - areia (total)

 $\alpha$  - teor de argamassa

p - brita



Figura 13: aspecto superficial do bloco de concreto de pavimentação no traço piloto

A baixa resistência pode ser justificada pela menor capacidade de compactação do maquinário, em comparação à vibro-prensa onde empregava-se o mesmo traço. Isto sugeriu que os próximos traços buscassem um melhor proporcionamento dos materiais, bem como alterações no consumo de cimento e de água. Além disso, os materiais empregados diferem dos usados na máquina que originou o traço piloto. Isto certamente teve reflexos também no acabamento superficial dos blocos, bem como pelo fato do agregado miúdo utilizado não possuir finos suficientes de modo a conferir acabamento. Como alternativa, compôs-se um agregado miúdo através da mistura areia fina juntamente com areia média, de modo a melhorar a aparência dos blocos.

A primeira etapa de dosagem, então, consistiu na identificação do melhor ajuste para conferir este acabamento aos blocos. Primeiramente, estudou-se a

<sup>9</sup> O traço piloto utilizou apenas areia média, sendo que a necessidade de correção da granulometria com areia fina foi identificada nesta etapa do projeto.

incorporação de areia fina na mistura. O objetivo, neste ponto, foi o de adicionar uma quantidade de areia que permitisse um melhor ajuste granulométrico dos grãos, permitindo uma melhor aparência da superfície dos elementos de pavimentação. A quantidade, porém, não deveria ser excessiva de modo a prejudicar a resistência dos blocos. Iniciou-se com um traço com 10% de areia fina, sem resultados efetivos no acabamento. A substituição de 20 % da areia média por areia fina permitiu um melhor preenchimento dos vazios e conferiu o acabamento superficial julgado adequado aos blocos.

Ultrapassada esta etapa, procedeu-se o ajuste do teor de argamassa, de modo a complementar a escolha do acabamento mais adequado dos blocos. Foram escolhidos três teores, mantendo-se fixos os demais parâmetros, tais como umidade e consumo de cimento. Os valores estão expressos na tabela 12.

Tabela 12: traços, em massa, empregados para o ajuste do teor de argamassa dos blocos de concreto referência

<b>Etapa: Ajuste do teor de argamassa</b>									
H (%)	a/c	m	a	am	af	p	C (kg/m <sup>3</sup> )*	C (kg/m <sup>3</sup> )**	( $\alpha$ )
7,0	0,4	4,71	3,29	2,63	0,66	1,43	401,19	385,14	0,75
			3,46	2,77	0,69	1,26	401,43	385,37	0,78
			3,63	2,90	0,73	1,09	401,67	385,60	0,81

H% - teor de umidade

a/c – relação água/cimento

m – areia + brita

C\* - consumo teórico de cimento, desprezando os vazios

C\*\* - consumo estimado de cimento considerando 4% de vazios no concreto

a – areia (total)

am – areia média

af – areia fina

p - brita

$\alpha$  - teor de argamassa

Esperava-se que fosse possível obter um bom acabamento com teores de argamassa mais baixos. Conforme ilustra a figura 14, porém, o melhor acabamento foi alcançado utilizando-se o teor de argamassa maior, de 81%. Este valor foi fixado para os próximos testes de resistência, como sendo o mais adequado para conferir acabamento aos blocos.



Figura 14: aspecto superficial dos blocos de concreto para pavimentação com teores de argamassa de (a) 75%, (b) 78% e (c) 81%

Ajustado o teor de argamassa, era preciso alcançar a maior resistência possível, sem perda de acabamento. Isto foi obtido variando-se o teor de umidade dos blocos. Como comentado no capítulo cinco, a produção de blocos envolve uma tecnologia peculiar, de concretos mais secos em relação à concretos convencionais. Apesar disso, a adição de mais água à mistura pode conferir maior compactação dos blocos, melhorando sua resistência mecânica. Desse modo, foram testadas misturas com umidade de 6,5%, 7% e 7,5%, coerente com o que ressaltam vários autores (Rodrigues, 1995; Frasson Junior, 2000; Vargas, 2002), ao afirmar que a umidade de concretos para blocos se situa em uma faixa de variação entre 6% e 8%. Ao mesmo tempo, a avaliação da trabalhabilidade dos concretos produzidos se deu através da análise conhecida como “ponto de pelota”. Este procedimento, citado por diversos autores (Tango, 1994; Vargas, 2002), é utilizada para verificar a umidade ótima, que corresponde à máxima quantidade de água possível presente na mistura, de modo a permitir moldar uma pelota de concreto nas palmas das mãos, sem que esta desmanche (falta de água) ou suje excessivamente as mãos (excesso de água). Tal rotina foi utilizada para se verificar as condições de trabalhabilidade dos diferentes teores de umidade avaliados.

A tabela 13 ilustra os traços testados para obtenção do teor de umidade.

Tabela 13: traços, em massa, empregados no primeiro ajuste do teor de umidade dos blocos referência

Etapa: Ajuste do teor de umidade (H%)									
H (%)	a/c	m	a	am	af	p	C (kg/m <sup>3</sup> )*	C (kg/m <sup>3</sup> )**	( $\alpha$ )
6,5	0,4	5,15	3,98	3,19	0,80	1,17	376,74	361,67	0,81
7,0		4,71	3,63	2,90	0,73	1,09	401,67	385,60	
7,5		4,33	3,32	2,66	0,66	1,01	426,10	409,05	

H% - teor de umidade

a/c - relação água/cimento

m - areia + brita

C\* - consumo teórico de cimento, desprezando os vazios

C\*\* - consumo estimado de cimento considerando 4% de vazios no concreto

a - areia (total)

am - areia média

af - areia fina

p - brita

$\alpha$  - teor de argamassa

Conforme ilustra a figura 15 e a tabela 14, embora as maiores resistências tenham sido alcançadas, conforme esperado, pelos blocos com maiores teores de umidade, o acabamento dos blocos com H%=7,5% ficou muito prejudicado, inclusive com a formação de uma camada de nata de cimento junto à base dos moldes. Este excesso de água também já fora verificado quando da análise do “ponto de pelota” do concreto com tal quantidade de água.



Figura 15: aspecto dos blocos de concreto com H = 7,5% - detalhe para a presença de nata de cimento junto aos moldes

Tabela 14: resistência à compressão, aos 7 e 28 dias, obtidos no primeiro ajuste do teor de umidade dos blocos referência

Etapa: Ajuste do teor de umidade (H%)								
H (%)	a/c	C (kg/m <sup>3</sup> )*	C (kg/m <sup>3</sup> )**	(α)	fc 7 (MPa)	σ7	fc 28 (MPa)	σ28
6,5	0,4	376,74	361,67	0,81	18,95	2,08	21,62	2,07
7,0		401,67	385,60		19,23	1,76	23,03	1,76
7,5		426,10	409,05		25,73	2,56	28,80	2,11

H% - teor de umidade a/c – relação água/cimento α - teor de argamassa  
 C\* - consumo teórico de cimento, desprezando os vazios  
 C\*\* - consumo estimado de cimento considerando 4% de vazios no concreto  
 σ - desvio padrão

Como etapa final da escolha do traço, foram testados traços com teores de umidade intermediários entre 7% e 7,5%, de modo a obter a maior resistência sem a formação de nata na base dos blocos e sem perda de acabamento. Os resultados, expressos nas tabelas 15 e 16, indicaram um teor de umidade de 7,2% como sendo o mais adequado.

Tabela 15: traços, em massa, empregados no segundo ajuste do teor de umidade dos blocos referência

Etapa: Ajuste do teor de umidade (H%)									
H (%)	a/c	m	a	am	af	p	C (kg/m <sup>3</sup> )*	C (kg/m <sup>3</sup> )**	(α)
7,1	0,4	4,63	3,56	2,85	0,71	1,07	406,59	390,33	0,81
7,2		4,56	3,50	2,80	0,70	1,06	411,50	395,04	
7,3		4,48	3,44	2,75	0,69	1,04	416,38	399,73	

H% - teor de umidade a – areia (total) p - pedrisco  
 a/c – relação água/cimento am – areia média α - teor de argamassa  
 m – areia + pedrisco af – areia fina  
 C\* - consumo teórico de cimento, desprezando os vazios  
 C\*\* - consumo estimado de cimento considerando 4% de vazios no concreto

Tabela 16: resistência à compressão, aos 7 e 28 dias, obtidos no segundo ajuste do teor de umidade dos blocos referência

Etapa: Ajuste do teor de umidade (H%)								
H (%)	a/c	C (kg/m <sup>3</sup> )*	C (kg/m <sup>3</sup> )**	(α)	fc7 médio (MPa)	σ7	fc28 médio (MPa)	σ28
7,1	0,4	406,59	390,33	0,81	17,75	2,43	26,67	2,06
7,2		411,50	395,04		19,62	1,98	28,87	2,43
7,3		416,38	399,73		23,08	2,23	29,78	3,02

H% - teor de umidade a/c – relação água/cimento α - teor de argamassa  
 C\* - consumo teórico de cimento, desprezando os vazios  
 C\*\* - consumo estimado de cimento considerando 4% de vazios no concreto  
 σ - desvio padrão

## 5.2.3.2 Controle das características dos blocos produzidos

A resistência das peças produzidas, via de regra, está associada à maior compacidade possível das mesmas, e consequentemente o menor número e vazios no concreto. Em outras palavras, blocos mais pesados (de maior massa) tendem a apresentar maiores resistências. Por isso, com o intuito de verificar se não ocorreram grandes variações de massa nos blocos produzidos, procedeu-se a pesagem dos blocos, expressos na tabelas 17. Nota-se que as médias dos blocos nos diferentes traços ficaram entre 3,85 kg e 4,17 kg.

Tabela 17: massa, em gramas, dos blocos de concreto para pavimentação produzidos.

% de substituição / idade	Peso (g)	% de substituição / idade	Peso (g)	% de substituição / idade	Peso (g)	% de substituição / idade	Peso (g)
0% - 03 DIAS	3999	0% - 07 DIAS	4210	0% - 14 DIAS	4210	0% - 28 DIAS	4275
0% - 03 DIAS	3922	0% - 07 DIAS	4154	0% - 14 DIAS	4154	0% - 28 DIAS	4254
0% - 03 DIAS	4063,8	0% - 07 DIAS	4128	0% - 14 DIAS	4128	0% - 28 DIAS	4199
0% - 03 DIAS	3989,5	0% - 07 DIAS	4119	0% - 14 DIAS	4019	0% - 28 DIAS	4214
0% - 03 DIAS	4001,2	0% - 07 DIAS	4154	0% - 14 DIAS	4154	0% - 28 DIAS	4065
0% - 03 DIAS	4079,3	0% - 07 DIAS	4127	0% - 14 DIAS	4027	0% - 28 DIAS	4020
MÉDIA	4009,1	MÉDIA	4148,7	MÉDIA	4115,3	MÉDIA	4171,2
DESVIO-PADRÃO	56,7	DESVIO-PADRÃO	33,5	DESVIO-PADRÃO	76,4	DESVIO-PADRÃO	104,3
C.V.	1,4	C.V.	0,8	C.V.	1,9	C.V.	2,5
10% - 03 DIAS	4103,4	10% - 07 DIAS	4152	10% - 14 DIAS	4152	10% - 28 DIAS	3875
10% - 03 DIAS	3945	10% - 07 DIAS	4180	10% - 14 DIAS	3980	10% - 28 DIAS	3913
10% - 03 DIAS	3923,5	10% - 07 DIAS	3996	10% - 14 DIAS	4096	10% - 28 DIAS	3752
10% - 03 DIAS	3900,7	10% - 07 DIAS	4126	10% - 14 DIAS	4026	10% - 28 DIAS	3804
10% - 03 DIAS	3899,7	10% - 07 DIAS	4154	10% - 14 DIAS	4054	10% - 28 DIAS	3911
10% - 03 DIAS	4002,6	10% - 07 DIAS	4205	10% - 14 DIAS	4005	10% - 28 DIAS	3876
MÉDIA	3962,5	MÉDIA	4135,5	MÉDIA	4052,2	MÉDIA	3855,3
DESVIO-PADRÃO	78,8	DESVIO-PADRÃO	73,5	DESVIO-PADRÃO	63,3	DESVIO-PADRÃO	64,0
C.V.	2,0	C.V.	1,8	C.V.	1,6	C.V.	1,7
30% - 03 DIAS	3933,3	30% - 07 DIAS	3997	30% - 14 DIAS	3821	30% - 28 DIAS	3818
30% - 03 DIAS	3996,7	30% - 07 DIAS	4002	30% - 14 DIAS	3965	30% - 28 DIAS	3896
30% - 03 DIAS	3785,3	30% - 07 DIAS	3997	30% - 14 DIAS	3859	30% - 28 DIAS	3995
30% - 03 DIAS	3899,8	30% - 07 DIAS	3986	30% - 14 DIAS	3810	30% - 28 DIAS	3947
30% - 03 DIAS	3970	30% - 07 DIAS	3998	30% - 14 DIAS	3776	30% - 28 DIAS	3954
30% - 03 DIAS	3956,6	30% - 07 DIAS	3958	30% - 14 DIAS	3993	30% - 28 DIAS	3919
MÉDIA	3928,4	MÉDIA	3989,7	MÉDIA	3870,7	MÉDIA	3921,6
DESVIO-PADRÃO	83,2	DESVIO-PADRÃO	16,4	DESVIO-PADRÃO	88,3	DESVIO-PADRÃO	60,9
C.V.	2,1	C.V.	0,4	C.V.	2,3	C.V.	1,6
50% - 03 DIAS	3971	50% - 07 DIAS	4000	50% - 14 DIAS	3949	50% - 28 DIAS	3845
50% - 03 DIAS	3948	50% - 07 DIAS	3901	50% - 14 DIAS	3957	50% - 28 DIAS	3869
50% - 03 DIAS	3956	50% - 07 DIAS	3942	50% - 14 DIAS	3948	50% - 28 DIAS	3895
50% - 03 DIAS	3977	50% - 07 DIAS	3959	50% - 14 DIAS	3902	50% - 28 DIAS	3929
50% - 03 DIAS	4067	50% - 07 DIAS	3876	50% - 14 DIAS	3926	50% - 28 DIAS	3834
50% - 03 DIAS	3990	50% - 07 DIAS	3924	50% - 14 DIAS	3924	50% - 28 DIAS	3981
MÉDIA	3984,8	MÉDIA	3933,4	MÉDIA	3934,2	MÉDIA	3892,1
DESVIO-PADRÃO	42,9	DESVIO-PADRÃO	43,7	DESVIO-PADRÃO	20,4	DESVIO-PADRÃO	55,3
C.V.	1,1	C.V.	1,1	C.V.	0,5	C.V.	1,4

Outro ponto relevante, relativo ao processo, é garantir que as peças produzidas não tenham grandes variações volumétricas entre si. Para tanto, fez-se uma análise do volume ocupado pelos blocos, através de uma técnica bastante simples. Os corpos-de-prova, saturados, foram imersos em um recipiente cheio d'água equipado com um expurgo na parte superior. A água excedente, deslocada pelo bloco imerso, era captada do expurgo e correspondia ao volume do próprio bloco. Estes dados estão expressos pela tabela 18.

Pode-se notar, através dos dados da tabela 18, que não houve uma variação substancial do volume, sendo que o volume dos blocos produzidos fica numa faixa aproximada de 1,93 litros, ou 0,0019 m<sup>3</sup>.

Tabela 18: volume dos blocos de concreto para pavimentação produzidos.

	Volume (litros)		Volume (litros)
REFERÊNCIA P1 - 07 DIAS	1,941	REFERÊNCIA P1 - 28 DIAS	1,996
REFERÊNCIA P2 - 07 DIAS	1,966	REFERÊNCIA P2 - 28 DIAS	1,865
REFERÊNCIA P3 - 07 DIAS	1,930	REFERÊNCIA P3 - 28 DIAS	1,906
REFERÊNCIA P4 - 07 DIAS	1,914	REFERÊNCIA P4 - 28 DIAS	1,997
REFERÊNCIA P5 - 07 DIAS	1,966	REFERÊNCIA P5 - 28 DIAS	1,945
REFERÊNCIA P6 - 07 DIAS	1,920	REFERÊNCIA P6 - 28 DIAS	1,965
MÉDIA	1,940	MÉDIA	1,969
DESVIO-PADRÃO	0,022		0,038
10% EGF P1 - 07 DIAS	1,944	10% EGF P1 - 28 DIAS	1,950
10% EGF P2 - 07 DIAS	1,912	10% EGF P2 - 28 DIAS	1,981
10% EGF P3 - 07 DIAS	1,919	10% EGF P3 - 28 DIAS	1,969
10% EGF P4 - 07 DIAS	1,932	10% EGF P4 - 28 DIAS	1,959
10% EGF P5 - 07 DIAS	1,936	10% EGF P5 - 28 DIAS	1,967
10% EGF P6 - 07 DIAS	1,920	10% EGF P6 - 28 DIAS	1,918
MÉDIA	1,927	MÉDIA	1,957
DESVIO-PADRÃO	0,012	DESVIO-PADRÃO	0,022
30% EGF P1 - 07 DIAS	1,912	30% EGF P1 - 28 DIAS	1,860
30% EGF P2 - 07 DIAS	1,944	30% EGF P2 - 28 DIAS	1,887
30% EGF P3 - 07 DIAS	1,983	30% EGF P3 - 28 DIAS	1,930
30% EGF P4 - 07 DIAS	1,933	30% EGF P4 - 28 DIAS	1,879
30% EGF P5 - 07 DIAS	1,935	30% EGF P5 - 28 DIAS	1,911
30% EGF P6 - 07 DIAS	1,931	30% EGF P6 - 28 DIAS	1,883
MÉDIA	1,940	MÉDIA	1,892
DESVIO-PADRÃO	0,024	DESVIO-PADRÃO	0,025
50% EGF P1 - 07 DIAS	1,911	50% EGF P1 - 28 DIAS	1,860
50% EGF P2 - 07 DIAS	1,900	50% EGF P2 - 28 DIAS	1,899
50% EGF P3 - 07 DIAS	1,889	50% EGF P3 - 28 DIAS	1,981
50% EGF P4 - 07 DIAS	1,915	50% EGF P4 - 28 DIAS	1,901
50% EGF P5 - 07 DIAS	1,999	50% EGF P5 - 28 DIAS	1,888
50% EGF P6 - 07 DIAS	1,904	50% EGF P6 - 28 DIAS	1,981
MÉDIA	1,920	MÉDIA	1,918
DESVIO-PADRÃO	0,040	DESVIO-PADRÃO	0,051

Para a realização dos ensaios foram moldados seis blocos para cada idade de ruptura, mais seis blocos adicionais, os quais eram reservados para os ensaios de abrasão e de absorção de água. No total, levando em consideração a produção dos blocos como substituição parcial de cimento e como substituição parcial de areia, foram produzidos 204 blocos para análise neste trabalho, além dos blocos produzidos na fase de testes e dosagem (aproximadamente 70 blocos).

Durante as concretagens, não se verificaram diferenças significativas na trabalhabilidade dos concretos produzidos com escória granulada de fundição, quando da substituição parcial de cimento, em relação ao concreto referência. Por outro lado, os blocos produzidos com EGF substituindo a areia média apresentaram um aspecto mais seco, para o teor de 50% de substituição. Entretanto, este não prejudicou o acabamento dos final das peças produzidas.

Quanto à cor dos blocos, a figura 16 ilustra o aspecto dos elementos produzidos com diferentes teores de substituição de cimento por EGF, bem como o concreto referência. Nota-se que a coloração dos mesmos passa de um cinza claro à um cinza escuro à medida que aumenta o teor de substituição.

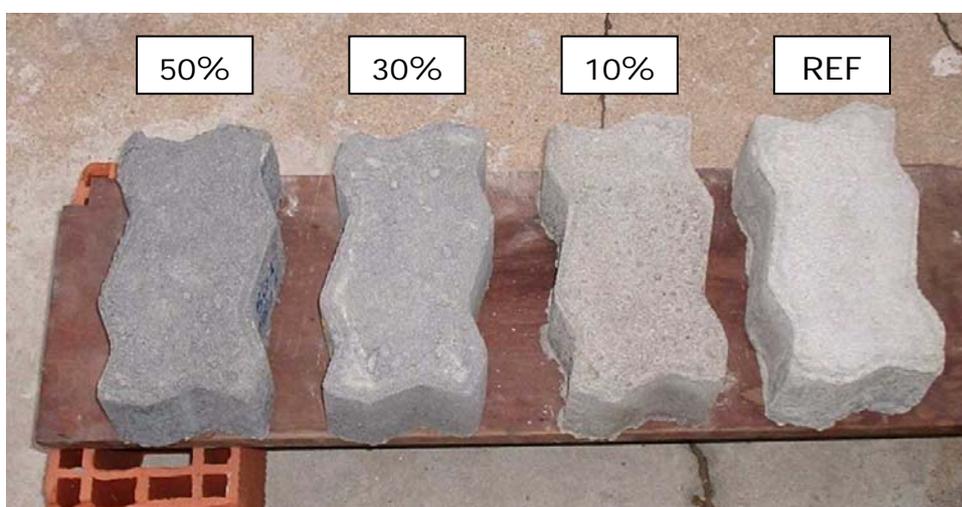


Figura 16: aspecto superficial dos blocos produzidos com diferentes teores (%) de substituição de cimento por EGF e referência.

Para os blocos produzidos com parte da areia substituída pela escória granulada de fundição, não ocorreram alterações visuais (coloração dos blocos) em nenhum dos concretos moldados, fato que pode ser verificado através da figura 17.

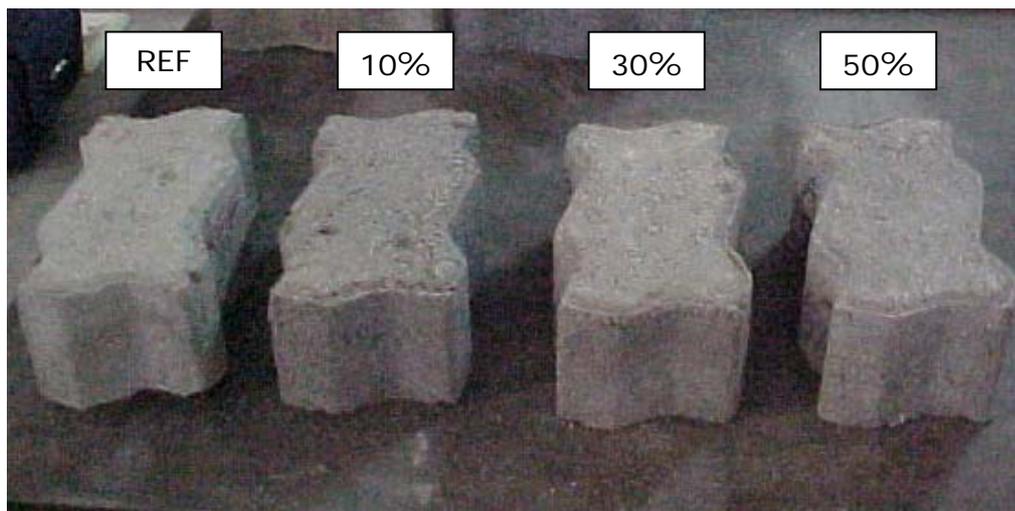


Figura 17: aspecto superficial dos blocos produzidos com diferentes teores (%) de substituição de areia média por EGF.

#### 5.2.4 Ensaios Realizados

A seguir estão apresentados os ensaios a que foram submetidos os blocos referência e os produzidos com escória granulada de fundição (EGF).

##### 5.2.4.1 Resistência à Compressão

Conforme mencionado anteriormente no capítulo 4, a resistência à compressão é um importante parâmetro a ser considerado na produção de pavimentos intertravados. No caso de blocos de concreto para pavimentação, resistências satisfatórias em baixas idades são essenciais, devido à questão de cura e paletização ocorrer de maneira acelerada. Nesse sentido, a avaliação da resistência à compressão dos blocos produzidos deve contemplar estas características. Desta forma, os ensaios com os blocos, nos diferentes teores de substituição, foram realizados nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias, conforme descrito no item 5.2.1.

O procedimento de ensaio seguiu as recomendações propostas pela NBR 9780 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987a). Os blocos foram capeados com argamassa de cimento e areia fina, em um traço de 1:1. Após 24 horas de

cura do capeamento, as peças eram imersas também por 24 horas, de modo a se apresentarem completamente saturadas d'água no momento do ensaio.

Conforme ilustra a figura 18, os blocos de concreto foram rompidos em uma prensa hidráulica, marca SHIMADZU, modelo UH2000kN, com uma capacidade de 4 a 200 toneladas, disponível no PPGEC/UFRGS. Os corpos-de-prova foram dispostos entre placas metálicas auxiliares de 90 mm de diâmetro. Um gabarito de madeira foi utilizado de modo a garantir o posicionamento correto dos blocos junto ao equipamento. Este pode ser visualizado através da figura 19. A velocidade de carregamento dos corpos-de-prova foi de 300 KPa/s, até a ruptura dos blocos.



Figura 18: ensaio de resistência à compressão dos blocos



Figura 19: detalhe do gabarito de madeira utilizado junto à prensa

Em conformidade com o que descreve a NBR 9780 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987a) a resistência à compressão (em MPa) da peça foi obtida dividindo-se a carga de ruptura (em N), pela área de carregamento (em mm<sup>2</sup>), multiplicando-se o resultado por um fator “p”, que é função da altura da peça. Este fator “p” está descrito na tabela 19.

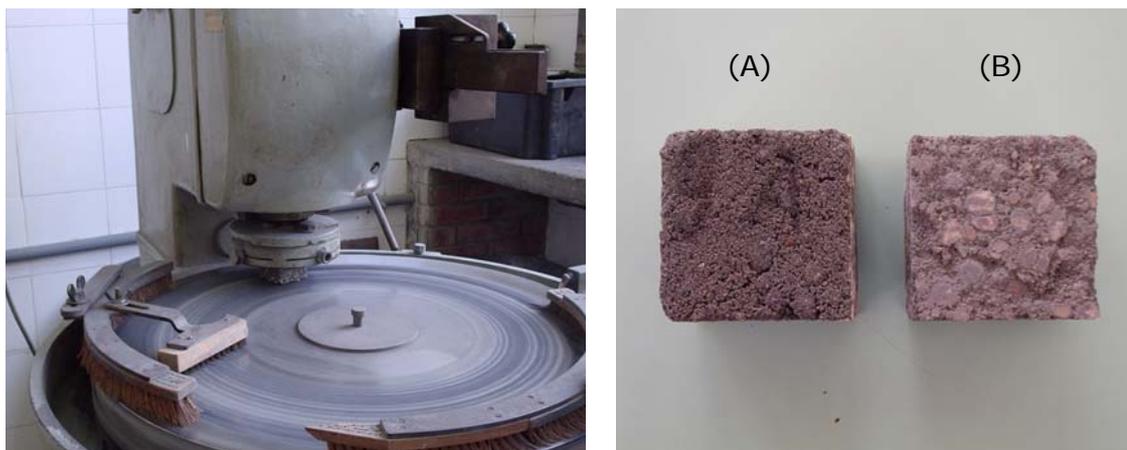
Tabela 19: fator multiplicativo da resistência obtida no ensaio de resistência à compressão de blocos para pavimentação

<b>Altura nominal da peça (mm)</b>	<b>Fator multiplicativo “p”</b>
60	0,95
80	1,00
100	1,05

Durante a análise dos blocos produzidos, pode-se observar, através da medição da altura das peças, que as mesmas variaram pouco, ficando em uma faixa de 85 à 87 mm de altura.

#### 5.2.4.2 Resistência ao Desgaste por Abrasão

O índice de desgaste por abrasão também é um importante parâmetro a ser considerado, principalmente em peças como blocos de pavimentação, sujeitos ao desgaste pela circulação constantes de veículos e pedestres. Os ensaios foram realizados pela Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado Rio Grande do Sul (CIENTEC), que desenvolveu uma metodologia própria para avaliação do desgaste dos blocos. O “*Método CIENTEC*” de desgaste por abrasão simula um percurso de 500 metros percorridos por um corpo-de-prova submetido a uma pressão constante de 0,06 MPa sobre pó abrasivo carborundo. Cada bloco tem extraída duas amostras, através de corte com serra diamantada. O resultado é apresentado em termos de índice de desgaste. Este equivale à média das diferenças entre as alturas iniciais e finais de cinco pontos no corpo-de-prova. As figuras 20a e 20b ilustram o equipamento utilizado no ensaio e os corpos-de-prova extraídos dos blocos.



Figuras 20a e 20b: equipamento utilizado no ensaio de desgaste por abrasão, e corpos-de-prova antes (A) e após o ensaio (B)

Em face dos custos associados à realização do ensaio, o índice de desgaste por abrasão foi programado apenas para as idades de 7 e 28 dias. Devido à problemas na instituição que realizou os ensaios, os mesmos foram feitos para corpos-de-prova com idades de 10 e 28 dias, para blocos com substituição parcial de cimento. Para os blocos com substituição parcial de agregado, realizaram-se ensaios apenas para 28 dias.

#### 5.2.4.3 Absorção de Água

Embora não existam normas nacionais específicas de absorção de água para blocos de concreto para pavimentação, esta também é uma característica importante a ser considerada, pois tem reflexo direto na qualidade do bloco produzido, bem como das condições de serviço do pavimento. Blocos de concreto que absorvam muita água em geral são menos resistentes, além de poderem lixiviar elementos químicos mais facilmente, causando, por exemplo, eflorescências que prejudiquem o aspecto do pavimento. Para a realização do ensaio de absorção, utilizou-se o proposto pela NBR 12118 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991b), para blocos de concreto para alvenaria. O ensaio consiste em secar os blocos de ensaio em estufa, a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , até constância de massa. Após esta etapa, os mesmos são resfriados até a temperatura ambiente e imediatamente imersos em água, onde leituras são realizadas após 24 horas e depois de 2 em 2 horas, ou até que não se registre para o corpo-de-

prova diferença de massa superior a 0,5% entre duas leituras consecutivas. O valor da absorção, expresso em porcentagem, é dado pela fórmula:

$$a\% = 100 \times (m_2 - m_1) / m_1$$

Onde

$a\%$  = absorção de água

$m_1$  = massa do bloco após secagem em estufa

$m_2$  = massa do bloco saturado de água

## 6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios propostos no programa experimental e descritos ao longo do capítulo cinco, bem como uma análise do comportamento da EGF em face dos resultados obtidos.

### 6.1 EFEITO DA POSIÇÃO DOS BLOCOS NA VIBRO-PRENSA

Tal qual exposto no capítulo cinco, a posição dos moldes na vibro-prensa e as condições de adensamento diferenciado proporcionado por esta podem influenciar nos resultados de resistência dos blocos. Com o intuito de comprovar se há alguma relação direta entre a resistência do bloco e sua posição na prensa no momento da moldagem, foi analisado o efeito isolado deste fator. As figuras 21 à 27 ilustram os valores obtidos de resistência à compressão dos blocos, nas respectivas posições de moldagem (definidas previamente e exposta na figura 15 do item 5.4.3). As tabelas com os valores individuais de resistência à compressão que geraram os gráficos pode ser consultadas nos apêndices 1 e 2 deste trabalho.

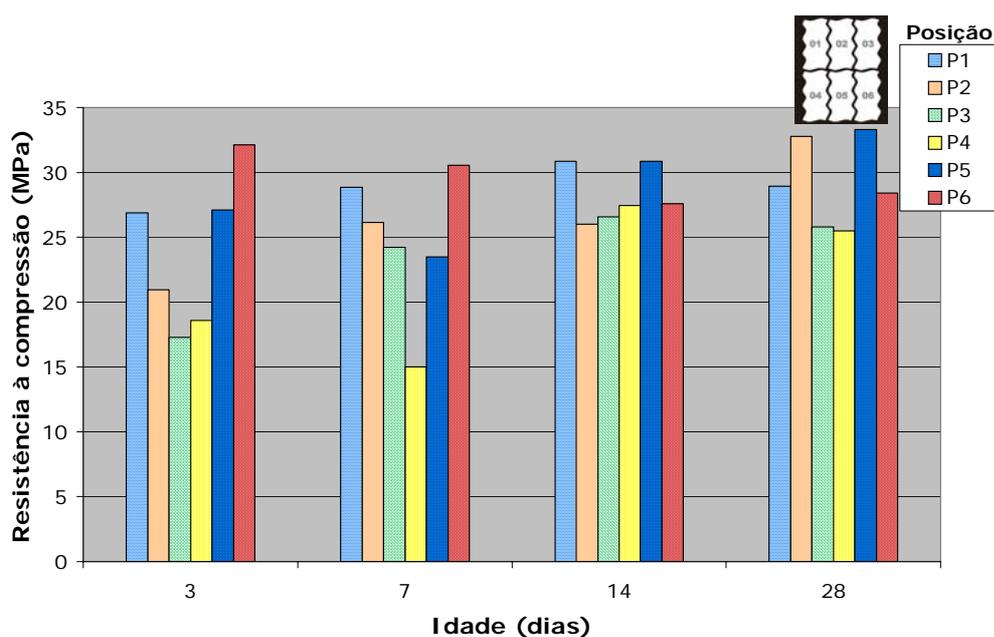


Figura 21: resistência à compressão ao longo do tempo dos blocos de concreto referência (0% de EGF)

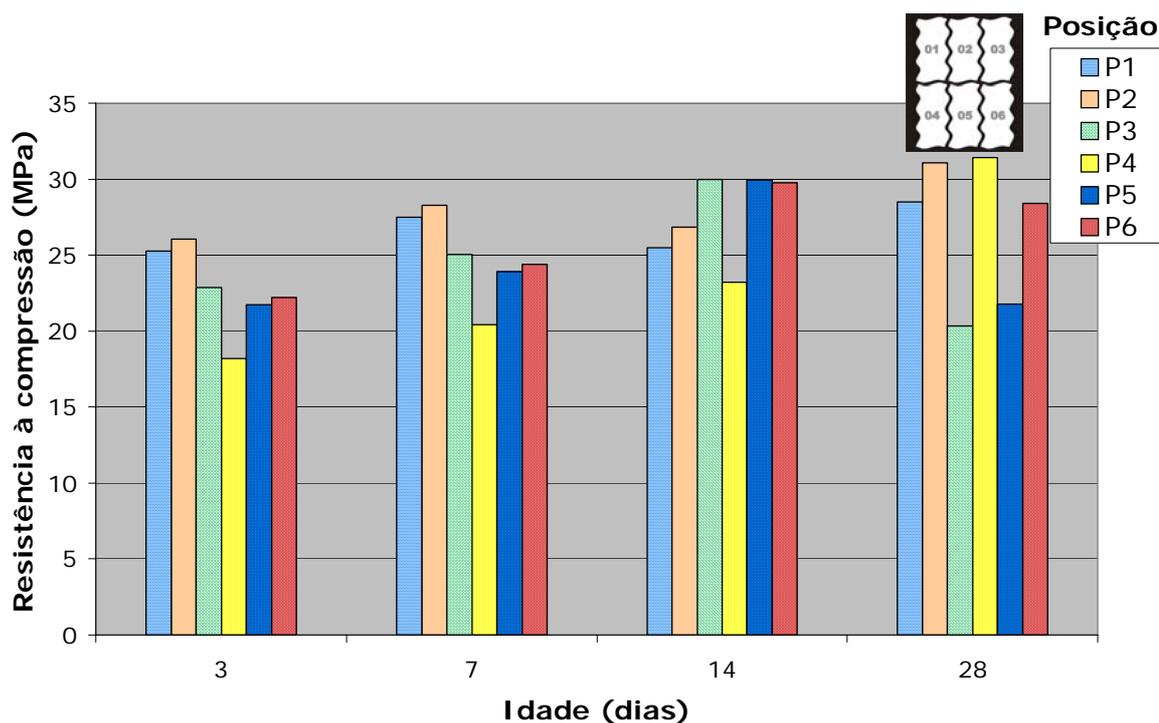


Figura 22: resistência à compressão ao longo do tempo dos blocos de concreto para pavimentação com substituição de 10% de cimento por EGF

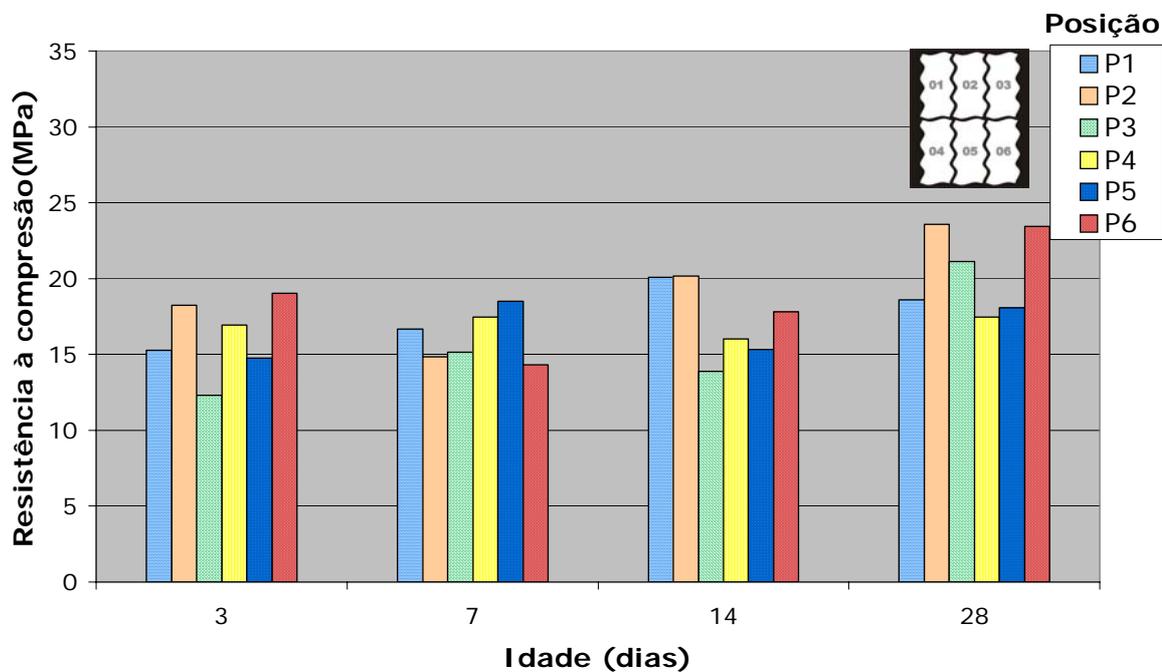


Figura 23: resistência à compressão ao longo do tempo dos blocos de concreto de pavimentação com substituição de 30% de cimento por EGF

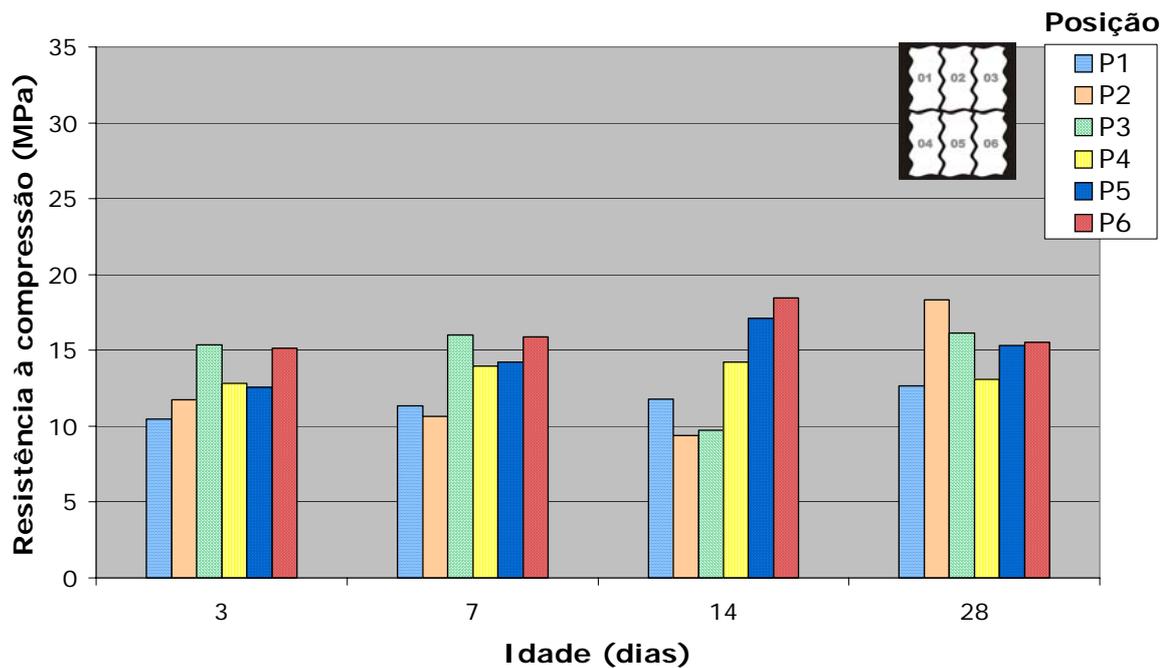


Figura 24: resistência à compressão ao longo do tempo dos blocos de concreto para pavimentação com substituição de 50% de cimento por EGF

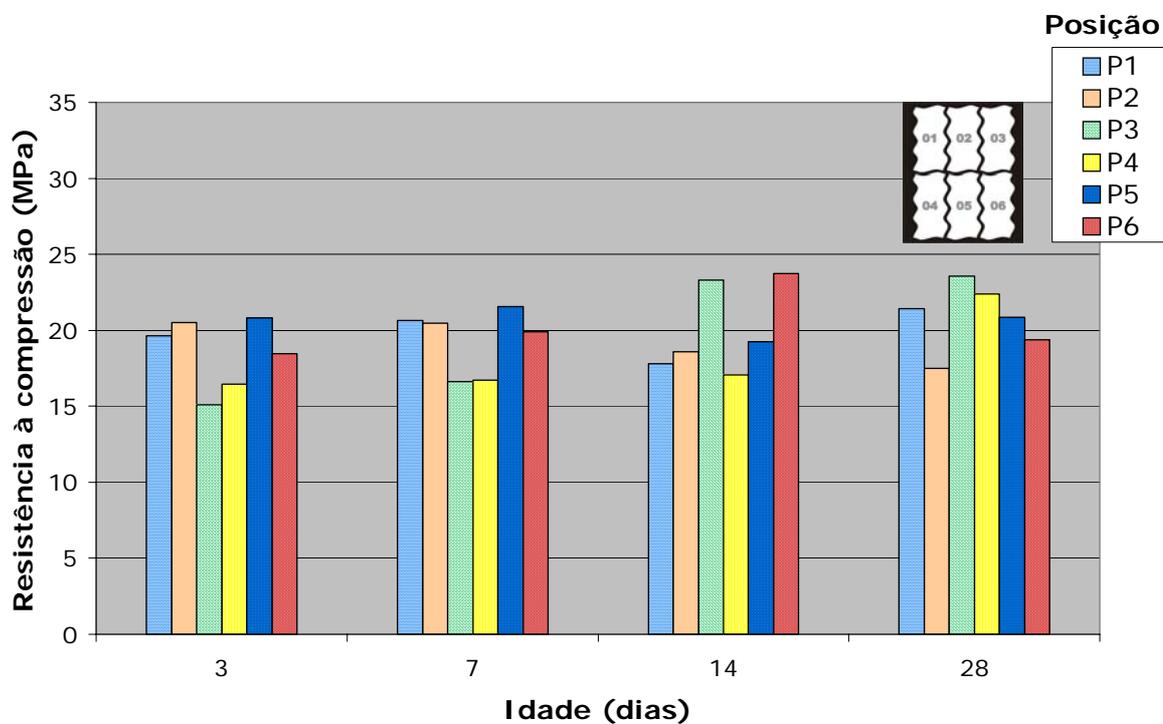


Figura 25: resistência à compressão ao longo do tempo dos blocos de concreto para pavimentação com substituição de 10% de areia média por EGF

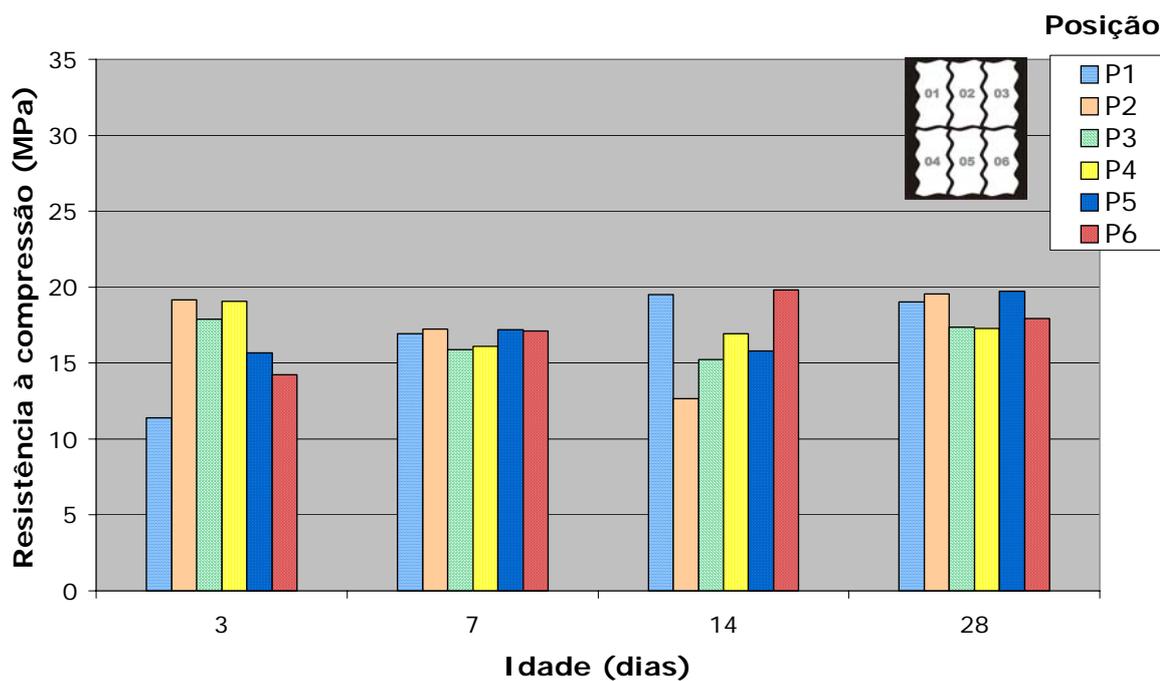


Figura 26: resistência à compressão ao longo do tempo dos blocos de concreto para pavimentação com substituição de 30% de areia média por EGF

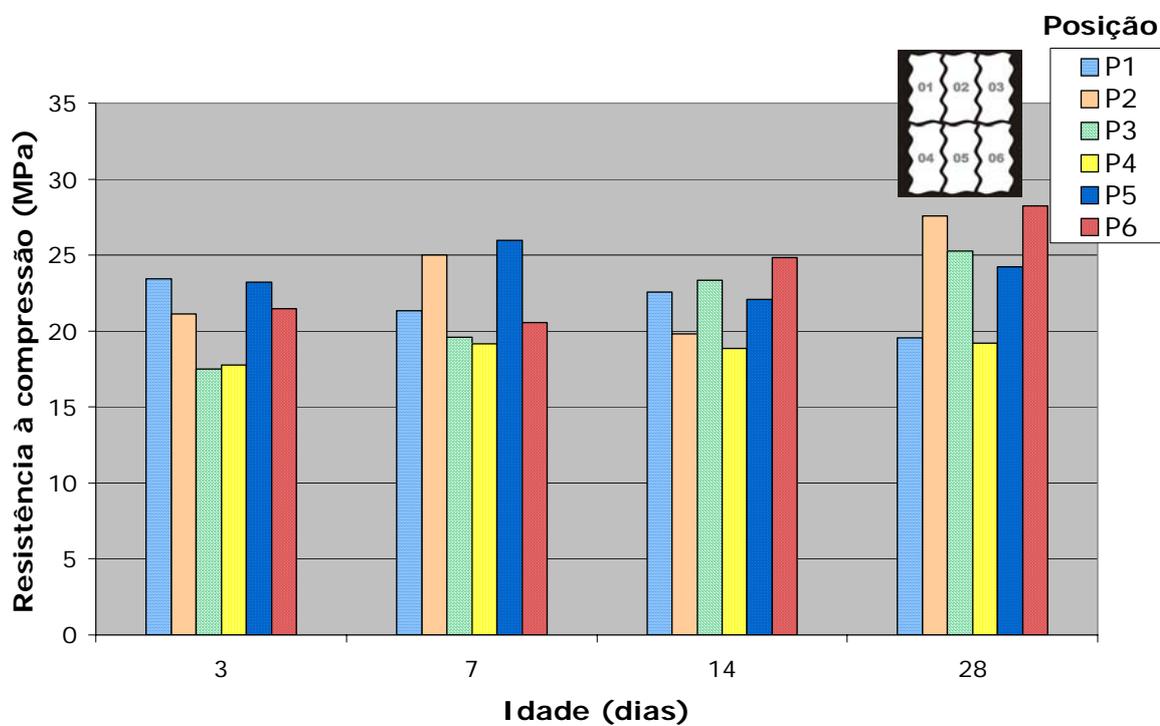


Figura 27: resistência à compressão dos blocos de concreto com substituição de 50% de areia média por EGF

As tabelas 20 e 21 e a figuras 28 e 29 ilustram a análise de variância (ANOVA) do efeito da posição dos blocos nas formas do maquinário, para o caso da substituição de cimento e de areia média por EGF.

Tabela 20: análise de Variância (ANOVA) do efeito da posição na fôrma da vibro-prensa sobre a resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação com EGF como aglomerante

	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F(calc)</b>	<b>F(tab)</b>	<b>Significância</b>
Posição	5	28,24	3,57	2,42	S
Erro	45	7,91			

GDL: Graus de liberdade

MQ: Média quadrática

F(calc): Valor calculado de F

F(tab): valor tabelado de f

NS: Valor não significativo

S: Valor significativo

Se  $f(\text{calc}) > f(\text{tab})$  = efeito significativo

Tabela 21: análise de Variância (ANOVA) do efeito da posição na fôrma da vibro-prensa sobre a resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação com EGF como agregado

	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F(calc)</b>	<b>F(tab)</b>	<b>Significância</b>
Posição	5	33,55	3,09	2,42	S
Erro	45	10,94			

GDL: Graus de liberdade

MQ: Média quadrática

F(calc): Valor calculado de F

F(tab): valor tabelado de f

NS: Valor não significativo

S: Valor significativo

Se  $f(\text{calc}) > f(\text{tab})$  = efeito significativo

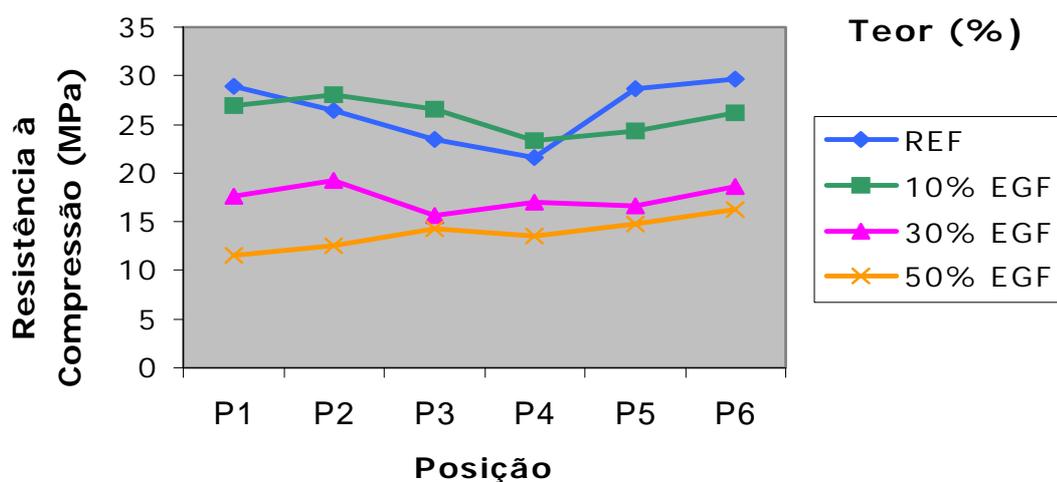


Figura 28: efeito da posição na forma da vibro-prensa sobre a resistência à compressão dos blocos de concreto com substituição de cimento por EGF

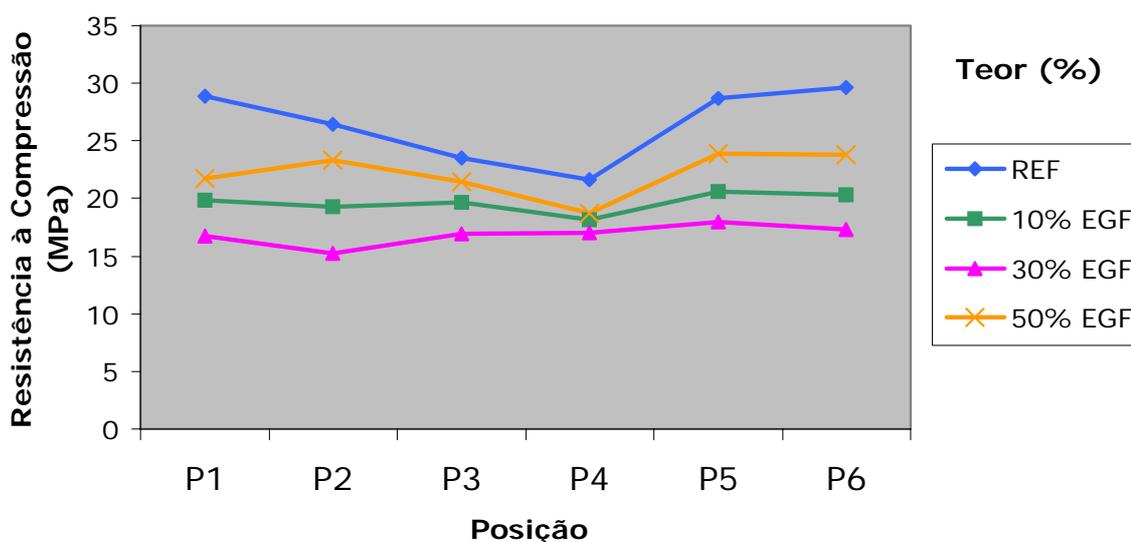


Figura 29: efeito da posição na forma da vibro-prensa sobre a resistência à compressão dos blocos de concreto com substituição de areia média por EGF

A resposta do ANOVA para a análise de variância indica que há diferenças significativas para o conjunto de seis posições de moldagem dos blocos do maquinário utilizado, quanto aos valores de resistência à compressão. Nota-se através das figuras 28 e 29 que, na maior parte dos traços, são nas posições 3 e 4 que os blocos apresentam menor resistência. Este comportamento diferenciado dos blocos pode ser fruto de características particulares da vibro-prensa, tais como força de compressão, frequência e amplitude de vibração, conforme corroboram Frasson Júnior et al. (2002).

## 6.2 INCORPORAÇÃO DA EGF COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO

Os resultados dos ensaios de resistência a compressão, desgaste por abrasão e absorção de água dos blocos de concreto para pavimentação estão expostos na seqüência do trabalho.

### 6.2.1 Resistência à Compressão

A tabela 22 apresenta os dados de resistência à compressão média dos blocos estudados, nas idades de análise. Os dados individuais dos blocos de concreto para pavimentação com substituição parcial de cimento por EGF constam no apêndice 1 . O crescimento da resistência com a idade fica ilustrado na figura 30.

Tabela 22: resistência à compressão média ( $f_c$ ), em MPa, dos blocos de concreto para pavimentação com substituição parcial de cimento por EGF

	$f_c$ 3 dias (Mpa)	$\sigma$	C.V.	$f_c$ 7 dias (Mpa)	$\sigma$	C.V.	$f_c$ 14 dias (Mpa)	$\sigma$	C.V.	$f_c$ 28 dias (Mpa)	$\sigma$	C.V.	fck28
REF	23,82	5,79	24,3	26,66	3,01	11,3	28,22	2,12	7,5	29,12	3,33	11,4	26,05
10% EGF	22,72	2,80	12,3	24,92	2,80	11,2	27,53	2,84	10,3	28,23	4,73	13,8	24,66
30% EGF	16,09	1,47	9,13	16,15	1,66	10,3	17,20	2,59	15,0	20,38	2,73	13,4	17,87
50% EGF	13,02	1,92	14,7	13,68	2,25	16,4	13,46	3,79	28,2	15,18	2,08	13,7	13,27

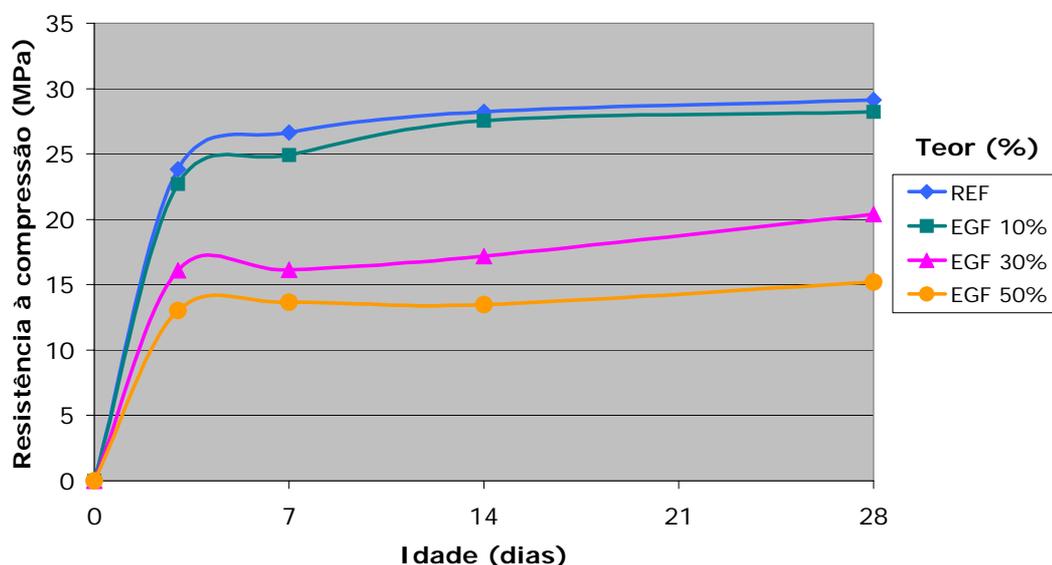


Figura 30: evolução da resistência à compressão ( $f_c$ ) de blocos de concreto para pavimentação com substituição parcial de cimento por EGF, ao longo do tempo

Como pode-se perceber, o crescimento da resistência ocorreu de forma muito rápida já nas primeiras idades, em todos os traços, tanto com EGF como os

traços de referência. Isto pode ser explicado basicamente pelo uso do cimento CPV-ARI, que confere resistências altas já nos primeiros dias de cura. Além disso, o próprio processo de cura a vapor tem por objetivo acelerar as reações de hidratação, e o reflexo disso é um ganho de resistência relativamente menor entre idades mais baixas (3 e 7 dias) e idades mais altas (14 e 28 dias). Os gráficos das figuras 31 e 32 procuram explicitar como foram estes ganhos de resistência ao longo do tempo, para os diferentes traços, considerando o ganho percentual acumulado de resistência até os 28 dias (que pode ser interpretado como o percentual de hidratação do cimento ao longo do tempo).

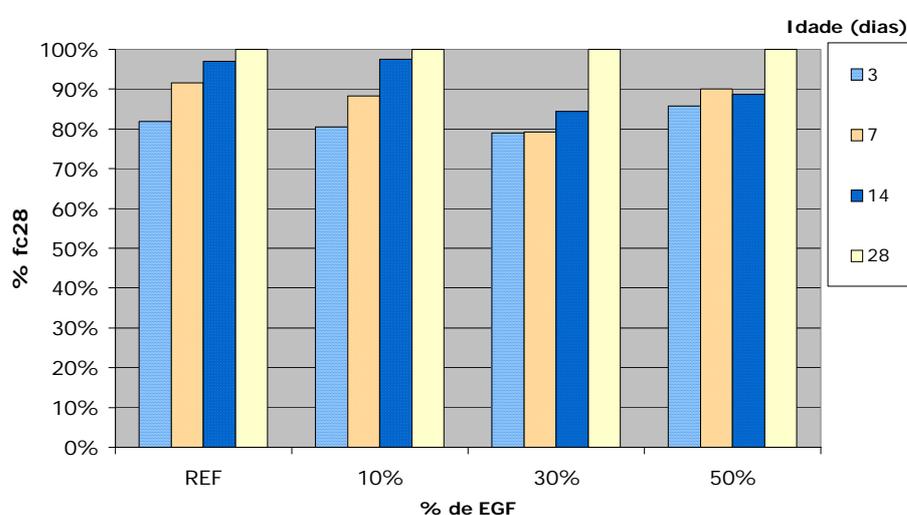


Figura 31: percentual de hidratação do concreto em relação a resistência à compressão aos 28 dias

Na figura 32 pode-se observar qual foi o incremento de resistência entre as idades de análise. Nota-se que o crescimento percentual de resistência vai diminuindo à medida que aumenta a idade de cura, para o traço de referência e também o traço com 10% de EGF. Porém, para os traços de 30% e 50% de EGF, observa-se um comportamento diferente. Entre 14 e 28 dias, o ganho de resistência foi percentualmente maior em relação aos demais traços. Este fato deve estar provavelmente associado ao fato de que a escória granulada de fundição, por ser um material pozolânico, tem seus compostos resistentes formados de maneira mais lenta, justamente a partir de suas reações com os produtos de hidratação do cimento. Portanto, é de se esperar que a escória reaja em idades mais avançadas. Além disso, contribui o fato da granulometria da

EGF, mesmo após a moagem realizada, ser maior do que a do cimento, o que também contribui sobremaneira para que as reações ocorram de maneira menos acelerada.

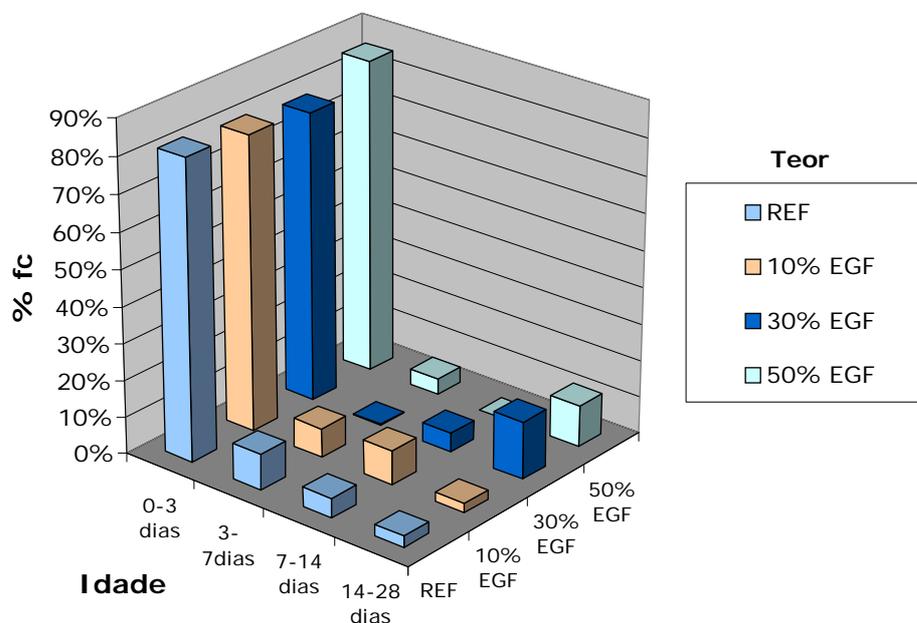


Figura 32: evolução do ganho (%) de resistência à compressão de blocos de concreto para pavimentação com substituição parcial de cimento por EGF, em diferentes idades

#### 6.2.1.1 Análise Estatística do Efeito das Variáveis Independentes

A análise da variância dos dados experimentais, através da ANOVA está exposta na tabela 23.

Tabela 23: análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, teor de EGF e da interação das duas variáveis sobre a resistência à compressão

	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F(calc)</b>	<b>F(tab)</b>	<b>Significância</b>
Idade	3	78,78173	8,617706	2,72	S
Teor	3	960,9019	105,1103	2,72	S
Idade X TE	9	6,484837	0,709358	2,00	NS
Erro	78	9,141845			

GDL: Graus de liberdade

F(tab): Valor tabelado de F

Se  $f(\text{calc}) > f(\text{tab})$ : Efeito significativo

MQ: Média quadrática

NS: Valor não significativo

F(calc): Valor calculado de F

S: Valor significativo

Nota-se que o efeito da idade e do teor de escória de fundição, quando analisados isoladamente, resultam significativos. À medida que se aumenta a idade, há ganhos significativos de resistência, conforme esperado, ao passo que à medida que se aumenta o teor de EGF, a resistência à compressão decresce de maneira significativa. O efeito isolado dos fatores controláveis pode ser melhor visualizado através das figuras 33 e 34.

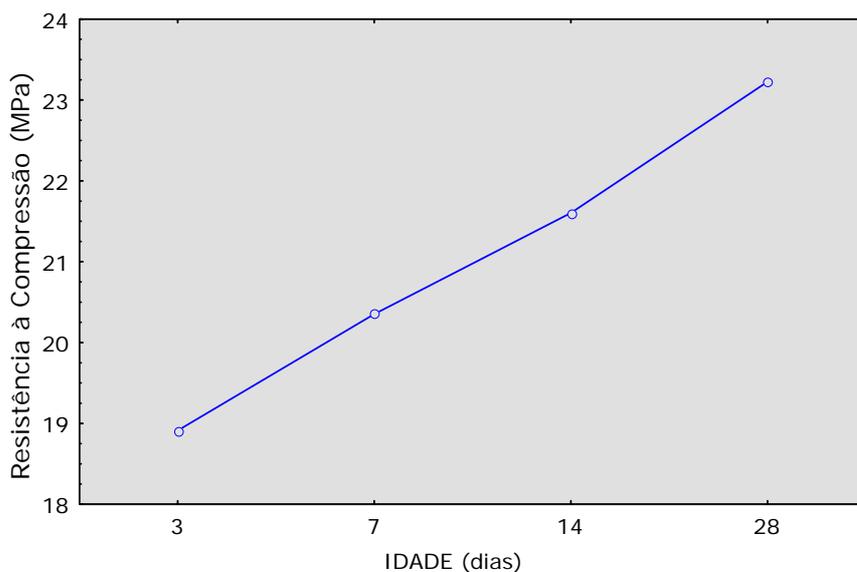


Figura 33: efeito principal da idade sobre a resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação com EGF

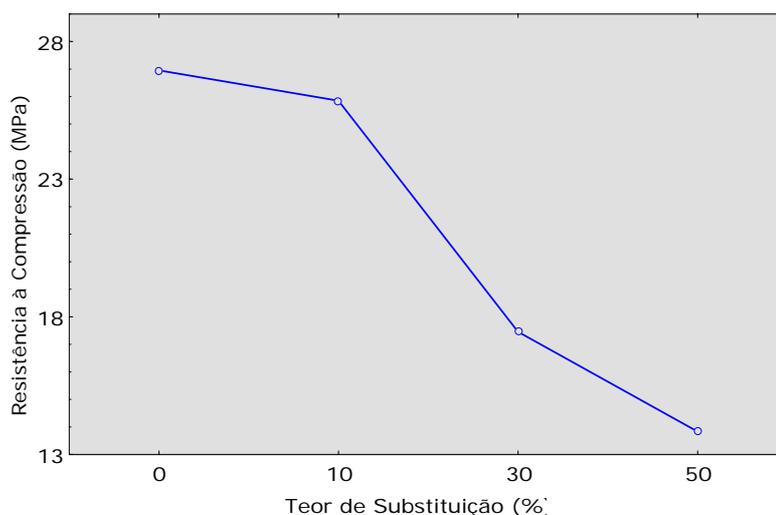


Figura 34: efeito principal do teor de EGF sobre a resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação

A proximidade entre os valores de referência e de 10% de substituição de cimento por EGF sugere, porém, que para esse intervalo de dados a diferença não é significativa. Este comportamento pode ser analisado através de uma análise múltipla de médias do intervalo de dados, ou simplesmente aplicando uma ANOVA com os dados deste intervalo. Os resultados, expressos na tabela 24, comprovam esta diferença como sendo não significativa.

Tabela 24: análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, teor de EGF e da interação das duas variáveis sobre a resistência à compressão

	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F(calc)</b>	<b>F(tab)</b>	<b>Significância</b>
Idade	1	67,98	5,60	4,08	S
Teor	3	13,88	1,14	2,84	NS
Idade X Teor	1	0,58	0,05	4,08	NS
Erro	38	12,13			

GDL: Graus de liberdade

MQ: Média quadrática

F(calc): Valor calculado de F

F(tab): Valor tabelado de F

NS: Valor não significativo

S: Valor significativo

Se  $f(\text{calc}) > f(\text{tab})$ : Efeito significativo

Analisando a interação entre ambos os fatores controláveis, não há influência significativa do efeito combinado entre o teor de EGF empregado e a idade de cura dos corpos-de-prova.

Além da análise de variância, procurou-se identificar também um modelo matemático que fosse representativo do comportamento das resistências dos blocos de concreto. O mesmo foi obtido através de uma análise de regressão linear múltipla, com auxílio do software *Statgraphics Plus*. Os dados referentes à análise constam nos apêndices 3 e 4. O modelo obtido para o comportamento da resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação, tendo a idade de ruptura e o teor de substituição como variáveis, está descrito a seguir:

$$f_c = 25,0739 + 0,162375 * id + 0,000269817 * TE^3 - 0,0188368 * TE^2$$

Onde:

- a)  $f_c$  = resistência à compressão dos blocos (em MPa);
- b)  $id$  = idade de ruptura (em dias);
- c)  $TE$  = teor de substituição de cimento por EGF (%).

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do modelo foi de 97,11%, ou seja, ele explica 97,11% da variabilidade de  $f_c$  em função das variáveis de análise (idade e teor de substituição).

#### 6.2.1.2 Análise da relação consumo de cimento / resistência à compressão obtida

A avaliação do consumo de cimento dos concretos produzidos para fabricação dos blocos de pavimentação, em termos da resistência à compressão obtida, pode constituir-se em interessante parâmetro comparativo de vantagens técnicas e econômicas. Conforme já fora ressaltado no capítulo 5, o cimento é o insumo que mais influencia no custo final dos artefatos pré-moldados produzidos. Desse modo, e coerente com o que cita Aïtcin (2000), a consideração do consumo de cimento necessário para cada MPa obtido, nos diferentes traços estudados (com e sem escória granulada de fundição) pode ser um indicativo de viabilidade ou não da EGF como substituição parcial do cimento.

Desta forma, a tabela 25 e a figura 35 ilustram o consumo de cimento do concreto referência e também dos demais concretos produzidos com escória granulada de fundição (EGF) como substituição ao cimento. Na referida tabela também é calculada a relação entre o consumo de cimento e a resistência média alcançada pelos blocos aos 28 dias de cura ( $f_c$  28). A análise comparativa destes resultados permite que se estime a relação custo/benefício percentual em relação aos concretos referência.

Tabela 25: relação do consumo de cimento (%) para cada MPa produzido, nos diferentes traços estudados

Custo/benefício dos concretos para blocos (em kg de cimento por MPa produzido)					
Traço	$f_c$ 28 dias (MPa)	C (kg/m <sup>3</sup> ) *	C (kg/m <sup>3</sup> ) **	Relação C**/fc	% do consumo
REF	29,12	411,50	395,04	13,57	100
10% EGF	28,23	370,35	355,54	12,59	93
30% EGF	20,38	288,05	276,53	13,57	100
50% EGF	15,18	205,75	197,52	13,01	96

C\* - consumo teórico de cimento, desprezando os vazios

C\*\* - consumo estimado de cimento considerando 4% de vazios no concreto

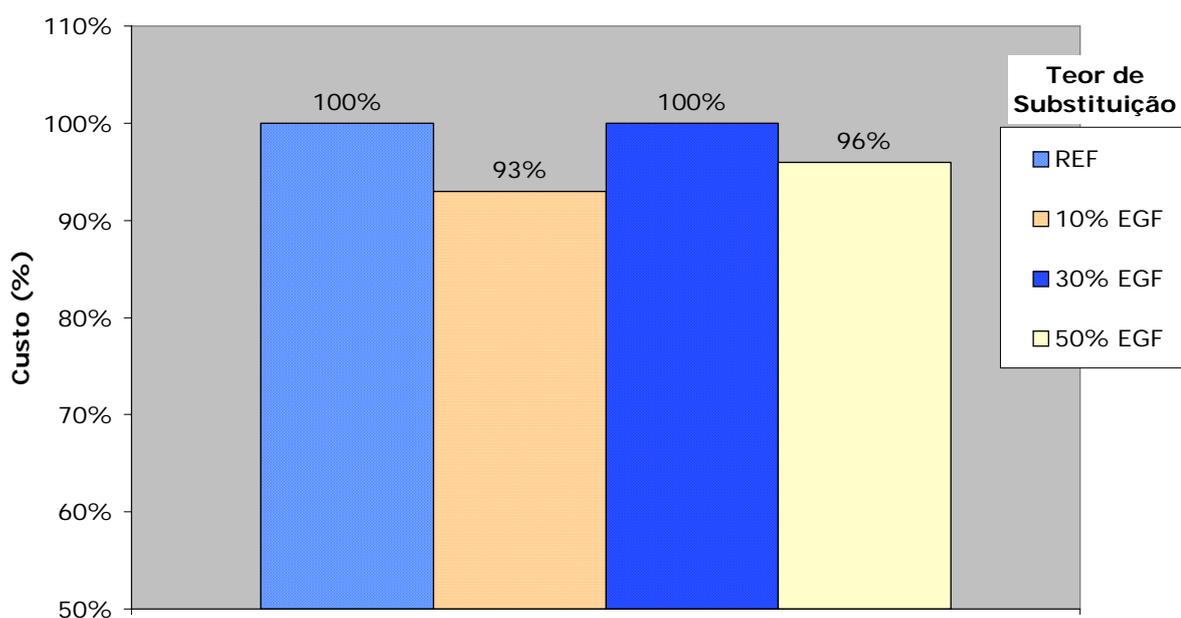


Figura 35: custo percentual para a produção de 1 MPa de concreto, em relação ao consumo de cimento do concreto referência

Analisando os dados da tabela, pode-se notar que uma substituição de 10% de cimento por escória gera uma economia no consumo de cimento (em kg/MPa produzido) da ordem de 7%. Esta economia é menor para substituição de 50% de cimento por escória, ficando em torno de 4%. A diminuição do consumo de cimento para cada MPa produzido tem reflexo direto no custo final dos blocos, principalmente pelo fato do cimento ser o insumo mais oneroso na composição dos blocos. Para o traço com 30% de escória, não foi identificada economia, quando da análise da relação consumo de cimento/MPa produzido.

### 6.2.2 Resistência ao Desgaste por Abrasão

Os resultados do ensaio de desgaste por abrasão, cujo procedimento de ensaio (pelo *Método Cientec* de desgaste por abrasão) foi descrito no capítulo 5, estão expressos na tabela 26. Conforme havia sido citado anteriormente, o ensaio originalmente deveria contemplar amostras ensaiadas nas idades de 7 e 28 dias, mas por problemas técnicos no laboratório de ensaio isto não foi passível de ser realizado. As amostras extraídas dos blocos foram, assim, ensaiadas nas idades de 10 e 28 dias.

Tabela 26: resultados médios e individuais de desgaste por abrasão nos corpo-de-prova extraídos dos blocos com substituição parcial de cimento por EGF e referência

Idade (dias)	Peça	CP n°	Índice de desgaste (mm)		Média Geral
			Individual	Média	
10	REF	1A-1	2,96	3,71	3,87
		1A-2	4,46		
	REF	1B-1	3,56	4,03	
		1B-2	4,49		
	10%	1A-1	4,46	4,50	
		1A-2	4,53		
	10%	1B-1	4,83	5,19	
		1B-2	5,54		
	30%	1A-1	3,50	3,92	
		1A-2	4,34		
	30%	1B-1	3,63	4,42	
		1B-2	5,21		
50%	1A-1	4,87	4,19		
	1A-2	3,50			
50%	1B-1	4,59	5,05		
	1B-2	5,50			
28	REF	1A-1	4,54	4,94	5,81
		1A-2	5,34		
	REF	1B-1	6,53	6,68	
		1B-2	6,83		
	10%	1A-1	2,92	4,49	
		1A-2	6,06		
	10%	1B-1	2,65	2,91	
		1B-2	3,17		
	30%	1A-1	5,12	5,21	
		1A-2	5,30		
	30%	1B-1	5,28	5,35	
		1B-2	5,42		
50%	1A-1	5,34	5,28		
	1A-2	5,21			
50%	1B-1	5,54	6,00		
	1B-2	6,45			

A análise estatística dos valores médios de cada corpo-de-prova da tabela 26, obtidos na análise de variância (ANOVA), e expressos pela tabela 27, demonstra que tanto a idade como o teor não exercem influência significativa sobre o desgaste por abrasão, nos blocos moldados com diferentes teores de substituição parcial de cimento por EGF, em relação aos blocos de referência.

Tabela 27: análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, teor de EGF e da interação das duas variáveis sobre o índice de desgaste por abrasão.

	GDL	MQ	F(calc)	F(tab)	Significância
Idade	3	0,505	1,062	4,07	NS
Teor	1	2,168	4,558	5,32	NS
Id X TE	3	1,736	3,649	4,07	NS
Erro	8	0,456			

GDL: Graus de liberdade  
NS: Valor não significativo

MQ: Média quadrática  
S: Valor significativo

F(calc): Valor calculado de F

### 6.2.3 Absorção de Água

A tabela 28 apresenta os valores de absorção dos blocos moldados com diferentes teores de EGF, bem como os blocos de referência, ensaiados conforme as prescrições da NBR 12 118 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991). Os dados completos do ensaio ao longo do tempo prescrito pela norma constam no apêndice 5 do trabalho.

Tabela 28: resultados da absorção dos blocos de concreto com distintos teores de EGF e dos blocos referência após imersão em água

	<b>Absorção (%)</b>	<b>Média (%)</b>
<b>REF</b>	5,59	5,59
	5,98	
	5,21	
<b>10% EGF</b>	5,56	5,83
	6,19	
	5,74	
<b>30% EGF</b>	5,91	6,08
	6,62	
	5,72	
<b>50% EGF</b>	6,22	5,71
	4,91	
	6,02	

Analogamente, a análise estatística através da ANOVA está descrita na tabela 29.

Tabela 29: análise de Variância (ANOVA) do efeito do teor de EGF sobre a absorção de água dos blocos

	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F(calc)</b>	<b>F(tab)</b>	<b>Significância</b>
Teor	3	0,130697	0,535315	4,07	NS
Erro	8	0,24415			

GDL: Graus de liberdade  
NS: Valor não significativo

MQ: Média quadrática  
S: Valor significativo

F(calc): Valor calculado de F

Através da análise estatística, pode-se notar que não foram identificadas diferenças significativas entre os blocos referência e os blocos com substituição parcial de cimento por EGF. Isso equivale dizer que, a substituição de parte do cimento por EGF não trouxe benefícios, mas também não afetou negativamente a absorção dos blocos, que mantiveram valores próximos aos blocos moldados com o concreto referência.

### 6.3 INCORPORAÇÃO DA EGF COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO

Neste item do capítulo seis, estão descritos os resultados dos ensaios realizados com blocos onde parte da areia foi substituída pela escória granulada de fundição, em diferentes teores já descritos no capítulo cinco.

#### 6.3.1 Resistência à Compressão

A tabela 30 e figura 36 ilustram, respectivamente, os valores médios e o gráfico da resistência à compressão dos blocos moldados com o concreto e referência e com os concretos com substituição parcial de agregado miúdo (areia) por EGF. Os valores individuais de resistência dos blocos constam no apêndice 1 do trabalho.

Tabela 30: resistência à compressão média ( $f_c$ ), em MPa, dos blocos de concreto para pavimentação com substituição parcial de agregado miúdo por EGF

	<b>fc 3 dias (Mpa)</b>	$\sigma$	<b>C.V.</b>	<b>fc 7 dias (Mpa)</b>	$\sigma$	<b>C.V.</b>	<b>fc 14 dias (Mpa)</b>	$\sigma$	<b>C.V.</b>	<b>fc 28 dias (Mpa)</b>	$\sigma$	<b>C.V.</b>	<b>fck28</b>
REF	23,82	5,79	24,3	26,66	3,01	11,3	28,22	2,12	7,5	29,12	3,33	11,4	26,05
10% EGF	18,50	2,30	12,4	19,32	2,12	10,9	19,95	2,85	14,3	20,85	2,16	10,3	18,86
30% EGF	16,22	3,07	18,9	16,75	0,60	3,6	16,66	2,72	16,3	18,48	1,09	5,9	17,48
50% EGF	20,76	2,59	12,5	21,94	2,87	13,1	21,91	2,23	10,2	24,01	3,87	16,1	20,44

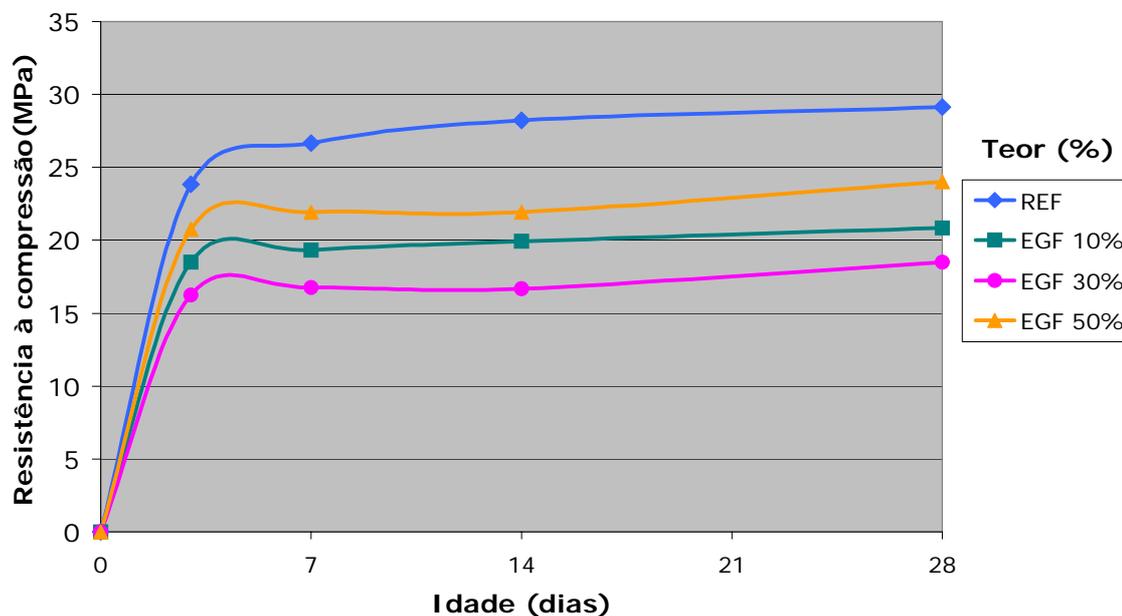


Figura 36: evolução da resistência à compressão de blocos com substituição parcial de agregado miúdo por EGF, em diferentes idades

Ao avaliar-se os valores obtidos, nota-se que há um decréscimo de resistência à compressão, à medida que se aumenta o teor de EGF de 0% até 30%. Entre 30% e 50% de substituição, porém, esta tendência se inverte. Embora a resistência dos blocos com 50% de EGF ainda tenha sido menor do que os blocos de referência, esta diferença é claramente menor do que para os teores de 10% e 30%. Este pode ser um indicativo de que teores superiores a 50% de escória substituindo a areia tendem a melhorar o desempenho dos blocos. Em quantidades reduzidas (nos teores de 10% e 30%), este efeito pode não ser tão significativo quando da utilização de teores mais elevados (50% ou mais), fato pelo qual as curvas de resistência apresentam tal comportamento. Além do mais, a granulometria da EGF, embora semelhante à da areia utilizada, pode estar conferindo uma melhor compactação ao concreto produzido.

O comportamento do ganho de resistência ao longo do tempo, está ilustrado nos gráficos das figuras 37 e 38.

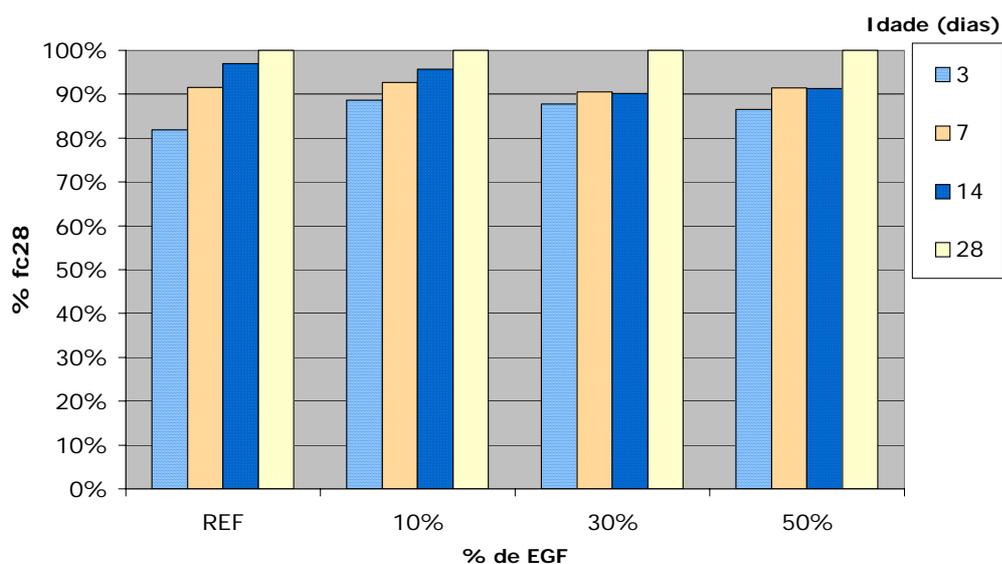


Figura 37: percentual de hidratação do concreto em relação a resistência à compressão aos 28 dias

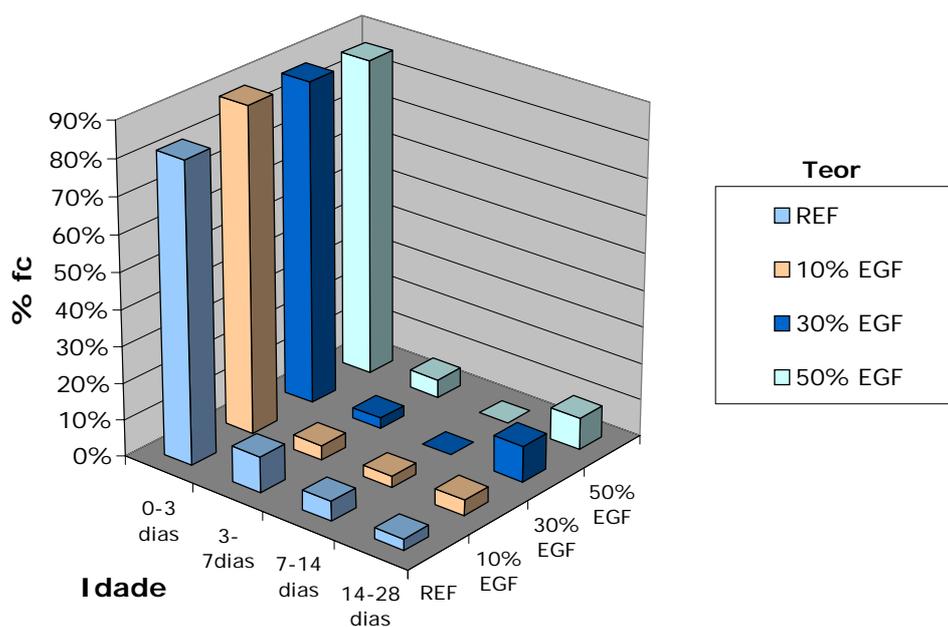


Figura 38: evolução do ganho (%) de resistência à compressão de blocos com substituição parcial de agregado miúdo por EGF, em diferentes idades

A figura 38 demonstra que, analogamente ao comportamento da escória como substituição parcial do cimento, os ganhos de resistência ocorreram de maneira acelerada nos primeiros dias (fruto das condições de cura e do cimento ARI utilizado). A partir do 3º dia até o 28º dia, os incrementos de resistência vão

diminuindo para os blocos de referência, ao passo que nos concretos com EGF, há um ganho percentual de resistência maior, entre o 14<sup>o</sup> e o 28<sup>o</sup> dia.

### 6.3.1.1 Análise Estatística do Efeito das Variáveis Independentes

Em prosseguimento ao processo experimental, foram realizadas as análises estatísticas através da ANOVA, descritas a seguir.

A tabela 31 ilustra a análise de variância (ANOVA) realizada sobre os dados, de modo a identificar a significância ou não das variáveis, bem como sua interação.

Tabela 31: análise de Variância (ANOVA) do efeito da idade, teor de EGF e da interação das duas variáveis sobre a resistência à compressão

	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F (calc)</b>	<b>F (tab)</b>	<b>Significância</b>
Idade	3	47,965	4,953	2,72	S
Teor	3	387,014	39,968	2,72	S
Id X TE	9	3,613603	0,523	2,00	NS
Erro	80	9,683			

GDL: Graus de liberdade  
NS: Valor não significativo

MQ: Média quadrática  
S: Valor significativo

F (calc): Valor calculado de F

A figura 39 indica o efeito isolado da idade sobre a resistência à compressão.

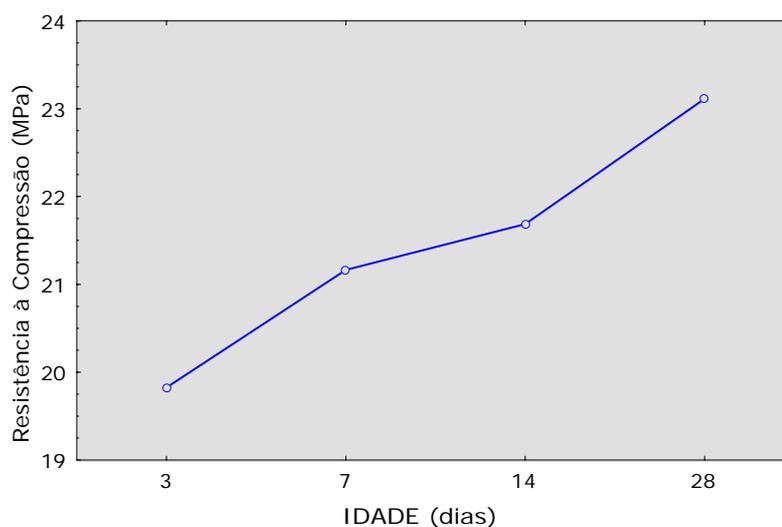


Figura 39: efeito principal da idade sobre a resistência mecânica dos blocos com EGF

Com base nos resultados obtidos pela ANOVA, nota-se diferenças significativas entre os valores de resistência, como esperado, à medida que se aumentava a idade de ruptura dos blocos. Da mesma forma, a diferença entre resistências para o efeito isolado do teor de substituição também foi considerado significativo. Estas considerações são comprovadas através da tabela 31 e da figura 40.

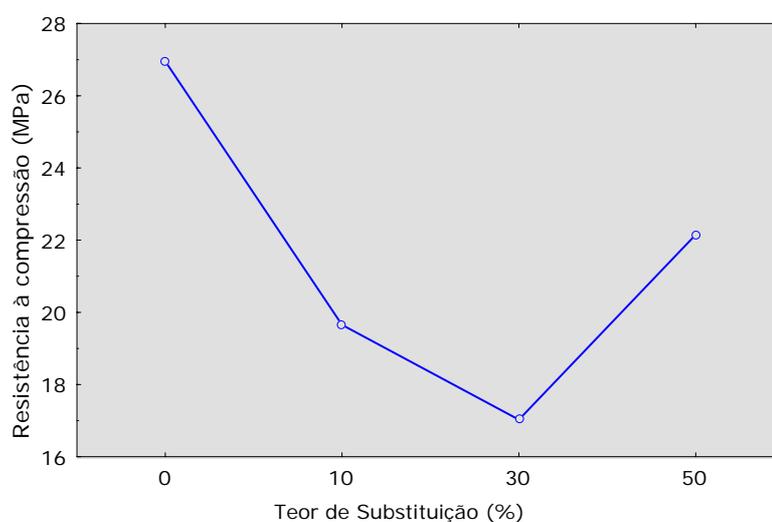


Figura 40: efeito principal do teor de substituição de agregado miúdo por EGF sobre a resistência mecânica dos blocos de concreto para pavimentação

A interação entre os fatores controláveis (idade e teor de substituição), conforme ilustra a tabela 31, não exerce efeito combinado significativo sobre a resistência dos blocos de concreto para pavimentação.

Tal qual para a situação de substituição parcial de cimento por EGF, procurou-se identificar um modelo matemático que fosse representativo do comportamento das resistências dos blocos de concreto, para o caso de substituição parcial do agregado miúdo. O mesmo foi obtido através de uma análise de regressão linear múltipla. Os dados referentes à análise constam no anexo 5. O modelo obtido para o comportamento da resistência à compressão dos blocos, tendo a idade de ruptura e o teor de substituição como variáveis, está descrito a seguir:

$$f_c = 24,397 + 0,127243 \cdot id - 0,682945 \cdot TE + 0,0121621 \cdot TE^2$$

Onde:

- a)  $f_c$  = resistência à compressão dos blocos (em MPa);
- b)  $id$  = idade de ruptura (em dias);
- c)  $TE$  = teor de substituição de areia por EGF (%)

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do modelo foi de 93,07%, ou seja, ele explica 93,07% da variabilidade de  $f_c$  em função das variáveis de análise (idade e teor de substituição).

### 6.3.1.2 Análise do consumo de areia/resistência obtida

Da mesma forma que foi proposta no caso da substituição parcial do cimento por escória granulada de fundição, fez-se um levantamento do consumo de areia, nos diferentes traços estudados, para cada MPa de concreto produzido. Os resultados estão expressos nas tabelas 32 e na figura 41.

Tabela 32: relação do consumo de areia (%) para cada MPa produzido, nos diferentes traços estudados

Custo/benefício dos concretos para blocos (em kg de areia por MPa produzido)					
Traço	$f_c$ 28 dias (MPa)	AM (kg/m <sup>3</sup> )*	AM (kg/m <sup>3</sup> )**	Relação AM**/fc	% do consumo
REF	29,12	1152,2	1106,11	37,99	100%
10% EGF	20,85	1036,98	995,5	47,74	126%
30% EGF	18,48	806,54	774,28	41,90	110%
50% EGF	24,01	576,1	553,05	23,03	61%

AM\* - consumo teórico de areia média, desprezando os vazios

AM\*\* - consumo estimado de cimento considerando 4% de vazios no concreto

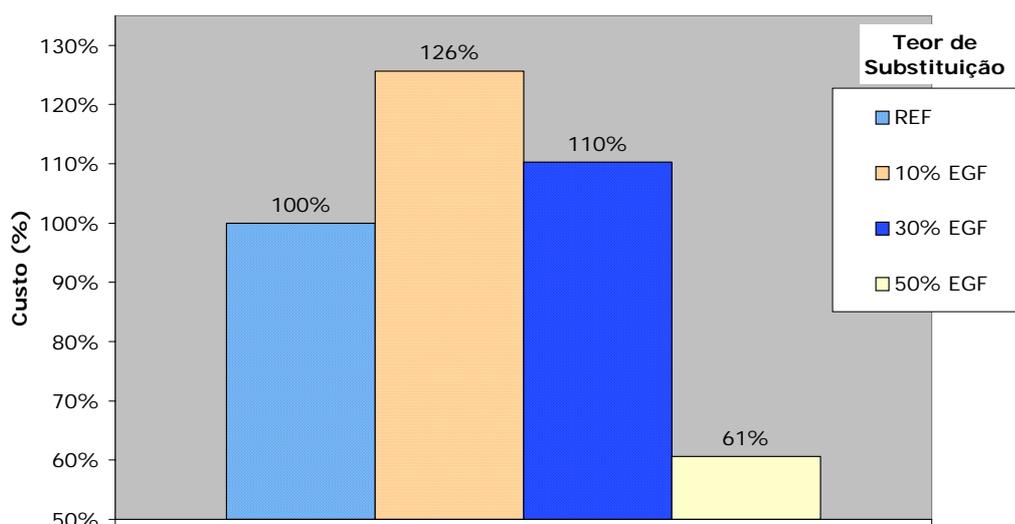


Figura 41: custo percentual para a produção de 1 MPa de concreto, em relação ao consumo de areia média do concreto referência

Conforme corroboram os dados da tabela 32 e da figura 41, há um incremento no custo de cada MPa produzido nos traços de 10 e 30%, reflexo direto da queda de resistência atingida pelos blocos. Estes correspondem, respectivamente, à valores de 26% e 10%, respectivamente. Era esperado que estes valores fossem menores para o teor de 50% de EGF, uma vez que ficara identificado uma mudança de comportamento para esse teor, com uma resistência à compressão superior em relação aos demais teores de substituição de areia estudados. Porém, para a substituição de 50% de areia média por EGF, há uma considerável queda do custo de cada MPa produzido por kg de areia consumido. Isto significa que para um mesmo patamar de resistência, existe possibilidade de uma economia potencial de até 39% em relação ao consumo de areia. Obviamente, para este caso específico dever-se-ia levar em conta também as variações de consumo de cimento para diferentes níveis de resistência, o que alteraria esta relação direta de custos.

### 6.3.2 Resistência ao Desgaste por Abrasão

A tabela 33 faz menção aos resultados do ensaio de desgaste por abrasão, para as amostras extraídas dos blocos com substituição de agregado miúdo por

escória granulada de fundição. Por problemas operacionais durante as concretagens foi possível a utilização de apenas um bloco para extração dos corpos-de-prova. Pelo mesmo motivo, não foi possível a realização dos ensaios para a idade de 10 dias, tal qual ocorrera para os blocos com EGF substituindo parcialmente o cimento. O relatório de ensaio da CIENTEC consta no anexo 3 do trabalho.

Tabela 33: resultados médios e individuais de desgaste por abrasão nos corpo-de-prova extraídos dos blocos com substituição parcial de areia média por EGF e referência

Peça	CP n°	Índice de desgaste (mm)	
		Individual	Média
REF 28 dias	1A-1	4,54	4,94
	1A-2	5,34	
REF 28 dias	1B-1	6,53	6,68
	1B-2	6,83	
10% 28 dias	9A-1	7,05	5,76
	9A-2	4,46	
30% 28 dias	11A-1	7,64	8,58
	11A-2	9,53	
50% 28 dias	10A-1	6,69	7,74
	10A-2	8,78	

A análise estatística dos dados demonstra não haverem diferenças significativas entre os diferentes traços estudados, muito embora se note um ligeiro aumento do índice de desgaste das peças com maiores teores de substituição de areia por EGF. Os dados referentes à análise estatística estão expressos pela tabela 34.

Tabela 34: análise de Variância (ANOVA) do efeito do teor de EGF sobre o índice de desgaste por abrasão

	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F(calc)</b>	<b>F(tab)</b>	<b>Significância</b>
Teor	3	6,284	130,77	215,7	NS
Erro	1	0,4805			

GDL: Graus de liberdade

MQ: Média quadrática

F(calc): Valor calculado de F

F(tab): Valor de f tabelado

NS: Valor não significativo

S: Valor significativo

Se  $f(\text{calc}) > f(\text{tab})$ : efeito significativo

### 6.1.3 Absorção de Água

A tabela 35 apresenta os valores de absorção dos blocos moldados com diferentes teores de EGF, bem como os blocos de referência, ensaiados conforme as prescrições da NBR 12 118 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991). Os dados completos constam no apêndice 5.

Tabela 35: resultados da absorção dos blocos de concreto com distintos teores de EGF e dos blocos referência após imersão em água

	<b>Absorção (%)</b>	<b>Média (%)</b>
<b>REF</b>	5,59	5,59
	5,98	
	5,21	
<b>10% EGF</b>	6,08	5,98
	5,87	
	5,99	
<b>30% EGF</b>	6,00	5,96
	5,49	
	6,38	
<b>50% EGF</b>	5,04	5,81
	6,15	
	6,24	

Novamente, a análise estatística dos dados, através da ANOVA e descrita na tabela 36 indica que não há diferenças significativas nos valores encontrados de absorção, na comparação do traço referência com os traços com EGF. Isto significa dizer novamente que, com base nos dados ensaiados, não há indicação de benefícios nem prejuízos significativos na absorção dos blocos com EGF, quando comparados com os blocos do concreto referência.

Tabela 36: análise de Variância (ANOVA) do efeito do teor de EGF sobre a absorção de água dos blocos para pavimentação

	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F(calc)</b>	<b>F(tab)</b>	<b>Significância</b>
Teor	3	0,094856	0,471059	4,07	NS
Erro	8	0,201367			

GDL: Graus de liberdade  
NS: Valor não significativo

MQ: Média quadrática  
S: Valor significativo

F(calc): Valor calculado de F

## 7 CONCLUSÕES

Tendo em vista o que foi discutido, pode-se fazer um apanhado geral dos principais pontos observados ao longo deste trabalho. O objetivo principal, conforme relatado no início do texto, era de contribuir para a viabilização da utilização da EGF em concretos para blocos de pavimentação, através da avaliação de suas principais características mecânicas e sua absorção de água. As características físico-químicas da escória, conjugadas com o bom desempenho do material, descrito por outros autores como Stroup et al. (2003) Ceccatto (2003) e Reschke (2003), credenciam a EGF como um potencial subproduto passível de utilização como insumo para a construção civil. Para que tal perspectiva futura se confirme, é preciso que haja um esforço conjunto de todos os agentes envolvidos no processo, de modo a viabilizar o resíduo, tal qual outros exemplos bem sucedidos já incorporados à cadeia produtiva da Engenharia Civil. Ademais, a consideração de práticas ambientalmente atraentes como a reciclagem dos resíduos produzidos pela sociedade pode e deve ser o primeiro passo para a criação de práticas sustentáveis.

A adequação de um resíduo, todavia, envolve um processo de gestão ambiental amplo, onde diversos aspectos devem ser contemplados. A viabilização técnica da EGF como insumo e a busca de alternativas de utilização são alguns destes aspectos. Com este embasamento foi realizado este trabalho experimental, dos quais pode-se tecer os comentários específicos abaixo descritos, a partir dos resultados obtidos.

### 7.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A etapa de produção dos blocos serviu para avaliar as condições do concreto fresco com escória granulada de fundição (EGF), comparativamente com os concretos referência produzidos. A substituição parcial de cimento por EGF teve efeito imediato na coloração dos blocos, que foram de um cinza claro para um cinza escuro, à medida que se aumentava o teor de substituição. Não ocorreram,

porém, variações significativas na trabalhabilidade, bem como de acabamento superficial dos blocos. Por sua vez, os blocos produzidos com EGF substituindo parcialmente o agregado miúdo não tiveram alterações na coloração dos blocos, em relação aos blocos referência. A trabalhabilidade do concreto, para moldagem na vibro-prensa, também não foi afetada de maneira significativa, muito embora os concretos com teores altos de substituição de areia por escória (50%) apresentassem um aspecto aparentemente mais seco.

## 7.2 QUANTO À UTILIZAÇÃO DA EGF COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO

Os resultados apresentados, e sua análise estatística, permitem afirmar que não há diferenças significativas na substituição de até 50% do cimento por EGF, na questão de desgaste por abrasão e absorção de água. Por outro lado, nota-se um decréscimo das resistências mecânicas à compressão, à medida que se aumenta o teor de escória. Este decréscimo, porém, não é significativo para teores de até 10% de EGF em relação ao cimento. Desse modo, pode-se sugerir que teores de até 10% podem cumprir características de resistência bastante próximas às de um concreto convencional. Para teores maiores, a utilização de EGF seria indicada para a produção de blocos com exigências de resistência menores.

A análise do desempenho, porém, não deve ficar apenas na comparação pura e simples das resistências à compressão dos concretos referência e os concretos com EGF. O levantamento do custo da produção de 1 MPa de concreto é um parâmetro interessante a ser considerado e é indicativo de economia potencial na produção de blocos com a incorporação de EGF. A produção de um bloco para pavimentação que tenha 10% do cimento substituído por EGF envolve a produção de um concreto cujo consumo de cimento por MPa (C/MPa) equivale a 93% do consumo original de um concreto sem EGF.

Não é possível afirmar, porém, se o comportamento da escória granulada de fundição poderia ter sido ainda melhor, caso sua moagem tivesse sido mais eficiente e sua granulometria estivesse menor ou mais próxima da granulometria

do cimento. Um estudo amplo de finuras ótimas através de tempos de moagem parece ser, evidentemente, um passo obrigatório na otimização do produto.

O modelo apresentado para o comportamento da resistência à compressão ( $f_c$ ) do concreto para os blocos referência e com substituição parcial de cimento por EGF e válido para o intervalo de análise dos fatores controláveis do projeto experimental é dado por:

$$f_c = 25,0739 + 0,162375 * id + 0,000269817 * TE^3 - 0,0188368 * TE^2$$

( $R^2 = 97,11\%$ )

### 7.3 QUANTO À UTILIZAÇÃO DA EGF COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO (AREIA)

De maneira análoga ao comportamento apresentado na situação anterior, todos os concretos não apresentaram diferenças significativas quanto ao desgaste por abrasão e quanto à absorção de água, nos traços estudados. Nos valores da resistência à compressão, porém, é que residem as maiores considerações a serem observadas. A indicação de uma reversão do comportamento da resistência, que decai mais significativamente entre 10% e 30% de substituição do que para 50% indica que pode haver melhoria das propriedades resistentes, ou pelo menos manutenção das existentes, para teores de substituição além do máximo teor utilizado neste estudo. Para o intervalo de análise deste trabalho, porém, os valores indicam um decréscimo de resistência para todos os traços estudados.

O modelo apresentado para o comportamento da resistência à compressão ( $f_c$ ) do concreto para os blocos referência e com substituição parcial de agregado miúdo por EGF e válido para o intervalo de análise dos fatores controláveis do projeto experimental é dado por:

$$f_c = 24,397 + 0,127243 * id - 0,682945 * TE + 0,0121621 * TE^2$$

( $R^2=93,07$ )

Cabe salientar que as conclusões aqui alcançadas referem-se aos materiais, técnicas e condições experimentais empregados durante a realização da pesquisa. Embora sejam um indicativo das condições globais da escória como insumo potencialmente utilizável, sua reprodução em cenários diferenciados sempre demandará uma análise da compatibilidade dos materiais e equipamentos disponíveis para tal. Esta é, particularmente, uma característica intrínseca da tecnologia de fabricação de blocos pré-moldados de concreto, onde o binômio matérias-primas/equipamentos de vibro-compressão sempre desempenhará papel preponderante na obtenção e manutenção das propriedades do produto. Desse modo, pode-se dizer que as condições pouco favoráveis de vibro-compressão do maquinário de certo auxiliaram a avaliação da EGF, uma vez que a importância dos materiais na resistência final era maior. O uso de equipamentos de mais elevada capacidade (como as disponíveis na maioria das fábricas), contudo, pode levar inclusive à um desempenho mais pronunciado dos concretos para blocos produzidos com EGF.

## 8 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho foi mais uma contribuição no sentido de viabilizar e ampliar as possibilidades de utilização de escórias granuladas de fundição na indústria da construção civil. Todavia, outros aspectos, relativos ao seu desempenho mecânico e de durabilidade, e sua viabilização, podem e devem ser estudados. Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se citar:

- a) avaliação dos benefícios das reações da EGF (com cimento) com diferentes finuras, através de um estudo amplo de tempos de moagem;
- b) avaliação da EGF em blocos de concreto para alvenaria estrutural e de vedação;
- c) avaliação de teores intermediários entre 10% e 30% de substituição parcial de cimento por EGF, de modo a identificar se existe um valor específico entre eles onde passa a ser significativa a queda de resistência.
- d) avaliação da zona de transição de concretos produzidos com EGF, como substituição parcial ou total do agregado miúdo e como substituição parcial do cimento;
- e) estudo do efeito da EGF com outros resíduos em composições binárias e ternárias em blocos e concretos convencionais;
- f) avaliação da carbonatação de concretos convencionais produzidos com EGF;
- g) avaliação da EGF como agregado para argamassas;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADERIBIGBE, D.A.; OJOBBO, A.E. Properties of Cupola Slag as a Pozzolana and its Effects on Partial Replacement of Cement in a Mortar. **Conservation & Recycling**, Oxford, v.5, n.4, p. 203-208, 1982.

AÏTCIN, P-C. Cements of yesterday and today concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research**, New York, v. 30, n. 9, p.1349-1359, Sept. 2000.

ÂNGULO, S.C.; ZORDAN, S.E.; JOHN, V.M. Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 2001, São Paulo. **Materiais reciclados e suas aplicações**: anais. São Paulo: IBRACON, 2001. Disponível em: < <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/artigos1.htm> > Acesso em 03 jan. 2003.

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, 1999, San Sebastian. **Anais...** San Sebastian, Espanha: INASMET, 1999. p. 85-93.

ARAÚJO, P.R.; TUCCI, C.E.M.; GOLDENFUM, J.A. Avaliação da Eficiência dos Pavimentos Permeáveis na Redução de Escoamento Superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, julho/setembro 2000 Disponível em: <<http://www.abrh.org.br>>. Acesso em 20 jun. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). O Desenho do Caminho: Blocos de concreto ganham as ruas, calçadas e cidades. **Cimento Hoje**, São Paulo, ano 5, n.33, abr. 2001 Disponível em: <[http://www.abcp.org.br/downloads/cimento\\_hj/jornal\\_33/prefabric.htm](http://www.abcp.org.br/downloads/cimento_hj/jornal_33/prefabric.htm)> Acesso em: 22 dez. 2002.

\_\_\_\_\_. Piso Intertravado Ganha Calçadas do Mundo. (2002a) Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/intertravados.htm>> Acesso em: 22 dez. 2002. (2002a)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO –(ABIFA). **Manual de Regeneração e Reuso de Areias de Fundição**. São Paulo, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5733**: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5737**: Cimento Portland Resistente a Sulfatos. Rio de Janeiro, 1992a.

\_\_\_\_\_. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos: determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992b.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 9780**: peças de concreto para pavimentação determinação da resistência à compressão - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987a.

\_\_\_\_\_. **NBR 9781**: peças de concreto para pavimentação - Especificação. Rio de Janeiro, 1987b.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 1987c.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578**: Cimento Portland composto– especificação. Rio de Janeiro, 1991a

\_\_\_\_\_. **NBR12118**: Blocos Vazados de Concreto Simples para Alvenaria: determinação da absorção de água, teor de umidade e área líquida. Rio de Janeiro, 1991b

\_\_\_\_\_. **NBR12653**: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992c. \_\_\_\_\_  
**NM 248**: Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001

BOEHM, M. Cupola vs. Eletric Melt: A Battle for Melting Efficiency. **AFS Newsletter**, Spring 2003 Disponível em:  
<[http://www.wisconsinafs.org/news\\_letter.htm](http://www.wisconsinafs.org/news_letter.htm)> Acesso em: 23 jun. 2003.

BOURDEAU, L. The Agenda 21 on Sustainable Construction. In: CIB SYMPOSIUM ON CONSTRUCTION AND THE ENVIRONMENT IN LATIN AMERICA, 2000. São Paulo. Anais... São Paulo: CIB; POLI-USP, 2000.

CASPERS, K.H. Fusão de ferro fundido sintético em forno cubilô. **Revista Fundação e Serviços**, São Paulo, Março, 1999, p.34 - 44

CECCATTO, D.M. **Avaliação da Utilização de Escória Granulada de Fundição (EGF) como Substituição de Parte do Cimento em Concreto**: propriedades mecânicas. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais - PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CERJAN-STEFANOVIC, S.; RASTOVCAN-MIOC, A.; NOVOSEL-RADOVIC, V.J. Mechanical properties of cement with addition of electric furnace slag. **Metalurgija**, vol. 36, part 2/ abril/junho, 1997. p.93-98.

CERVO, A. L.; BERVIAN, A. **Metodologia Científica**. 5 ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002. 242p.

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.

CÓDIGO Estadual do Meio Ambiente. Porto Alegre, Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul, 2000.

DAL MOLIN, D.C.C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica**. 1995, 286 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de

Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

DONAIRE, D. A Internalização da Gestão Ambiental na Empresa. **Revista de Administração**, São Paulo, v.31, n.1, p. 44-51, jan./mar. 1996.

EUROPEAN IPPC BUREAU - EUROPEAN COMMISSION. Integrated Pollution Prevention and Control. Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundry Industries. 2002. Disponível em: SEPA (Scottish Environment Protection Agency)

<<http://www.sepa.org.uk/breafs/pdfs/smitheries.pdf>> Acesso em: 21 set. 2003.

FRASSON JÚNIOR, A. **Proposta de Metodologia de Dosagem e Controle no Processo Produtivo de Blocos de Concreto para Alvenaria Estrutural**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FRASSON JÚNIOR, A.; OLIVEIRA, A.L.; PRUDÊNCIO, L.R. Influência do Processo produtivo nas Resistências dos Blocos de Concreto. In. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2002.

FROSCH, R.A. No caminho para o fim dos resíduos – reflexões sobre uma nova ecologia nas empresas. **TECBAHIA**, Revista Bahiana de Tecnologia, v. 12, n. 2, p. 42-55, maio/ago. 1997.

FU, X.; HOU, W.; YANG, C.; LI, D.; WU, X. Studies on Portland cement with large amount of slag. **Cement and Concrete Research**, New York, v. 30, n. 4, p. 645-649, Apr., 2000.

GIDLEY, J.S.; SACK, W.A. Environmental Aspects of Waste Utilization in Construction. **Journal of Environmental Engineering**, Los Angeles, v. 110, n.6., p.1117-1133, Dez. 1984

GONÇALVES, J.P. **Utilização do Resíduo de Corte de Granito (RCG) como Adição para Produção de Concretos**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

GRIMBERG, E. A Política Nacional de Resíduos Sólidos: A Responsabilidade das Empresas e a Inclusão Social. **Polis**, São Paulo, 6 ago. 2002. Disponível em: <<http://polis.org.br/publicacoes/artigos/pnrslc.html>> Acesso em: 03 jan. 2003.

GUEDERT, L.O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza da casca de arroz como material pozolânico**. 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 349 p.

HILTUNEN, D.; ROQHE, R.; WU, X. **Beneficial Reuse of Foundry Residual Wastes in Pennsylvania**: Physical Characterization of Materials; Environmental

Resources Research Institute; Pennsylvania State University, 1992. Disponível em: <<http://www.foundryrecycling.org>> Acesso em: 20 jun. 2003.

HOOTON, R. D. The Reactivity and Hydration Products of Blast Furnace Slag. In: MALHOTRA, V.M. **Supplementary Cementing Materials for Concrete**. Canada Centre for mineral and Energy Technology (CANMET), 1987. cap 4, p. 247 - 280.

JOHN, V.M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 112 f.. São Paulo, 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. Tese (Livre Docência) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo., São Paulo, 2000.

JUVAS, K.J. Experiences to measure the workability no-slump concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE "RHEOLOGY OF FRESH CEMENT AND CONCRETE", 1990, Liverpool. **Proceedings...** Edited by P.F.G Barfill

KAUFFMANN, P.; REGAN, R.W.; VOIGT, R.C. Survey of state environmental regulations impacting beneficial reuse of foundry residuals. **AFS Transactions**, Pennsylvania, p.527-538, 1996.

KLANG, A.; VIKMAN, P.A.; BRATTEBO, H. Sustainable management of demolition waste – an integrated model for the evaluation of environmental, economic and social aspects. **Resources, Conservation & Recycling**. Amsterdam, v.38, n.1, p. 1-18, Apr. 2003.

KOUDA, M. Experimental Pavement Using Household Waste Slag. **Waste Management**, New York, vol.16, n. 5 e 6, p.461-474. 1996.

LAHL, U. Recycling of Waste Foundry Sands. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, n.114, p.185-193, Apr. 1992.

LEITE, M.B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S.M. **Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos, produzidos com Resíduos de Concreto e Alvenaria**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LOUZADA, D.M. **Contribuição ao estudo do emprego das escórias siderúrgicas na fabricação de blocos pré-moldados**. 1991. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, Centro Tecnológico, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 1991.

MACHADO, A.T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. 2000, 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MALHOTRA, V.M. Properties of Fresh and Hardened Concrete incorporating Ground, Granulated, Blast Furnace Slag. In: MALHOTRA, V.M. **Supplementary Cementing Materials for Concrete**. Varennes, Quebec: CANMET: Canada Centre for mineral and Energy Technology, 1987. Cap. 4, p. 291 - 331.

MANCIO, M. **Contribuição ao Estudo da Instabilidade Volumétrica de Escórias de Aciaria Elétrica**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MARIOTTO, C.L. Regeneração de areias: uma tentativa de discussão sistemática. **Fundição & Matérias-Primas**, Caderno Técnico, São Paulo, p. A-T, jan.-fev.2000.

MARQUES FILHO, J.M. **Estado da arte do concreto compactado com rolo aplicado a barragens**: uma perspectiva. Seminário de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001

MAIA, M.J.S.; SILVEIRA, J.P.; CHERIAF, M.; ROCHA, J.C. Dosagem de blocos pré-moldados com substituição parcial ou total do cimento e substituição parcial ou total da areia fina por cinza pesada. In. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9. 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2002.

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

MEDEIROS, J.; DORNELES, V.P.; FRANCO, L.S. Blocos de concreto para alvenaria estrutural: avaliação de parâmetros básicos para a produção. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MANSORY FOR DEVELOPING COUTRIES, 5. 1994, Florianópolis. **Proceedings...** São Paulo: 1994.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994.

MEYST, P.H. Slag disposal and cupola drop removal. In: CUPOLA handbook. 5th ed. Illinois: U.S.A: American Foundrymen's Society, Des Plaines, , 1984. Chapter 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, 5., 1998, Joinville, SC/Brasil. **Anais...**, 1998. p. 801-804.

MORAES, C.A.M. Reciclagem de Resíduos Sólidos de Fundição: uma análise crítica. In: Congresso Anual Da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 57., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABMM, 2002. p. 1550-1559.

MORAES, C.A.M. Disciplina de fundição. Porto Alegre: NucMat/ACA Mecânica/UNISINOS, 2002. (notas de aula).

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

NISHIGAKI, M. Producing permeable blocks and pavement bricks from molten slag. **Waste Management**, New York, vol.20, v.2-3, p.185-192, Apr. 2000.

OLENBUSH, E. Foundries Share Successful Models for Beneficial Reuse. **Modern Casting**: news, ago 1999. Disponível em:  
<[http://www.ontariofoundry.com/news\\_2.html](http://www.ontariofoundry.com/news_2.html)> Acesso em: 23 jun. 2003.

PIESKE, A.; CHAVES FILHO, L.M.; REIMER, J.F. **Ferros fundidos cinzentos de alta qualidade**. 3. ed. Florianópolis: FIESC, 1980. 274p.

PIORO, L.S.; PIORO, I.L. Reprocessing of metallurgical slag into materials for the building industry. **Waste Management**, New York, v.24, n.4, p.371-379 2004.

POON, C.S., KOU, S.C., LAM, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. **Construction and Building Materials**, Guildford, v.16, n.5, p.281-289, July 2002.

POWEN, J.; SMITH, J. Uma revisão da fusão em forno cubilô. **Revista Fundição e Serviços**, São Paulo, p. 20-36. dez. 1999

RACHNER, H.G. Vantagens e desvantagens do forno cubilô, em função dos preços da energia. **Revista Fundição e Serviços**, São Paulo, p. 24-35. jun. 2001.

RAI, A.; PRABAKAR, C.B.; RAJU, C.B.; MORCHALLE, R.K. Metallurgical slag as a component in blended cement. **Construction and Building Materials**, Guildford, v.16, n.8, p.489-494, Dec. 2002.

REGAN, R.W.; TIKALSKY, P.J.; VOIGT, R.C. Beneficial use of fine foundry aggregate: three promising options. **AFS Transactions**, Pennsylvania, p.167-172, 1998.

RESCHKE, J.S. **Escória Granulada de Fundição Utilizada como Substituição ao Cimento em Concreto**: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003

RIBEIRO, J.L.D.; TEN CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: PPGEP/UFRGS, 2000. 130p. (Notas de aula).

RODRIGUES, P.P.F. **Fabricação de blocos pré-moldados de concreto para pavimentação**: prática recomendada. 2. Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, Ago. 1995. (BT-103)

SAMET, B.; CHAABOUNI, M. Characterization of the Tunisian blast-furnace slag and its application in the formulation of a cement. **Cement and Concrete Research**, New York, v.34, n.7, p.1153-1159, July 2004.

SALAS, M.; VERAS, J. Rice husk fly ash concrete blocks. **International Journal of Cement and Lightweight Concrete**, Essex, v.9, n.3, p.177-182, 1987.

SANTOS, S., PRUDÊNCIO Jr., L.R. Estudo comparativo da pozolanicidade de cinza volante e cinza de casca de arroz residual. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 1998.

SKVARA, F.; KASTANEK, F.; PAVELKOVA, I.; SOLCOVA, O.; MALETEROVA, Y.; SCHNEIDER, P. Solidification of waste steel foundry dust with Portland cement. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v.89, n.1, p.67-81, Jan. 2002.

SHEN, L.Y.; TAM, V.W.Y. Implementation of Environmental Management in the Hong Kong Construction Industry. **International Journal of Project Management**, Guildford, v.20, n.7, p.535-543, Oct. 2002.

SHRIVASTAVA, P.; HART, S. Creating Sustainable Corporations. **Business Strategy and the Environment**, Bradford, v. 4, p.154-165, 1995.

SILVA FILHO, A.F. **Contribuição ao estudo do desempenho de concreto produzido com agregado graúdo de escória de ferro-cromo**. 2001. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

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: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 30., 1999, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, MG/Brasil: ABMM, 1999. p. 609-623.

SOUSA, J.G.G. **Contribuição ao Estudo da Relação entre Propriedades e Proporcionamento de Blocos de Concreto**: aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

SOUZA, M.P. **Instrumentos de gestão ambiental**: fundamentos e prática. São Carlos, SP: Riani Costa, 2000. 108 p.

STROUP, W.W.; STROUP, R.D.; FALLIN, J.H. Cupola slag cement mixture and methods of making and using the same. United States Patent 6,521,039, USPTO Patent Full-Text and Image Database. Publicado em 18 fev. 2003. Disponível em: <<http://patft.uspto.gov/netacgi>> Acesso em: 01 jul. 2003.

TAN, K.; PU, X. Strengthening effects of finely ground fly ash, granulated blast furnace slag, and their combination. **Cement and Concrete Research**, New York, v.28, n.12, p.1819-1825, Dec. 1998.

TANGO, C.E.S. Fundamentos de Dosagem de Concreto para Blocos Estruturais. INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MANSORY FOR DEVELOPING COUTRIES, 5., 1994, Florianópolis, SC/Brazil. São Paulo: 1994.

TEIXEIRA, J.M.C. Sustentabilidade da Construção Urbana. Disponível em: <[http://www.iep.uminho.pt/iep/trab\\_alunos\\_tec\\_educacional/grupo11](http://www.iep.uminho.pt/iep/trab_alunos_tec_educacional/grupo11)> Acesso em: 03 jan. 2003

UEHARA, K.; SAKURAI, M. Application of foundry slag for metal cutting – performance as a diffusion inhibitor. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.62, n.4, p.435-439, Dec. 1996.

UNEP Working Group for Cleaner Production. **Cleaner Production Manual For The Queensland Foundry Industry**: A Overview of Foundry Processes. University of Queensland. Dez 1999

VALLINA, J.J. **Forno cubilô à coque**. Material elaborado para o curso sobre fornos cubilôs SENAI, 1998

VARGAS, A.S. **Estudo da Viabilidade do Uso do Pó de Aciaria Elétrica a Arco na Confeção de Blocos de Concreto para Pavimentação**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

VIEIRA, G.L. **Estudo do Processo de Corrosão sob Ação de Cloretos obtidos a partir de Resíduos de Construção e Demolição**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

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), 2002, Joinville, SC/Brasil. **Anais...** 2002. p. 833-841.

ZORDAN, S.E. **A Utilização de Entulho como Agregado na Confeção do Concreto**.1997 Dissertação (Mestrado em Engenharia) Departamento de Hidráulica e Saneamento, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

## APÊNDICES

**APÊNDICE 1: VALORES INDIVIDUAIS DE  $f_c$  DOS BLOCOS DE  
CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO COM SUBSTITUIÇÃO  
PARCIAL DE CIMENTO POR EGF**

	fc (KN)	fc (Mpa)			fc (KN)	fc (Mpa)			fc (KN)	fc (Mpa)			fc (KN)	fc (Mpa)
REF P1 - 03 DIAS	171	26,88		REF P1 - 07 DIAS	183,6	28,86		REF P1 - 14 DIAS	196,2	30,84		REF P1 - 28 DIAS	184	28,92
REF P2 - 03 DIAS	133,4	20,97		REF P2 - 07 DIAS	166,2	26,12		REF P2 - 14 DIAS	165,4	26,00		REF P2 - 28 DIAS	208,6	32,79
REF P3 - 03 DIAS	110	17,29	C.V.	REF P7 - 07 DIAS	154,2	24,24	C.V.	REF P3 - 14 DIAS	169	26,57	C.V.	REF P3 - 28 DIAS	164,2	25,81
REF P4 - 03 DIAS	118,2	18,58	24,29	REF P4 - 07 DIAS	-	-	11,28	REF P4 - 14 DIAS	174,6	27,45	7,53	REF P4 - 28 DIAS	162,2	25,50
REF P5 - 03 DIAS	172,4	27,10	DESVPAD	REF P5 - 07 DIAS	149,5	23,50	DESVPAD	REF P5 - 14 DIAS	196,4	30,87	DESVPAD	REF P5 - 28 DIAS	211,8	33,29
REF P6 - 03 DIAS	204,4	32,13	5,79	REF P6 - 07 DIAS	194,4	30,56	3,01	REF P6 - 14 DIAS	175,6	27,60	2,12	REF P6 - 28 DIAS	180,6	28,39
MÉDIA		23,82		MÉDIA		26,66		MÉDIA		28,22		MÉDIA		29,12
10% P1 - 03 DIAS	160,8	25,28		10% P1 - 07 DIAS	174,8	27,48		10% P1 - 14 DIAS	162	25,46		10% P1 - 28 DIAS	181,2	28,48
10% P2 - 03 DIAS	165,8	26,06		10% P2 - 07 DIAS	179,8	28,26		10% P2 - 14 DIAS	170,8	26,85		10% P2 - 28 DIAS	197,8	31,09
10% P3 - 03 DIAS	145,4	22,86	C.V.	10% P3 - 07 DIAS	159,4	25,06	C.V.	10% P3 - 14 DIAS	190,8	29,99	C.V.	10% P3 - 28 DIAS	-	-
10% P4 - 03 DIAS	115,9	18,22	12,33	10% P4 - 07 DIAS	129,9	20,42	11,24	10% P4 - 14 DIAS	147,6	23,20	10,31	10% P4 - 28 DIAS	199,9	31,42
10% P5 - 03 DIAS	138,2	21,72	DESVPAD	10% P5 - 07 DIAS	152,2	23,92	DESVPAD	10% P5 - 14 DIAS	190,4	29,93	DESVPAD	10% P5 - 28 DIAS	138,4	21,76
10% P6 - 03 DIAS	141,2	22,20	2,80	10% P6 - 07 DIAS	155,2	24,40	2,80	10% P6 - 14 DIAS	189,4	29,77	2,84	10% P6 - 28 DIAS	180,7	28,40
MÉDIA		22,72		MÉDIA		24,92		MÉDIA		27,53		MÉDIA		28,23
30% P1 - 03 DIAS	97,2	15,28		30% P1 - 07 DIAS	106	16,66		30% P1 - 14 DIAS	127,8	20,09		30% P1 - 28 DIAS	118,3	18,60
30% P2 - 03 DIAS	116	18,23		30% P2 - 07 DIAS	94,4	14,84		30% P2 - 14 DIAS	128,2	20,15		30% P2 - 28 DIAS	150	23,58
30% P3 - 03 DIAS	78,4	12,32	C.V.	30% P3 - 07 DIAS	96,2	15,12	C.V.	30% P3 - 14 DIAS	88,2	13,86	C.V.	30% P3 - 28 DIAS	134,4	21,13
30% P4 - 03 DIAS	107,6	16,91	15,36	30% P4 - 07 DIAS	111	17,45	10,26	30% P4 - 14 DIAS	101,8	16,00	15,06	30% P4 - 28 DIAS	111	17,45
30% P5 - 03 DIAS	93,8	14,74	DESVPAD	30% P5 - 07 DIAS	117,8	18,52	DESVPAD	30% P5 - 14 DIAS	97,4	15,31	DESVPAD	30% P5 - 28 DIAS	115	18,08
30% P6 - 03 DIAS	121	19,02	2,47	30% P6 - 07 DIAS	91	14,30	1,66	30% P6 - 14 DIAS	113,2	17,79	2,59	30% P6 - 28 DIAS	149,2	23,45
MÉDIA		16,09		MÉDIA		16,15		MÉDIA		17,20		MÉDIA		20,38
50% P1 - 03 DIAS	66,6	10,47		50% P1 - 07 DIAS	72,2	11,35		50% P1 - 14 DIAS	75	11,79		50% P1 - 28 DIAS	80,6	12,67
50% P2 - 03 DIAS	74,6	11,73		50% P2 - 07 DIAS	67,7	10,64		50% P2 - 14 DIAS	59,8	9,40		50% P2 - 28 DIAS	116,6	18,33
50% P3 - 03 DIAS	97,6	15,34	C.V.	50% P7 - 07 DIAS	101,9	16,02	C.V.	50% P3 - 14 DIAS	62	9,75	C.V.	50% P3 - 28 DIAS	102,6	16,13
50% P4 - 03 DIAS	81,6	12,83	14,72	50% P4 - 07 DIAS	88,8	13,96	16,45	50% P4 - 14 DIAS	90,6	14,24	28,18	50% P4 - 28 DIAS	83,4	13,11
50% P5 - 03 DIAS	80	12,58	DESVPAD	50% P5 - 07 DIAS	90,4	14,21	DESVPAD	50% P5 - 14 DIAS	108,8	17,10	DESVPAD	50% P5 - 28 DIAS	97,4	15,31
50% P6 - 03 DIAS	96,4	15,15	1,92	50% P6 - 07 DIAS	101	15,88	2,25	50% P6 - 14 DIAS	117,4	18,45	3,79	50% P6 - 28 DIAS	98,8	15,53
MÉDIA		13,02		MÉDIA		13,68		MÉDIA		13,46		MÉDIA		15,18

**APÊNDICE:** Valores de resistência a compressão dos blocos de concreto com substituição parcial de cimento por EGF

**APÊNDICE 2: VALORES INDIVIDUAIS DE  $f_c$  DOS BLOCOS DE  
CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO COM SUBSTITUIÇÃO  
PARCIAL DE AGREGADO MIÚDO POR EGF**

	fc (KN)	fc (Mpa)														
REF P1 - 03 DIAS	171	26,88		REF P1 - 07 DIAS	183,6	28,86		REF P1 - 14 DIAS	196,2	30,84		REF P1 - 28 DIAS	184	28,92		
REF P2 - 03 DIAS	133,4	20,97		REF P2 - 07 DIAS	166,2	26,12		REF P2 - 14 DIAS	165,4	26,00		REF P2 - 28 DIAS	208,6	32,79		
REF P3 - 03 DIAS	110	17,29	C.V.	REF P7 - 07 DIAS	154,2	24,24	C.V.	REF P3 - 14 DIAS	169	26,57	C.V.	REF P3 - 28 DIAS	164,2	25,81	C.V.	
REF P4 - 03 DIAS	118,2	18,58	24,29	REF P4 - 07 DIAS			11,28	REF P4 - 14 DIAS	174,6	27,45	7,53	REF P4 - 28 DIAS	162,2	25,50	11,45	
REF P5 - 03 DIAS	172,4	27,10		REF P5 - 07 DIAS	149,5	23,50		REF P5 - 14 DIAS	196,4	30,87		REF P5 - 28 DIAS	211,8	33,29		
REF P6 - 03 DIAS	204,4	32,13	DESVPAD	REF P6 - 07 DIAS	194,4	30,56	DESVPAD	REF P6 - 14 DIAS	175,6	27,60	DESVPAD	REF P6 - 28 DIAS	180,6	28,39	DESVPAD	
MÉDIA		23,82	5,79	MÉDIA		26,66	3,01	MÉDIA		28,22	2,12	MÉDIA		29,12	3,33	
10% P1 - 03 DIAS	125	19,65		10% P1 - 07 DIAS	131,4	20,65		10% P1 - 14 DIAS	113,2	17,79		10% P1 - 28 DIAS	131,4	21,41		
10% P2 - 03 DIAS	130,6	20,53		10% P2 - 07 DIAS	130,2	20,47		10% P2 - 14 DIAS	118,2	18,58		10% P2 - 28 DIAS	107,4	17,50		
10% P3 - 03 DIAS	96	15,09	C.V.	10% P3 - 07 DIAS	105,8	16,63	C.V.	10% P3 - 14 DIAS	148,2	23,30	C.V.	10% P3 - 28 DIAS	144,6	23,56	C.V.	
10% P4 - 03 DIAS	104,8	16,47	12,45	10% P4 - 07 DIAS	106,2	16,69	10,99	10% P4 - 14 DIAS	108,6	17,07	14,30	10% P4 - 28 DIAS	137,4	22,39	10,37	
10% P5 - 03 DIAS	132,4	20,81		10% P5 - 07 DIAS	137,1	21,55		10% P5 - 14 DIAS	122,5	19,26		10% P5 - 28 DIAS	128	20,86		
10% P6 - 03 DIAS	117,3	18,44	DESVPAD	10% P6 - 07 DIAS	126,6	19,90	DESVPAD	10% P6 - 14 DIAS	150,9	23,72	DESVPAD	10% P6 - 28 DIAS	119	19,39	DESVPAD	
MÉDIA		18,50	2,30	MÉDIA		19,32	2,12	MÉDIA		19,95	2,85	MÉDIA		20,85	2,16	
30% P1 - 03 DIAS	72,4	11,38		30% P1 - 07 DIAS	107,6	16,91		30% P1 - 14 DIAS	124,2	19,52		30% P1 - 28 DIAS	116,8	19,03		
30% P2 - 03 DIAS	121,8	19,15		30% P2 - 07 DIAS	109,8	17,26		30% P2 - 14 DIAS	80,6	12,67		30% P2 - 28 DIAS	119,9	19,54		
30% P3 - 03 DIAS	113,8	17,89	C.V.	30% P3 - 07 DIAS	101	15,88	C.V.	30% P3 - 14 DIAS	97	15,25	C.V.	30% P3 - 28 DIAS	106,6	17,37	C.V.	
30% P4 - 03 DIAS	121,3	19,07	18,94	30% P4 - 07 DIAS	102,5	16,11	3,59	30% P4 - 14 DIAS	107,7	16,93	16,31	30% P4 - 28 DIAS	106,2	17,30	5,90	
30% P5 - 03 DIAS	99,6	15,66		30% P5 - 07 DIAS	109,5	17,21		30% P5 - 14 DIAS	100,5	15,80		30% P5 - 28 DIAS	121,2	19,75		
30% P6 - 03 DIAS	90,4	14,21	DESVPAD	30% P6 - 07 DIAS	108,9	17,12	DESVPAD	30% P6 - 14 DIAS	126,1	19,82	DESVPAD	30% P6 - 28 DIAS	110	17,92	DESVPAD	
MÉDIA		16,22	3,07	MÉDIA		16,75	0,60	MÉDIA		16,66	2,72	MÉDIA		18,48	1,09	
50% P1 - 03 DIAS	149,2	23,45		50% P1 - 07 DIAS	135,8	21,35		50% P1 - 14 DIAS	143,4	22,54		50% P1 - 28 DIAS	120,1	19,57		
50% P2 - 03 DIAS	134,4	21,13		50% P2 - 07 DIAS	159	24,99		50% P2 - 14 DIAS	126	19,81		50% P2 - 28 DIAS	169,3	27,58		
50% P3 - 03 DIAS	111,4	17,51	C.V.	50% P7 - 07 DIAS	124,6	19,59	C.V.	50% P3 - 14 DIAS	148,6	23,36	C.V.	50% P3 - 28 DIAS	155	25,25	C.V.	
50% P4 - 03 DIAS	113	17,76	12,47	50% P4 - 07 DIAS	121,9	19,16	13,08	50% P4 - 14 DIAS	119,8	18,83	10,19	50% P4 - 28 DIAS	117,8	19,19	16,14	
50% P5 - 03 DIAS	147,8	23,23		50% P5 - 07 DIAS	165,3	25,98		50% P5 - 14 DIAS	140,6	22,10		50% P5 - 28 DIAS	148,6	24,21		
50% P6 - 03 DIAS	136,5	21,46	DESVPAD	50% P6 - 07 DIAS	130,8	20,56	DESVPAD	50% P6 - 14 DIAS	157,9	24,82	DESVPAD	50% P6 - 28 DIAS	173,2	28,22	DESVPAD	
MÉDIA		20,76	2,59	MÉDIA		21,94	2,87	MÉDIA		21,91	2,23	MÉDIA		24,01	3,87	

**APÊNDICE:** Valores de resistência a compressão dos blocos de concreto com substituição parcial de agregado miúdo por EGF

**APÊNDICE 3: RESUMO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE  
REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
DOS BLOCOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR  
EGF**

## Substituição parcial do cimento por EGF

### Multiple Regression Analysis

Dependent variable: fc

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	25,0739	0,530439	47,2701	0,0000
id	0,162375	0,026852	6,04704	0,0001
te <sup>3</sup>	0,000269817	0,0000346619	7,78425	0,0000
te <sup>2</sup>	-0,0188368	0,00177447	-10,6155	0,0000

### Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	529,491	3	176,497	169,05	0,0000
Residual	12,5286	12	1,04405		
Total (Corr.)	542,02	15			

R-squared = 97,6885 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 97,1107 percent

Standard Error of Est. = 1,02179

Mean absolute error = 0,742414

Durbin-Watson statistic = 1,09495

### The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between fc and 3 independent variables. The equation of the fitted model is

$$fc = 25,0739 + 0,162375 \cdot id + 0,000269817 \cdot te^3 - 0,0188368 \cdot te^2$$

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 97,6885% of the variability in fc. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 97,1107%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 1,02179. 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 0,742414 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 less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,0001, belonging to id. 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.

**APÊNDICE 4: RESUMO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE  
REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
DOS BLOCOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADO  
MIÚDO POR EGF**

## Substituição parcial do agregado miúdo por EGF

### Multiple Regression Analysis

Dependent variable: fc

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	24,397	0,582808	41,8612	0,0000
id	0,127243	0,0268035	4,74725	0,0005
te	-0,682945	0,051173	-13,3458	0,0000
te <sup>2</sup>	0,0121621	0,000981749	12,3882	0,0000

### Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	212,6	3	70,8665	68,12	0,0000
Residual	12,4834	12	1,04028		
Total (Corr.)	225,083	15			

R-squared = 94,4539 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 93,0673 percent

Standard Error of Est. = 1,01994

Mean absolute error = 0,710148

Durbin-Watson statistic = 2,37819

### The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between fc and 3 independent variables. The equation of the fitted model is

$$fc = 24,397 + 0,127243 \cdot id - 0,682945 \cdot te + 0,0121621 \cdot te^2$$

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 94,4539% of the variability in fc. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 93,0673%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 1,01994. 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 0,710148 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 0,0005, belonging to id. 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.

**APÊNDICE 5: RESULTADOS INDIVIDUAIS DE ABSORÇÃO DE  
ÁGUA DOS BLOCOS**

	Peso inicial (g)	24hs estufa	26hs estufa	24hs submerso	26hs submerso	28hs submerso	absorção (%)	Média (%)
REF	10/2/2004 - 15hs 3890,9	11/2/2004 - 15hs 3791,6	11/2/2004 - 17hs 3791,3	13/2/2004 - 11hs 3997,8	13/2/2004 - 13hs 4001	13/2/2004 - 15hs 4003,1	5,59	5,59
REF	10/2/2004 - 15hs 3767	11/2/2004 - 15hs 3669,8	11/2/2004 - 17hs 3671,6	13/2/2004 - 11hs 388,2	13/2/2004 - 13hs 3892,2	13/2/2004 - 15hs 3891,3	5,98	
REF	10/2/2004 - 15hs 3957,2	11/2/2004 - 15hs 3849,2	11/2/2004 - 17hs 3850,4	13/2/2004 - 11hs 4048,3	13/2/2004 - 13hs 4050,4	13/2/2004 - 15hs 4051,1	5,21	
10%	10/2/2004 - 15hs 3815,2	11/2/2004 - 15hs 3790	11/2/2004 - 17hs 3789,8	13/2/2004 - 11hs 3997,2	13/2/2004 - 13hs 4000,1	13/2/2004 - 15hs 4000,6	5,56	5,83
10%	10/2/2004 - 15hs 3799,9	11/2/2004 - 15hs 3689,7	11/2/2004 - 17hs 3690	13/2/2004 - 11hs 3888,5	13/2/2004 - 13hs 3918,3	13/2/2004 - 15hs 3918,3	6,19	
10%	10/2/2004 - 15hs 3912,4	11/2/2004 - 15hs 3835,6	11/2/2004 - 17hs 3834,4	13/2/2004 - 11hs 4048,6	13/2/2004 - 13hs 4053,9	13/2/2004 - 15hs 4054,6	5,74	
30%	10/2/2004 - 15hs 3762,7	11/2/2004 - 15hs 3673,2	11/2/2004 - 17hs 3672,3	13/2/2004 - 11hs 3884,2	13/2/2004 - 13hs 3888	13/2/2004 - 15hs 3889,5	5,91	6,08
30%	10/2/2004 - 15hs 3713,3	11/2/2004 - 15hs 3618,1	11/2/2004 - 17hs 3617,9	13/2/2004 - 11hs 3853,8	13/2/2004 - 13hs 3857,5	13/2/2004 - 15hs 3857,4	6,62	
30%	10/2/2004 - 15hs 3837,5	11/2/2004 - 15hs 3733,4	11/2/2004 - 17hs 3732,7	13/2/2004 - 11hs 3945,5	13/2/2004 - 13hs 3946,5	13/2/2004 - 15hs 3946,2	5,72	
50%	10/2/2004 - 15hs 3725,8	11/2/2004 - 15hs 3647,3	11/2/2004 - 17hs 3645,3	13/2/2004 - 11hs 3866,5	13/2/2004 - 13hs 3869	13/2/2004 - 15hs 3871,9	6,22	5,71
50%	10/2/2004 - 15hs 3679,3	11/2/2004 - 15hs 3600,9	11/2/2004 - 17hs 3658,9	13/2/2004 - 11hs 3835,5	13/2/2004 - 13hs 3838,5	13/2/2004 - 15hs 3838,4	4,91	
50%	10/2/2004 - 15hs 3724,2	11/2/2004 - 15hs 3640,2	11/2/2004 - 17hs 3638,4	13/2/2004 - 11hs 3853,8	13/2/2004 - 13hs 3857,5	13/2/2004 - 15hs 3857,4	6,02	

## Absorção – EGF como substituição parcial do cimento

	Peso inicial (g)	24hs estufa	26hs estufa	24hs submerso	26hs submerso	28hs submerso	absorção (%)	Média (%)
REF	10/2/2004 - 15hs 3890,9	11/2/2004 - 15hs 3791,6	11/2/2004 - 17hs 3791,3	13/2/2004 - 11hs 3997,8	13/2/2004 - 13hs 4001	13/2/2004 - 15hs 4003,1	5,59	5,59
REF	10/2/2004 - 15hs 3767	11/2/2004 - 15hs 3669,8	11/2/2004 - 17hs 3671,6	13/2/2004 - 11hs 3888,2	13/2/2004 - 13hs 3892,2	13/2/2004 - 15hs 3891,3	5,98	
REF	10/2/2004 - 15hs 3957,2	11/2/2004 - 15hs 3849,2	11/2/2004 - 17hs 3850,4	13/2/2004 - 11hs 4048,3	13/2/2004 - 13hs 4050,4	13/2/2004 - 15hs 4051,1	5,21	
10%	16/2/2004 - 14hs 3975,5	17/2/2004 - 14hs 3889,2	17/2/2004 - 16hs 3889,9	18/2/2004 - 18hs 4003,3	18/2/2004 - 18hs 4096,1	18/2/2004 - 18hs 4117,8	5,86	5,98
10%	16/2/2004 - 14hs 3886,4	17/2/2004 - 14hs 3778,5	17/2/2004 - 16hs 3780,1	18/2/2004 - 18hs 3996	18/2/2004 - 18hs 4000,3	18/2/2004 - 18hs 4000,8	5,84	
10%	16/2/2004 - 14hs 3785,3	17/2/2004 - 14hs 3668	17/2/2004 - 16hs 3665,4	18/2/2004 - 18hs 3797,7	18/2/2004 - 18hs 3892,9	18/2/2004 - 18hs 3894,4	6,25	
30%	16/2/2004 - 14hs 3686,7	17/2/2004 - 15hs 3600,3	17/2/2004 - 16hs 3600,5	18/2/2004 - 18hs 3810,3	18/2/2004 - 18hs 3812,7	18/2/2004 - 18hs 3813,4	5,91	5,96
30%	16/2/2004 - 14hs 3843,1	17/2/2004 - 15hs 3703,3	17/2/2004 - 16hs 3702,6	18/2/2004 - 18hs 3917,7	18/2/2004 - 18hs 3922,2	18/2/2004 - 18hs 3922,1	5,93	
30%	16/2/2004 - 14hs 3766,2	17/2/2004 - 15hs 3689,2	17/2/2004 - 16hs 3688,7	18/2/2004 - 18hs 3905,2	18/2/2004 - 18hs 3909,4	18/2/2004 - 18hs 3911,5	6,04	
50%	16/2/2004 - 14hs 3745,3	17/2/2004 - 15hs 3684,3	17/2/2004 - 16hs 3683,2	18/2/2004 - 18hs 3886,6	18/2/2004 - 18hs 3889,6	18/2/2004 - 18hs 3900,4	5,90	5,81
50%	16/2/2004 - 14hs 3666,2	17/2/2004 - 15hs 3594,8	17/2/2004 - 16hs 3594,6	18/2/2004 - 18hs 3805,8	18/2/2004 - 18hs 3810,6	18/2/2004 - 18hs 3811,9	6,05	
50%	16/2/2004 - 14hs 3800,3	17/2/2004 - 15hs 3702,5	17/2/2004 - 16hs 3701,7	18/2/2004 - 18hs 3901,7	18/2/2004 - 18hs 3904,4	18/2/2004 - 18hs 3904,4	5,48	

## Absorção – EGF como substituição parcial do agregado miúdo

## **ANEXOS**

**ANEXO 1: ANÁLISE GRANULOMÉTRICA A LASER DA EGF APÓS  
MOAGEM**



# PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

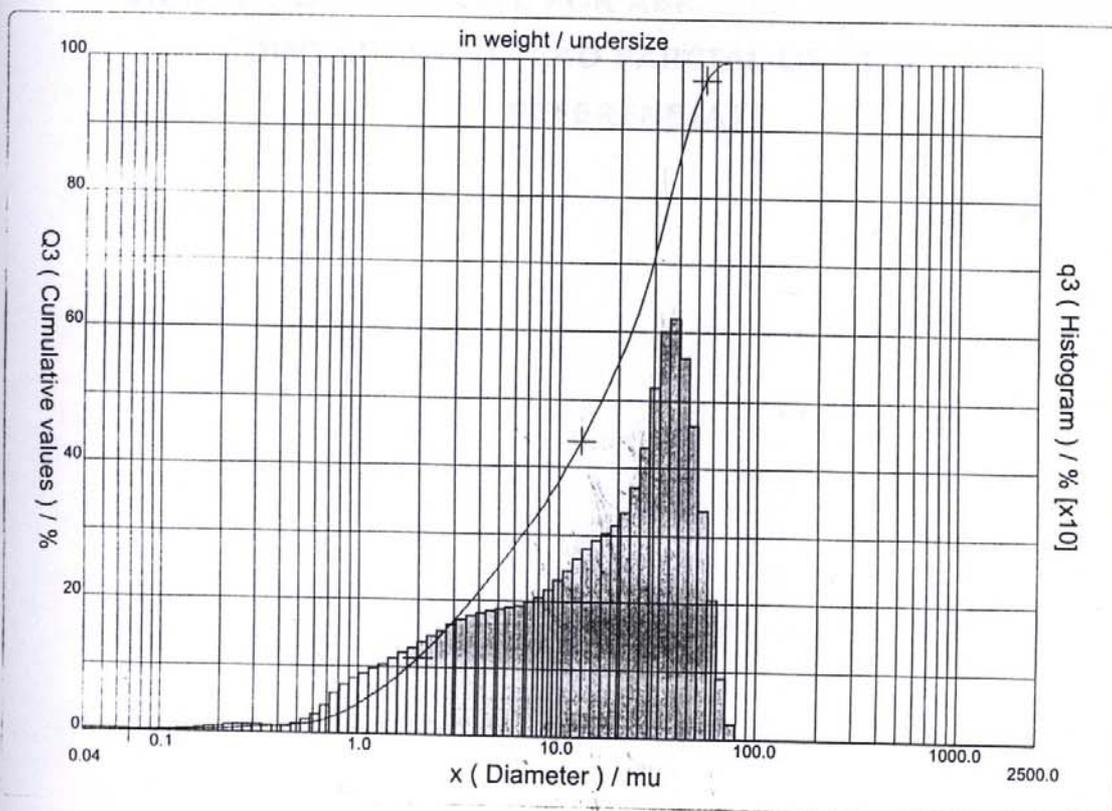
## CILAS 1180 Liquid

Range : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes



Sample Ref : EGF  
 Type produit : Escória  
 Client : UFRGS  
 Comments :  
 Liquid : Water (eau)  
 Dispersing agent :  
 Operator : Karelina  
 Company : UFRGS  
 Location : LACER  
 Date : 12/03/2004 Time : 15:15:38  
 Index meas. : 1590

Ultrasound : 60 s (+during)  
 Concentration : 143  
 Diameter at 10% : 1.79 mu  
 Diameter at 50% : 16.42 mu  
 Diameter at 90% : 43.19 mu  
 Mean diameter : 19.94 mu  
 Fraunhofer  
 Density/Factor : -----  
 Specific surface : -----  
 Automatic dilution : No / No  
 Meas./Rinse No. : 60/60/8  
 SOP : UFRGS N



Serial No. : 570

Ref : 2.r117.m0.66A1818/5.00/1590/m39.12.40.20.1Fh.20.40.20.1BhQ-0.0.0.0/300.0.15.g60.2.16.10.1.10.P7200.27.80.P30.0/V 3.10/635

**ANEXO 2: RELATÓRIO TÉCNICO DOS RESULTADOS DOS  
ENSAIOS DE DESGASTE POR ABRASÃO (BLOCOS COM EGF  
COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO E REFERÊNCIA)**



Documento **RELATÓRIO DE ENSAIO** Número **10126/29952**  
 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 DE DESGASTE POR ABRASÃO

**Cliente:** UFRGS – CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
 Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar  
 90035.190 – PORTO ALEGRE - RS

**Material ensaiado:** dezesseis peças de concreto para pavimentação do tipo UNISTEIN, entregues à CIENTEC pelo Cliente, já identificadas.

**Solicitação do Cliente:** determinação do índice de desgaste por abrasão.

**Data de entrega dos materiais:** 26 de janeiro de 2004.

**Período da realização do ensaio:** 03 a 09 de fevereiro de 2004.

**Método:** O ensaio foi realizado segundo o "Método CIENTEC de Desgaste por Abrasão", que simula um percurso de 500 m percorridos pelo corpo-de-prova submetido a uma pressão constante de 0,06 MPa sobre pó abrasivo carborundo. De cada peça entregue foram obtidos, através de corte em serra circular diamantada, dois corpos-de-prova para a realização do ensaio. O resultado é expresso em termos do índice de desgaste, que corresponde à média das diferenças entre as alturas iniciais e finais de cinco pontos do corpo-de-prova.

#### Resultados:

Peça	C.P. (nº)	Índice de desgaste (mm)		Identificação do Cliente	
		Individual	Média		
1 A	1A - 1	2,96	3,71	REF P5	
	1A - 2	4,46			
1 B	1B - 1	3,56	4,02		
	1B - 2	4,49			
2 A	2A - 1	4,46	4,50		10% P1
	2A - 2	4,53			
2 B	2B - 1	4,83	5,18		
	2B - 2	5,54			
3 A	3A - 1	3,50	3,92	30% P1	
	3A - 2	4,34			
3 B	3B - 1	3,63	4,42		
	3B - 2	5,21			
4 A	4A - 1	4,87	4,18	50% P2	
	4A - 2	3,50			
4 B	4B - 1	4,59	5,04		
	4B - 2	5,50			
5 A	5A - 1	4,54	4,94	REF P1	
	5A - 2	5,34			
5 B	5B - 1	6,53	6,68		
	5B - 2	6,83			

*Ki*  
1/2



Documento **RELATÓRIO DE ENSAIO** Número **10126/29952**  
 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.

Peça	C.P. (nº)	Índice de desgaste (mm)		Identificação do Cliente	
		Individual	Média		
6 A	6A - 1	2,92	4,49	10% P6	
	6A - 2	6,06			
6 B	6B - 1	2,65	2,91		
	6B - 2	3,17			
7 A	7A - 1	5,12	5,21		30% P5
	7A - 2	5,30			
7 B	7B - 1	5,28	5,35		
	7B - 2	5,42			
8 A	8A - 1	5,34	5,28	50% P1	
	8A - 2	5,21			
8 B	8B - 1	5,54	6,00		
	8B - 2	6,45			

Porto Alegre, 18 de fevereiro de 2004.

Eng. Civil Dra. Fernanda M. P. Vieira  
 Coordenadora do Lab. de Mat. de Constr. Civil  
 Gerente Substituta do Departamento de  
 Materiais de Construção Civil - DEMACC

Eng. Civil Sergio Antonio Mazoni  
 Responsável Técnico - CREA/RS nº 2472

**ANEXO 3: RELATÓRIO TÉCNICO DOS RESULTADOS DOS  
ENSAIOS DE DESGASTE POR ABRASÃO (BLOCOS COM EGF  
COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO)**



Documento **RELATÓRIO DE ENSAIO** Número **10126/31024**  
 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 Inteira.

### ENSAIO DE DESGASTE POR ABRASÃO

**Cliente:** UFRGS – CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
 Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar  
 90035.190 – PORTO ALEGRE - RS

**Material ensaiado:** três peças de concreto para pavimentação do tipo UNISTEIN, entregues à CIENTEC pelo Cliente, já identificadas.

**Solicitação do Cliente:** determinação do índice de desgaste por abrasão.

**Data de entrega dos materiais:** 09 de fevereiro de 2004.

**Data da realização do ensaio:** 02 de março de 2004.

**Método:** O ensaio foi realizado segundo o "Método CIENTEC de Desgaste por Abrasão", que simula um percurso de 500 m percorridos pelo corpo-de-prova submetido a uma pressão constante de 0,06 MPa sobre pó abrasivo carborundo. De cada peça entregue foram obtidos, através de corte em serra circular diamantada, dois corpos-de-prova para a realização do ensaio. O resultado é expresso em termos do índice de desgaste, que corresponde à média das diferenças entre as alturas iniciais e finais de cinco pontos do corpo-de-prova.

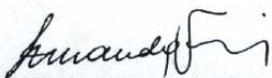
#### Resultados:

Peça	C.P. (nº)	Índice de desgaste (mm)		Identificação do Cliente
		Individual	Média	
9	9A – 1	7,05	5,76	10%
	9A – 2	4,46		
10	10A – 1	6,69	7,74	50% AG
	10A – 2	8,78		
11	11A – 1	7,64	8,58	30% AG
	11A – 2	9,53		

#### Observação:

Data de moldagem declarada: 03/02/2004.

Porto Alegre, 08 de março de 2004.

  
 Eng. Civil Dra. Fernanda M. P. Vieira  
 Coordenadora do Lab. de Mat. de Constr. Civil  
 Gerente Substituta do Departamento de  
 Materiais de Construção Civil - DEMACC

  
 Eng. Civil Sergio Antonio Mazoni  
 Responsável Técnico – CREA/RS nº 2472

1/1