

ESCÓRIAS DE FLUXO DE SOLDAGEM COMO AGREGADO MIÚDO PARA A
PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE MÚLTIPLO USO

CAROLINE ESPINOSA VIANA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

FEVEREIRO DE 2007

ESCÓRIAS DE FLUXO DE SOLDAGEM COMO AGREGADO MIÚDO PARA A
PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE MÚLTIPLO USO

CAROLINE ESPINOSA VIANA

“Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro, como parte das exigências para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil”.

Orientador: Prof. Dylmar Penteado Dias

Co-orientador: Prof. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

FEVEREIRO DE 2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

05/2007

Viana, Caroline Espinosa

Escórias de fluxo de soldagem como agregado miúdo para a produção de argamassas de múltiplo uso. / Caroline Espinosa Viana. – Campos dos Goytacazes, 2007.

xi, 112f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) --Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2007.

Orientador: Dylmar Penteado Dias.

Co-orientador: Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos

Área de concentração: Estruturas

Bibliografia: f. 94-112

1. Areia artificial 2. Escória de fluxo de soldagem 3. Impacto ambiental 4. Reciclagem 5. Resíduo industrial I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil II. Título

CDD 620.135

ESCÓRIAS DE FLUXO DE SOLDAGEM COMO AGREGADO MIÚDO PARA A
PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE MÚLTIPLO USO

CAROLINE ESPINOSA VIANA

“Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil”.

Aprovada em 05 de fevereiro de 2007.

Comissão Examinadora:

Prof. Luiz Antonio Vieira Carneiro (D. Sc.) – IME

Prof. Jean Marie Désir (D. Sc.) – UENF

Prof. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos (D. Sc.) – UENF

Prof. Dylmar Penteado Dias (D. Sc.) – UENF
(orientador)

Aos meus pais Wilson e Regineia.

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer a Deus, que sempre abençoou a mim e a minha família.

À minha família, meus pais, Wilson e Regineia, que me ensinaram o valor do estudo e que dividiram comigo momentos difíceis e felizes sempre me apoiando; minha querida avó Maria e meus irmãos Guilherme e Camila, meus amigos e companheiros que me ajudam a cada dia a superar desafios e dificuldades.

À Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) pelo suporte técnico e financeiro.

Às empresas Machado Vianna Comércio e Indústria Ltda. – Calderaria, Usinagem e Fundição e Aalborg Industries S.A. pelo fornecimento das escórias de fluxo de soldagem.

Ao meu orientador, Prof. Dylmar Dias, pela dedicação, companheirismo, alegria e incansável orientação, meu muito obrigado.

Aos demais professores do LECIV pela contribuição em meu desenvolvimento, em especial, aos Profs. Jean Marie e Paulo Maia pela colaboração na minha formação e na realização desta dissertação.

Ao professor Ronaldo Paranhos pelo apoio e atenção dada como co-orientador.

Aos colegas de mestrado, em especial aos meus amigos Raquel, Joadelio, Aline, Clarice, Adriano, Thiago Padovani, pela força nesta caminhada.

Aos companheiros de laboratório Camila, Marcos, Maikon, Thiago Lima, Gabriel, Antônio, Anderson e Jefferson, pelo incentivo e valiosa ajuda nas diversas fases da dissertação.

A todos meus amigos que, de perto ou de longe, sempre estiveram comigo me

apoiando e alegrando, em especial as sempre presentes Ana Laura e Flávia Manuella.

A Milton, André e Vanuzia (LECIV), Ângelus, Bruno e Stellamaris (LAMAV), Lucia Helena (INT) e Leonardo e Felipe (IME) pelo auxílio na realização de ensaios.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta dissertação e para meu crescimento e aprendizado, o meu sincero agradecimento.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS	viii
LISTA DE SIGLAS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos	6
1.2. Motivação	7
1.3. Estrutura do trabalho	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. Areia como agregado para a construção civil	10
2.1.1 Importância do consumo de agregados	10
2.1.2 Situação atual da areia	13
2.1.3 Conflito na atividade mineral	22
2.2. Reciclagem de resíduos industriais	25
2.3. Escória de fluxo de soldagem	33
2.3.1 Processo de soldagem a arco submerso	33
2.3.2 Classificação do fluxo de soldagem	39
2.3.3 Destinação da EFS	42
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	45
3.1. Materiais	45
3.1.1. Cimento Portland	45
3.1.2. Água	45
3.1.3. Agregado Miúdo	46
3.1.3.1. Areia Natural	47
3.1.3.2. Escória de Fluxo de Soldagem	47
3.2. Metodologia	49
3.2.1. Beneficiamento das EFS	49
3.2.2. Caracterização química das EFS	51
3.2.3. Caracterização física das EFS	51

3.2.4. Caracterização mineralógica das EFS	51
3.2.5. Caracterização ambiental das EFS	52
3.2.6. Caracterização das argamassas de múltiplo uso	52
3.2.6.1. Índice de consistência padrão	52
3.2.6.2. Densidade de massa	53
3.2.6.3. Teor de ar incorporado	54
3.2.6.4. Capacidade de retenção de água	55
3.2.6.5. Densidade de massa aparente	55
3.2.6.6. Evolução da resistência à compressão	56
3.2.6.7. Evolução da resistência à tração por compressão diametral	57
3.2.6.8. Evolução da resistência de aderência	58
3.2.7. Análise da durabilidade das argamassas de múltiplo uso	59
3.2.7.1. Absorção de água por capilaridade	59
3.2.7.2. Absorção de água por imersão	60
3.2.7.3. Lixiviação contínua	61
3.2.7.4. Ciclagem água-estufa	63
3.2.8. Análise microestrutural das argamassas de múltiplo uso	64
3.2.9. Argamassas com os três tipos de EFS	65
4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	66
4.1. Beneficiamento das EFS	66
4.2. Caracterização química das EFS	67
4.3. Caracterização física das EFS	70
4.4. Caracterização mineralógica das EFS	70
4.5. Caracterização ambiental das EFS	72
4.6. Caracterização das argamassas de múltiplo uso	73
4.6.1. Índice de consistência padrão	73
4.6.2. Densidade de massa	76
4.6.3. Teor de ar incorporado	76
4.6.4. Capacidade de retenção de água	77
4.6.5. Densidade de massa aparente	79
4.6.6. Evolução da resistência à compressão	80
4.6.7. Evolução da resistência à tração por compressão diametral	83
4.6.8. Evolução da resistência de aderência	84

4.7.	Análise da durabilidade das argamassas de múltiplo uso	84
4.7.1.	Absorção de água por capilaridade	85
4.7.2.	Absorção de água por imersão	86
4.7.3.	Lixiviação contínua	87
4.7.3.1.	Varição da resistência à compressão	88
4.7.3.3.	Varição da resistência à tração por compressão diametral	89
4.7.4.	Ciclagem água-estufa	91
4.7.4.1.	Varição da resistência à compressão	91
4.7.4.3.	Varição da resistência à tração por compressão diametral	92
4.8.	Análise microestrutural das argamassas de múltiplo uso	93
4.9.	Argamassa com os três tipos de EFS	95
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
5.1.	Conclusões	96
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros	97
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Fotos de satélite e aéreas do impacto ambiental causado pela extração desordenada de areia (Departamento de Recursos Minerais – DRM/RJ, www.drm.rj.gov.br , acesso em 04/06).	19
Figura 2.2	Fotos da situação de assoreamento no leito do rio Paraíba do Sul e de draga operando no rio (Departamento de Recursos Minerais – DRM/RJ, www.drm.rj.gov.br , acesso em 04/06).	20
Figura 2.3	Ilustração do processo de soldagem a arco submerso (Paranhos e Souza, 1999).	35
Figura 2.4	Equipamento básico para a soldagem a arco submerso (Paranhos e Souza, 1999).	36
Figura 2.5	Retirada da EFS durante a soldagem.	36
Figura 2.6	EFS destacada da soldagem.	37
Figura 2.7	Exemplo de recurso para sustentação de fluxo durante SAS (Gimenes Jr. e Ramalho, 2004).	38
Figura 2.8	Fluxo granulado.	40
Figura 3.1	Triturador de mandíbulas.	50
Figura 3.2	Peneirador mecânico.	50
Figura 3.3	Equipamento Shimadzu EDX-700.	51
Figura 3.4	Procedimento de ensaio para a obtenção do índice de consistência padrão: (a) preparação da argamassa; (b) equipamentos utilizados no ensaio; (c) rasamento após o preenchimento do corpo-de-prova; (d) momento da retirada do corpo-de-prova; (e) corpo-de-prova desmoldado; (f) medição do espalhamento na mesa de consistência após aplicação dos movimentos.	53
Figura 3.5	Procedimento do ensaio de densidade de massa e de teor de ar incorporado: (a) equipamentos utilizados no ensaio; (b) compactação com a espátula; (c) compactação com soquete padrão; (d) medição da massa no recipiente.	54

Figura 3.6	Ensaio de capacidade de retenção de água em argamassas: (a) equipamentos utilizados no ensaio; (b) corpo-de-prova sendo preenchido com argamassa; (c) colocação do papel-filtro, gaze e placa metálica; (d) colocação do peso; (e) pesagem do papel-filtro após o ensaio.	55
Figura 3.7	Corpos-de-prova utilizados para a determinação da densidade de massa aparente.	56
Figura 3.8	Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão.	57
Figura 3.9	Posição de rompimento dos corpos-de-prova para a determinação à resistência à tração por compressão diametral (Afonso, 2005).	58
Figura 3.10	Superfície utilizada no ensaio de resistência de aderência.	58
Figura 3.11	Detalhe dos corpos-de-prova sendo submetidos ao ensaio de aderência.	59
Figura 3.12	Ensaio de absorção de água por capilaridade.	60
Figura 3.13	Aparelho de lixiviação contínua.	61
Figura 3.14	Detalhes do aparelho de lixiviação contínua. (a) vista lateral do equipamento com: câmara de degradação, reservatórios e sistema de refrigeração; (b) sistemas de bombas; (c) aspersores dos sistemas de lixiviação no topo da câmara de degradação (Salles, 2006).	62
Figura 3.15	Corpos-de-prova durante o ensaio de ciclagem água-estufa.	64
Figura 3.16	Microscópio Eletrônico de Varredura (JEOL JSM – 5800 LV).	65
Figura 4.1	Distribuição granulométrica das EFS.	66
Figura 4.2	Frações granulométricas da EFS Normal.	67
Figura 4.3	Difratograma da EFS A.	71
Figura 4.4	Difratograma da EFS SB.	71
Figura 4.5	Difratograma da EFS B.	72
Figura 4.6	Relação entre a massa específica do agregado e o teor de água da argamassa.	75
Figura 4.7	Teores de ar incorporado e classificação segundo a NBR 13281 (1995).	77
Figura 4.8	Relação entre densidade de massa e teor de ar incorporado.	78
Figura 4.9	Comparação da capacidade de retenção de água nas argamassas. .	78
Figura 4.10	Evolução da resistência à compressão.	81

Figura 4.11	Comparação entre o teor de água da argamassa e a resistência à compressão aos 28 dias.	82
Figura 4.12	Evolução da resistência à tração por compressão diametral.	83
Figura 4.13	Evolução da resistência de aderência.	85
Figura 4.14	Evolução da absorção de água por capilaridade.	86
Figura 4.15	Evolução da absorção de água por imersão.	87
Figura 4.16	Corpos-de-prova das argamassas dentro do equipamento de lixiviação contínua: (a) após 750 horas (b) após 1500 horas.	88
Figura 4.17	Evolução da resistência à compressão após ciclos de lixiviação contínua.	88
Figura 4.18	Evolução da resistência à tração por compressão diametral após ciclos de lixiviação contínua.	90
Figura 4.19	Condições dos corpos-de-prova de argamassa com EFS B após ciclagem água-estufa.	91
Figura 4.20	Comparação da resistência à compressão das argamassas antes e após ciclagem água-estufa.	92
Figura 4.21	Comparação da resistência à tração por compressão diametral das argamassas antes e após ciclagem água-estufa.	93
Figura 4.22	Micrografias eletrônicas de varredura das argamassas com aumento de 100x (a) argamassa com Areia; (b) argamassa com EFS A; (c) argamassa com EFS SB; (d) argamassa com EFS B.	94
Figura 4.23	Micrografias eletrônicas de varredura da argamassa com EFS B (a) sem ciclagem; (b) com ciclagem.	94
Figura 4.24	Comparação da evolução da resistência à compressão das argamassas.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Características do cimento Portland.	46
Tabela 3.2	Classificação das argamassas segundo a resistência à compressão (NBR 13281, 2001).	57
Tabela 4.1	Caracterização química das EFS.	68
Tabela 4.2	Resultados do ensaio de lixiviação.	73
Tabela 4.3	Resultados do ensaio de solubilização.	74
Tabela 4.4	Resultados obtidos na mesa de consistência.	74
Tabela 4.5	Comparação entre as massas específicas dos agregados e das argamassas.	76
Tabela 4.6	Comparação entre as densidades de massa das argamassas nos estados fresco e endurecido.	80

LISTA DE ABREVIATURAS

a/c:	Relação água/cimento
<i>apud</i> :	Citado por
CPII E-32:	Cimento Portland com escória de alto-forno
DRX:	Difração de raios X
EDX:	Espectometria por fluorescência de raios X
EFS A:	Escória de Fluxo de Soldagem Ácida
EFS B:	Escória de Fluxo de Soldagem Básica
EFS M:	Mistura das três EFS
EFS SB:	Escória de Fluxo de Soldagem Semi-Básica
EFS:	Escória de Fluxo de Soldagem
<i>et al.</i> :	E outros autores
EVA:	Etileno-acetado de vinila
h:	Horas
hab:	Habitante
IB:	Índice de Basicidade
MEV:	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR:	Norma Brasileira
PVC:	Polyvinyl Chloride (Policloreto de Vinila)
RCD:	Resíduo de Construção e Demolição
RCG:	Resíduo de Corte de Granito
RCM:	Resíduo de Corte de Mármore

LISTA DE SIGLAS

ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI:	American National Standard Institute
AWS:	American Welding Society
CETEM:	Centro de Tecnologia Mineral
DNPM:	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRM-RJ:	Departamento de Mineral do Estado do Rio de Janeiro
FEEMA:	Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente
IBAMA:	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais
IME:	Instituto Militar de Engenharia
INT:	Instituto Nacional de Tecnologia
IPT:	Instituto de Pesquisa Tecnológica
LAMAV:	Laboratório de Materiais Avançados da UENF
LECIV:	Laboratório de Engenharia Civil da UENF
UENF:	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

RESUMO

Essa dissertação teve como objetivo estudar a viabilidade da utilização dos três tipos (Ácida, Semi-Básica e Básica) de EFS na produção de argamassas de múltiplo uso, substituindo totalmente o agregado miúdo (areia). A reciclagem da EFS na construção civil visa à diminuição do impacto ambiental causado pela extração indiscriminada da areia, sendo também uma alternativa econômica e ecologicamente viável para regiões com déficit de areia natural; objetiva também a diminuição da disposição sem controle da EFS em aterros sanitários.

De tal modo, o trabalho de reciclagem das EFS consistiu em sua adequação às dimensões de um agregado miúdo (areia), seguida da caracterização física, química, mineralógica e ambiental do resíduo; e caracterização das diferentes propriedades físicas e mecânicas das argamassas de múltiplo uso produzidas com este; e estudo do comportamento destas argamassas perante condições adversas a fim de avaliar sua durabilidade.

Os resultados obtidos no programa experimental mostraram que os três tipos de EFS alcançaram resultados bastante significativos e podem substituir o agregado miúdo na produção de argamassas de múltiplo uso, aquelas empregadas no assentamento de alvenaria de vedação e de revestimento de paredes e tetos, e ainda para revestimento de pisos e contra-pisos.

Palavras-chave: *areia artificial, escória de fluxo de soldagem, impacto ambiental, reciclagem, resíduo industrial.*

ABSTRACT

Welding flux slag arising from the submerged arc welding (SAW), that is an automatic process in which the heat for welding is supplied by an arch that is completely covered by a flux that will protect it of the atmospheric contamination. The granulated flux is founded partially, forming a layer of liquid slag that later solidifies, this material is called welding flux slag (WFS). This slag can be classified according to their neutrality as acid, semi-basic and basic.

The main objective of this work was to evaluate the recycling of the welding flux slags (WFS) in the civil construction, through the study of the viability of their use in the production of multiple-use mortars, substituting the natural sand totally, aiming to decrease the environmental impact caused by the natural sand exploration and the reduction of the contamination risks of the soil and groundwater due to inadequate WFS disposition.

This work studied the physical and mineralogical characteristics of each type of WFS and the mortars containing WFS, besides the reference mortar with natural sand. Analyses in the scanning electron microscope were made in order to evaluate the paste-aggregate interface. The experimental results showed that WFS are capable to replace the natural sand in the production of multiple-use mortars.

Key-words: *environmental impact, industrial residue, recycling, sand, welding flux slag.*

1. INTRODUÇÃO

O crescimento sócio-econômico implica em maior consumo de bens minerais, tornando importante garantir a disponibilidade dos recursos demandados pela sociedade. Existe uma relação direta entre desenvolvimento econômico, qualidade de vida e consumo de bens minerais, pois o consumo de materiais naturais aumenta com o crescimento da economia e da população.

Os bens minerais têm importância significativa para a sociedade, a tal ponto que as fases de evolução da humanidade são divididas em função dos tipos de minerais utilizados: Idades da pedra, do bronze, do ferro *etc.* Nenhuma civilização pode prescindir do uso dos bens minerais, principalmente quando se pensa em qualidade de vida, uma vez que as necessidades básicas do ser humano – alimentação, moradia e vestuário –, são atendidas essencialmente por estes recursos.

Uma pessoa consome direta ou indiretamente cerca de 10 toneladas/ano de produtos do reino mineral, abrangendo 350 espécies minerais distintas. Portanto, a atividade mineral disponibiliza para a sociedade recursos essenciais ao seu desenvolvimento, sendo a intensidade de aproveitamento destes recursos um indicador social (<http://www.pr.gov.br/mineropar/rocha.html>).

Tomando como exemplo o consumo *per capita* de agregados (areia e brita) para a construção civil, este reflete a real intensidade estrutural de uma sociedade, pois está associado diretamente às vias de escoamento de produção, como viadutos e pontes, saneamento básico, hospitais, escolas, moradias, edifícios, energia elétrica e toda sorte de elementos intrínsecos ao desenvolvimento econômico e social de um país (DNPM, 2006).

Conclui-se, então, que as atividades relacionadas à construção civil possuem enormes impactos ambientais. Segundo John (2000a), o setor é o maior consumidor individual de recursos naturais (entre 15% e 50%), gerando poluição. No Brasil, o consumo de agregados naturais (areia e brita) atualmente, somente para a produção de concretos e argamassas, é de cerca de 220 milhões de toneladas/ano.

John (1996) concluiu que o mercado da construção civil se apresenta como uma das mais eficazes alternativas para consumir materiais reciclados, pois a atividade da construção é realizada em qualquer região, com a ampliação cada vez maior do ambiente construído, o que permite reduzir os custos com transporte. Além disso, grande parte dos componentes necessários à produção de edificações pode ser produzida sem grande sofisticação técnica.

Sendo as argamassas um dos materiais mais consumidos pelo homem, e considerando que grande parte das mesmas é constituída por areia, é de grande relevância a preocupação com a extração desta matéria-prima não-renovável. Atualmente, as mineradoras são forçadas a extrair areia em locais cada vez mais distantes do mercado consumidor, aumentando o preço final do produto.

Por definição, de acordo com a NBR 7200 (1998), as argamassas são uma mistura de aglomerantes, agregados e água, possuindo capacidade de endurecimento e aderência. Segundo Fiorito (1994), as argamassas utilizadas em obras são comumente compostas de areia natural lavada, e os aglomerantes são, em geral, o cimento Portland e a cal hidratada.

Roman (1991) ressalta que, ao longo do tempo, as argamassas têm sido consideradas erroneamente como se fossem concretos. Mesmo que na essência ambos sejam compostos dos elementos aglomerantes e agregados, suas funções e empregos são radicalmente distintos. Ao contrário do concreto, a argamassa é colocada sobre superfícies absorventes e a maior parte de sua superfície está exposta aos efeitos da evaporação. Outra diferença entre o concreto e a argamassa é que esta não deve ser curada. Estes aspectos indicam que a resistência à compressão, que é vital para o concreto, é secundária para a argamassa.

Um dos tipos de argamassas mais empregadas são as argamassas de múltiplo uso, termo utilizado para designar aquelas que podem ser utilizadas em assentamento de alvenaria de vedação, revestimento de paredes e tetos, e ainda para revestimento de pisos e contrapisos; têm seus constituintes e sua composição determinados pela

finalidade de emprego do produto, de modo a conferir propriedades necessárias ao bom desempenho (Selmo *et al.*, 2002).

A importância do revestimento em argamassas vai muito além da simples melhoria do aspecto visual, pois do seu desempenho depende o bom funcionamento e durabilidade do sistema global da construção. A vedação e isolamento são exemplos de atribuições dos revestimentos (Afonso, 2005).

Selmo *et al.* (2002) relatam que se disseminou no Brasil, nos anos 90, o uso de argamassas industrializadas de múltiplo uso nos serviços de alvenarias e revestimentos de grandes edifícios, tanto pelos investimentos da indústria cimentícia para ofertar esses produtos, quanto pela evolução das metas de racionalização da construção civil.

Esses autores explicam também que as argamassas industrializadas de múltiplo uso tiveram uma especificação brasileira à parte, tanto para as aplicações em assentamento de alvenarias e como em revestimentos de paredes e tetos, através da NBR 13181 (2001). Esta norma estabelece classificações para as argamassas segundo suas propriedades de capacidade de retenção de água; teor de ar incorporado e resistência à compressão, mas foram omitidas as indicações para a aplicação de cada grupo.

O desenvolvimento tecnológico, associado ao crescimento do setor industrial, normalmente, traz grandes benefícios para toda a sociedade, mas, sem o devido controle, pode acarretar efeitos colaterais, agredindo o meio ambiente, causando, muitas vezes, desastrosos e irreparáveis danos à sociedade, devido à geração de resíduos que necessitam de elevados custos para sua correção (Pimentel, 2005).

Carneiro *et al.* (2003) afirmam que a minimização dos impactos ambientais, causados por todo tipo de situação descontrolada e desequilibrada, torna-se cada vez mais importante, devido à limitação dos recursos naturais disponíveis, a fim de se preservar o meio ambiente para um futuro melhor da humanidade.

Miranda e Selmo (2001) afirmam que a reciclagem de resíduos é hoje pesquisada para as mais diversas aplicações, entre as quais, se destaca o uso em argamassas de revestimento de paredes e tetos de edifícios. Este material é consumido em larga escala pela construção civil, mas a carência de parâmetros que controlem a produção e a aplicação dessas argamassas tem causado o surgimento de várias patologias em revestimentos, por isso existe a necessidade de se estudar bem as características das argamassas, especialmente as que contêm resíduos reciclados.

Assim sendo, a reciclagem de resíduos, próprios ou gerados pelos demais setores industriais, é uma das alternativas para a diminuição do impacto ambiental causado pela construção civil, bem como a redução dos custos das matérias-primas empregadas (Zordan e Paulon, 1997).

Segundo Souza e Ripper (1998), escórias siderúrgicas podem ser empregadas como agregados miúdos na fabricação de concretos e argamassas, assim como agregados oriundos de jazidas naturais (areias e cascalhos) e outros produtos, cujo emprego tenha sido aprovado pela prática ou, preferencialmente, que sua adequabilidade tenha sido demonstrada em laboratório.

Para Tartuce e Giovannetti (1990), os agregados desempenham um importante papel nas argamassas e concretos, quer do ponto de vista econômico, quer do ponto de vista técnico, exercendo influência benéfica em algumas características importantes como retração e aumento da resistência aos esforços mecânicos, já que os agregados de boa qualidade possuem resistência mecânica maior do que a pasta de aglomerante.

Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade da utilização de escória de fluxo de soldagem (EFS) na produção de argamassas de múltiplo uso, como substituto total da areia, visando à diminuição do impacto ambiental, contribuindo para a redução do risco de contaminação do solo e do lençol freático pela disposição inadequada da EFS, visto que no Brasil são geradas aproximadamente 500 toneladas/mês de EFS ainda sem destinação específica.

Estudos desenvolvidos pela *Organization for Economic Cooperation and Development* (OECD) e *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et Matériaux* (RILEM) estabeleceram uma proposta de critério geral de avaliação do resíduo para uso na construção civil (Cincotto, 1988), a saber:

- a) a quantidade de resíduo disponível deve ser suficientemente grande para justificar o desenvolvimento de sistemas de manuseio, processamento e transporte;
- b) as distâncias de transporte envolvidas devem ser compatíveis com as dos materiais convencionais;
- c) o material não deve ser potencialmente nocivo durante a construção ou posteriormente à sua incorporação ao produto final.

Segundo a Comissão Mundial das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, a estabilidade ecológica-econômica envolve o conceito de desenvolvimento sustentável, ou seja, aquele que “satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de satisfazer suas próprias necessidades”.

Considerando a noção de desenvolvimento sustentável, torna-se evidente a necessidade de preocupação com a preservação da natureza. Os processos de produção devem economizar energia e não gerar subprodutos perigosos que possam por em risco a natureza e o ser humano (Pentalla, 1997).

Muitas empresas vêm investindo cada vez mais em equipamentos e formação de quadros técnicos para eliminar a cultura do desperdício e consolidar a cultura da redução de perdas, reciclagem e reutilização dos resíduos. Não só porque os resíduos provocam impactos ambientais negativos, como também a sua redução e aproveitamento podem minimizar o consumo de recursos naturais e energéticos, o que implica, muitas vezes, num menor dispêndio econômico (Moura, 2000).

Segundo Gonçalves (2000), a *Civil Engineering Reseach Foundation* (CERF), entidade dedicada a promover a modernização da construção civil dos Estados Unidos, realizou uma pesquisa entre 1500 construtores, projetistas e pesquisadores

de todo o mundo, enfocando as tendências para o futuro do setor e a “questão ambiental” foi considerada a segunda mais importante tendência para o futuro. Um outro aspecto é que todas as satisfações, que estão relacionadas ao desenvolvimento sustentável, envolvem uma relação entre os processos, desde o nível macro ao micro, além todos os indivíduos integrantes de cada processo produtivo.

O desenvolvimento desta dissertação para substituição da areia natural por EFS acompanha os conceitos propostos por Silva *et al.* (2001), que fundamentam o interesse na reciclagem com base em quatro aspectos:

- de **ordem econômica**, através da redução dos custos para a produção de materiais e componentes para a construção civil, agregação de valor ao resíduo e diminuição dos gastos com a construção de aterros;
- de **ordem técnica**, a partir da melhoria dos requisitos de desempenho;
- de **proteção ao meio ambiente**, propiciando uma redução na poluição e uma diminuição na extração de matérias-primas;
- de **ordem sócio-econômica**, reduzindo os custos na construção civil, gerando novos empregos e melhorando sócio-economicamente a população envolvida no processo de reciclagem.

1.1. Objetivos

Estudar a viabilidade técnica do uso da EFS como agregado miúdo na produção de argamassas de múltiplo uso, visando a redução do impacto ambiental causado pela extração de agregado miúdo natural (areia) e pela deposição sem controle deste resíduo em aterros sanitários.

Realizar a caracterização química, mineralógica, ambiental, física e quanto à reatividade da escória de fluxo de soldagem e à caracterização de propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade das argamassas de múltiplo uso produzidas com este resíduo.

1.2. Motivação

A sociedade moderna tem aumentado o consumo de produtos à base de aço, impulsionando o crescimento dos setores siderúrgico e metal-mecânico nacionais e, conseqüentemente, a geração de resíduos originados destes setores. A expectativa é que estes setores aumentem cada vez mais a produção e a geração de resíduos. Neste contexto, a reciclagem de resíduos pode contribuir para amenizar problemas das indústrias que primam pela excelência da produção com qualidade.

Pode-se citar como exemplos bem sucedidos de reciclagem de resíduos, a utilização da escória de alto-forno como matéria-prima para fabricação do cimento, como adição na execução de concreto, como agregado para fabricação de concreto, pré-moldados e pavimentação, e como agregado leve na fabricação de concreto e lã de escória para isolamentos térmicos (Kruger, 1995).

Existe grande interesse das indústrias do setor metal-mecânico em encontrar uma aplicação tecnológica para a EFS, pois este resíduo eleva os custos das empresas com transporte e deposição do mesmo em aterros sanitários. Sendo confirmado o bom desempenho deste resíduo como agregado miúdo para a produção de argamassas de múltiplo uso, este poderá ser classificado como co-produto e não mais como resíduo, podendo ser comercializado e, conseqüentemente, fornecendo lucro às empresas que geram este tipo de material, tais como Confab Industrial S/A, Borlem S/A Empreendimentos Industriais e Usiminas Mecânica S/A, entre outras, do mesmo modo que a escória de alto-forno, que é utilizada atualmente na composição de cimentos compostos do tipo II (entre 5% e 35% de escória de alto-forno) e do tipo III (entre 36 e 70% de escória de alto-forno).

A substituição da areia natural por EFS pode também vir a reduzir os custos de produção das argamassas de múltiplo uso, as quais podem ser aplicadas na construção de habitações de interesse social e, conseqüentemente, contribuindo para a redução do *déficit* habitacional do país.

Assim, a substituição da areia por um resíduo na produção de argamassas possui inúmeras vantagens, tais como:

- Redução do impacto ambiental causado pela extração da areia natural (mineração) e, conseqüentemente, da quantidade extraída da mesma;
- Redução de custos despendidos com a EFS, como os de licença ambiental, deposição da mesma em aterros sanitários e multas ambientais;
- Redução dos custos com as matérias-primas a serem utilizadas na produção de argamassas e, conseqüentemente, do produto final.

Logo, a preocupação ambiental, o interesse econômico da indústria produtora de EFS, a necessidade de substituição da areia natural, já que esta é um bem finito, se tornam motivações para a realização deste estudo.

1.3. Estrutura do trabalho

Esta dissertação de mestrado está organizada em seis capítulos, visando apresentar o assunto, a metodologia, os resultados obtidos no programa experimental e conclusões a respeito do uso da EFS como agregado miúdo. No Capítulo 1 é realizada uma introdução do trabalho, onde se relata a importância da pesquisa, seus objetivos, sua motivação e a estrutura da dissertação.

Os capítulos seguintes estão estabelecidos da seguinte maneira:

- Capítulo 2: apresenta uma revisão sobre a atual situação da extração e comercialização da areia natural e as perspectivas para o futuro deste bem mineral, além de uma revisão sobre a reciclagem de resíduos industriais na construção civil. Ao final deste capítulo são indicadas as principais características do resíduo utilizado nesta dissertação, a EFS.
- Capítulo 3: detalha o programa experimental, com a descrição dos materiais utilizados e metodologia aplicada, desde o beneficiamento da EFS para ser

aplicada como agregado miúdo, caracterização das matérias-primas até os procedimentos dos ensaios realizados.

- Capítulo 4: trata da apresentação e discussão dos resultados obtidos no programa experimental.
- Capítulo 5: aborda as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.
- Capítulo 6: referencia a bibliografia utilizada nesta dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Areia como agregado para a Construção Civil

2.1.1 Importância do consumo de agregados

O termo “agregados para a construção civil” é empregado no Brasil para identificar um segmento do setor mineral que produz matéria-prima mineral, bruta ou beneficiada, de emprego imediato na indústria da construção civil. São basicamente a areia e a rocha britada. O termo “emprego imediato na construção civil” (que consta da legislação mineral para definir uma classe de substâncias minerais) não é muito exato, já que nem sempre são usadas dessa forma. Muitas vezes entram em misturas (tais como o concreto e a argamassa) antes de serem empregadas na construção civil (Campos e Fernandes, 2005).

Ferreira e Silva (2004) mencionam que segundo a *Geological Survey* dos Estados Unidos, os agregados são os recursos minerais mais acessíveis à humanidade e as matérias-primas mais importantes usadas na indústria da construção civil, sendo o concreto, depois da água, o segundo material mais consumido em volume pela humanidade. Os autores dizem ainda que os agregados para a indústria da construção civil são os insumos minerais mais significativos em termos de quantidade produzida no mundo.

Os capítulos relacionados à areia, cascalho e pedra britada do Anuário Mineral dos Estados Unidos, referem-se aos recursos minerais afirmando que, embora sejam produtos de baixo valor unitário, os agregados para a construção civil constituem-se em um importante indicador da situação econômica e social de uma nação (Valverde, 2001).

A importância do setor de agregados para a sociedade destaca-se por estar diretamente ligada à qualidade de vida da população. Segundo o IPT (2003), o desenvolvimento urbano está diretamente relacionado ao crescimento da produção de agregados e ao consumo de agregados, medido em m³/habitante/ano (consumo *per capita*), e pode ser considerado como indicador de qualidade de vida urbana, ao mostrar a evolução e o atendimento das necessidades da população no tocante à

construção de moradias; saúde e saneamento básico; abastecimento de água; energia elétrica; pavimentação; construções escolares e hospitalares; transporte (pavimentação e construção de rodovias, vias públicas, ferrovias, hidrovias, portos, aeroportos, pontes, viadutos, pátios e estações) enfim, toda uma gama de atividades abrangidas pela construção pesada e edificações.

Ainda segundo a *Geological Survey apud* Valverde (2001), o consumo anual de bens minerais por habitante nos EUA foi, em 2000, da ordem de 10.000 kg. O nível de consumo observado nos EUA se repete nos países industrializados, comprovando se tratar de um importante indicador da situação econômica e social de um país. Na Europa Ocidental, o consumo de agregados por habitante varia de 5.000 kg a 8.000 kg. No Canadá, especificamente na Província de Ontário, na década de 80, o consumo chegou a 15.000 kg por habitante, devido a uma explosão econômica por qual a região passou.

Os EUA são os maiores produtores de brita do mundo e, em 1999, sua produção oscilava em torno de 1 bilhão de metros cúbicos, apresentando valor da ordem de US\$ 8,8 bilhões. Esta produção era sustentada por 1.450 empresas que operavam 3.400 unidades de produção, distribuídas por 48 estados americanos (Kulaif, 2001). Já a produção de areia gira também em torno de 1,1 bilhões de metros cúbicos, com cerca de 4.000 empresas distribuídas por 50 estados da federação.

Na Europa, o principal produtor de agregados para a construção civil é a França, que produziu, em 1998, cerca de 250 milhões de metros cúbicos, sendo concentrada em 3.000 empresas de pequeno e médio porte (Kulaif, 2001). Neste país, 35% da quantidade produzida de agregados foi destinada à construção de prédios, sendo a metade para moradias; 45% para a construção de novas vias públicas e manutenção das existentes; o restante, 20%, foi utilizado em outros tipos de construções (Ferreira e Silva, 2004).

Os dados apresentados refletem a grande disparidade sócio-econômica existente entre países desenvolvidos, como os EUA e a União Européia e países em desenvolvimento como o Brasil, onde o consumo está pouco acima de 2.000 kg por habitante/ano.

Os reflexos do baixo consumo no país de uma matéria-prima tão barata como a areia são facilmente observáveis segundo Valverde (2001): há um enorme déficit habitacional; uma malha rodoviária que não suporta a demanda crescente e, em consequência, os custos de transporte são astronômicos; doenças típicas de falta de saneamento básico estão por toda parte *etc.*. Enfim, faltam condições mínimas para uma vida digna para a maioria da população. Evidentemente, o baixo consumo desses materiais básicos é consequência da falta de capacidade de investimento e da condição de um país com baixa renda *per capita*.

Observa-se que no Brasil ocorrem diferenças significativas no consumo de agregados entre as regiões mais ricas e pobres, outra prova da relação consumo de agregados *versus* desenvolvimento. O consumo no Estado de São Paulo, o mais desenvolvido do Brasil, chega a 4,5 t/hab/ano, enquanto em regiões metropolitanas menos desenvolvidas como Fortaleza e Salvador não atingem 2 t/hab/ano, o que demonstra que o consumo de agregados tem clara relação com a renda *per capita* e com a capacidade de poupar e investir (Valverde, 2001).

A contínua ampliação e adensamento dos cortiços, favelas e loteamentos precários e irregulares no centro e na periferia das regiões metropolitanas brasileiras é outro reflexo do baixo consumo de agregados e da falta de uma política habitacional eficaz. No Brasil, cerca de 87% das favelas se concentram em 11 regiões metropolitanas (São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Recife, Salvador, Fortaleza, Brasília, Belém, Porto Alegre, Manaus e Curitiba), nas quais habitam 32% da população. O Ministério das Cidades calcula que investimentos de US\$ 7 bilhões ao ano durante duas décadas seriam necessários para anular o *déficit* de 6,5 milhões de moradias no país (Valverde, 2001).

Segundo Babo e Couto (2006), o Brasil tem sua perspectiva de crescimento limitada por problemas indignos de sua grandeza política e dimensão territorial, que resvalam, principalmente, na inépcia do Poder Público em prover infra-estrutura adequada para o pleno exercício do desenvolvimento. Os autores afirmam que o mais saliente indicador desta falência estrutural encontra-se exatamente no consumo *per capita* de agregados para a construção civil, uma vez que todo o

arcabouço de elementos construtivos utiliza tais matérias-primas em sua concepção. O Brasil necessita consumir agregados para a construção, não sobre a perspectiva singular do crescimento econômico, mas, sobretudo, do provimento de qualidade de vida à população.

2.1.2 Situação atual da areia

Segundo Campos e Fernandes (2005), a mineração é sem dúvida um fator determinante no desenvolvimento do país, não somente como gerador de riquezas, mas também como mecanismo de progresso e desenvolvimento de diversas regiões brasileiras. A história da mineração em nosso país se confunde com a própria história do Brasil, haja vista que o mesmo foi desbravado pela constante busca de ouro e pedras preciosas.

A mineração desempenha um papel social e econômico muito importante no país. Sob o aspecto da economia, a atividade de extração é responsável por 3% do PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro. Desde a segunda metade da década de 60, quando o país enfrentou um crescente consumo de areia e brita na construção civil, fruto da industrialização e conseqüente urbanização do país, até o presente, a produção vem atendendo satisfatoriamente a demanda nacional.

Campos e Fernandes (2005) relatam ainda que a disponibilidade desses recursos, especialmente aqueles localizados dentro ou no entorno dos grandes aglomerados urbanos, vem declinando dia após dia, em virtude de inadequado planejamento, de problemas ambientais, de zoneamentos restritivos e de usos competitivos do solo. A possibilidade de exploração está sendo cada vez mais limitada, tornando aleatórias as perspectivas de garantia de suprimento futuro.

Analisando a produção específica de agregados, esta vinha aumentando gradativamente até 1997, quando se abateu na construção civil uma crise pela falta de investimentos do poder público em obras de infra-estrutura, habitações e serviços públicos em geral, que se estende até hoje. Entretanto, atualmente, vê-se um aquecimento neste setor, principalmente nas grandes metrópoles. Destaca-se a

Região Metropolitana de São Paulo como o maior mercado consumidor de agregados do país.

De acordo com o Sumário Mineral Brasileiro (2005), agregados para construção civil são as denominações de rochas britadas, rochas aplicadas *in natura* e areias, além de substitutivos como resíduos inertes reciclados, escórias, produtos industriais e outros. Os recursos em agregados são, em geral, abundantes no Brasil, porém há algumas regiões com escassez significativa em virtude da grande procura e produção insuficiente, como São Paulo, ou limitações ecológicas como a proibição da mineração pela cota 100 m acima do nível do mar, para a preservação da Mata Atlântica e outras florestas.

O Sumário Mineral Brasileiro (2005) ressalta também que, em 2004, 70% da produção de agregados do Brasil foi destinada à mistura com cimento e 30% com asfalto betuminoso, tendo sido verificado que 50% da areia produzida no país foi aplicada à produção de concreto e pré-fabricados e os 50% restantes para argamassas em geral.

O Estado de São Paulo respondeu por 40% da produção nacional em 2004. Outros grandes estados produtores são: Minas Gerais (13%), Rio de Janeiro (11,8%), Paraná (6,6%), Rio Grande do Sul (5,9%) e Santa Catarina (3,4%).

Em 2004 foram produzidas no Brasil 315,7 milhões de toneladas de agregados, 128,7 milhões de toneladas representados por pedras britadas e 187,0 milhões de toneladas por areia. Cerca de 2.500 unidades extratoras dedicam-se, na grande maioria pequenas empresas familiares, à produção de areia, gerando cerca de 50 mil empregos diretos e 150 mil indiretos.

Cabe ressaltar que não há estatísticas confiáveis sobre agregados no Brasil. O Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) carece destas estatísticas devido à falta de uma estrutura de coleta e análises de dados apurados sobre o setor, que possibilite prestar informações objetivas e confiáveis aos organismos envolvidos na política de planejamento urbano.

A produtividade das extrações de areia no Brasil é baixa, porque as empresas de mineração são, na sua maioria, de pequeno e médio porte, administradas por empresários com conhecimentos práticos e conservadores e com poucas noções sobre meio ambiente (Okagawa *apud* Agostini, 2001 *apud* Reis *et al.*, 2003).

A produtividade francesa supera em muita a do Brasil, devido a fatores tais como: grau de especialização e escolaridade da mão-de-obra; nível de mecanização das frentes de extração e beneficiamento e; melhor organização e controle de produção. A produtividade francesa com referência a homem/tonelada/dia é de 91 t/dia, enquanto que no Brasil é de 32 t/dia (Rabelo, 1997).

As atividades de extração mineral são de grande importância para o desenvolvimento social, mas também são responsáveis por impactos ambientais negativos, muitas vezes irreversíveis (Brandt, 1998 *apud* Lelles *et al.*, 2005). Estes se tornam mais visíveis com a dinamização do processo de industrialização e o crescimento das cidades, que aceleram os conflitos entre a necessidade de buscar matérias-primas e a conservação do meio ambiente (Popp, 1992 *apud* Lelles *et al.*, 2005).

Os principais locais de produção de areia são várzeas e leitos de rios, depósitos lacustres, mantos de decomposição de rochas, arenitos e pegmatitos decompostos. No Brasil, 70% da areia é extraída em leitos de rios e 30% em várzeas.

A extração de areia obtida nos leitos de rios causa impactos sobre o meio ambiente em consequência da retirada da cobertura vegetal e degradação do curso d'água. Além disso, causam problemas sanitários à população local, pois as cavas provenientes da retirada de areia natural tornam-se gigantescas "poças" de água parada, criando um ambiente ideal para proliferação de mosquitos que transmitem doenças (Almeida e Sampaio, 2002).

Por isso, a exploração de areia natural tem sido uma prática cada vez mais coibida pelos órgãos ambientais responsáveis pela fiscalização do Meio Ambiente como IBAMA, Feema, Secretarias Municipais e/ou Estaduais e Organizações Não-Governamentais.

Ao redor das grandes cidades os agregados naturais começam a se tornar escassos e as novas áreas de extração estão cada vez mais distantes dos locais de consumo, encarecendo o preço final dos produtos como ocorre na região metropolitana de São Paulo, maior mercado consumidor de agregados do país. Com um consumo em 2004 da ordem de 25,7 milhões de toneladas de brita e 37,2 milhões de toneladas de areia, “importa” grande quantidade da areia consumida, sendo boa parte de locais que ficam a mais de 100 km de distância (Sumário Mineral Brasileiro, 2005).

A distância considerada economicamente viável, segundo a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para a Construção Civil (ANEPAC) é de no máximo 50 km. Logo, a região de São Paulo é a que atualmente mais vem sofrendo com o encarecimento da areia natural. Por se tratar de um agregado que tem seu preço por volume baixo, conseqüentemente o preço final é bastante influenciado pelo frete, visto que a produção vem sendo feita cada vez mais distante dos mercados consumidores, elevando assim seu custo para valores em torno de R\$ 45,00/m³ em fevereiro/2006 de acordo com o SINDIPEDRAS – Sindicato da Indústria de Mineração de Pedra Britada do Estado de São Paulo. Isto representa um aumento de aproximadamente 300% em relação ao preço comercial da areia natural de um mercado consumidor com jazidas próximas.

Areia e pedra britada caracterizam-se por grandes volumes produzidos relativamente ao consumo de outros insumos para as aplicações a que se destinam. No concreto, por exemplo, os agregados respondem por 80% do volume total. O transporte responde por cerca de 2/3 e 1/3 do preço final da areia e da brita, respectivamente, o que impõe a necessidade de produzi-los o mais próximo possível do mercado, que são os aglomerados urbanos (Sumário Mineral Brasileiro, 2005).

Atualmente não há matéria-prima ou produto que substitua a areia para os fins de construção civil, pois não existe um concorrente em preço para ela. Seu preço enquanto matéria natural é zero; gasta-se apenas com extração, beneficiamento e transporte. O fato de ser barata faz com que seja utilizada em grande escala. Por isto, alguns ecologistas defendem a cobrança de uma taxa sobre a utilização da

areia para estimular o investimento em pesquisa de materiais que a substituam, além de estimular o combate ao desperdício e a redução do consumo (Kuck, 2003).

De acordo com o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), a demanda por agregados no Brasil é caracterizada pela existência de dezenas de micro-mercados, em geral, independentes e limitados por um raio de até 150 km. Estes são formados pelas regiões metropolitanas e mercados regionais como a Baixada Santista, Região de Campos de Goytacazes, Blumenau, Maringá-Londrina, Foz do Iguaçu, Ribeirão Preto-Franca, Campinas, Sorocaba, Triângulo Mineiro, Campo Grande, Cuiabá, Montes Claros (MG) e outros.

Os problemas ambientais, originados pela mineração de materiais de uso imediato na construção civil (areia, brita e argila), e os conflitos com outras formas de uso e ocupação do solo vêm conduzindo a uma diminuição crescente de jazidas disponíveis para o atendimento da demanda das principais regiões metropolitanas (Machado, 1995).

Destacam-se, também de acordo com DNPM, como os principais pólos de produção de areia as regiões do Vale do Rio Paraíba do Sul, no Estado de São Paulo, que responde por cerca de 25% da produção paulista e 10% de toda a produção nacional. Outras grandes regiões produtoras são: Sorocaba, Piracicaba e Vale do Rio Ribeira de Iguape, também no Estado de São Paulo; Seropédica, Itaguaí, Barra de São João e Silva Jardim no Estado do Rio de Janeiro; os rios Guaíba, Caí e Jacuí, no Estado do Rio Grande do Sul; Vale do Rio Itajaí, em Santa Catarina; Várzea do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba; Vale do Rio Tibagi no município de Ponta Grossa (PR) e o Rio Paraná na Região de Guairá (PR).

Todos esses pólos citados estão passando por sério problema ambiental, causado pela exploração predatória e desordenada desse bem mineral, ocasionando graves conflitos com o meio ambiente e, desta forma, gerando pressões da sociedade para seu término de operação. A degradação ambiental já provocou diversas denúncias por parte de ambientalistas e moradores junto aos órgãos de fiscalização. As prefeituras, governos estaduais, órgãos ambientais públicos e privados estão cada vez mais empenhados em diminuir a degradação ambiental causada pela

mineração, sendo mais rigorosos no cumprimento das legislações ambientais e mais severos na aplicação de multas.

Segundo Griffith (1980) *apud* Silva (1988), a atividade mineradora é uma das maiores modificadoras da superfície terrestre, afetando o local de mineração e seu entorno, provocando impactos sobre a água, o ar, o solo, o subsolo e a paisagem como um todo, os quais são sentidos por toda população. Bauermeister e Macedo (1984) *apud* Silva (1988) consideram a atividade extrativista de areia uma grande causadora de problemas ambientais e onde se concentram as mais graves transformações da paisagem.

Farias (2002) enumera os principais impactos ambientais em mineração de agregados para construção civil: destruição da mata ciliar; turbidez na água; contaminação do lençol freático; uso futuro da terra comprometido devido à ocorrência desordenada de áreas alagadas; conflitos com uso e ocupação do solo; acidentes nas rodovias causados pelo transporte.

O consumo de agregados naturais gera impactos ambientais relevantes como geração de áreas degradadas no entorno urbano e transporte intensivo de veículos transportadores de minerais. Estima-se que a distribuição de areia natural na Região Metropolitana de São Paulo seja responsável por 1,35 milhões de viagens/ano (Whitaker, 2001).

Além disso, a atividade mineradora promove, em grande escala, o surgimento de áreas degradadas que não se integram à paisagem e, em geral, são incompatíveis com o desenvolvimento regional (Farias, 2002).

No Estado do Rio de Janeiro, segundo maior centro consumidor de agregados do Brasil, a indústria mineral aparece com destaque. Mas esse desenvolvimento, que é muito necessário e importante para o Estado, tem causado problemas ambientais em áreas produtoras como Seropédica, Cabo Frio e Campos dos Goytacazes.

A mineração de areia no município de Seropédica-RJ, por exemplo, causou grandes estragos à ecologia da região, sendo possível observar enormes crateras nos locais

onde a extração foi praticada. Através de fotos de satélites (Figura 2.1), é possível observar claramente as crateras deixadas nos locais onde os veios de areia foram esgotados. O lençol freático formou lagos saturados de sedimentos minerais, que deixam a água de cor verde-esmeralda, incapaz de sustentar qualquer forma de vida.



Figura 2.1 – Fotos de satélite e aéreas do impacto ambiental causado pela extração desordenada de areia (Departamento de Recursos Minerais – DRM/RJ, www.drm.rj.gov.br, acesso em 04/06).

Tradicional pólo produtor de areia, a região de Itaguaí – Seropédica concentra, de acordo com o DRM-RJ (Departamento de Recursos Minerais do Estado de Rio de Janeiro), cerca de 100 empresas que produzem 4,5 milhões m³/ano e atendem 80% do mercado produtor da Região Metropolitana. No entanto, esta região está passando por grandes mudanças decorrentes de medidas para a recuperação das áreas mineradas. Hoje, por causa da degradação, está proibida a extração de areia no rio Guandu.

O DRM-RJ afirma que os produtores da região acertaram um acordo com a Justiça, se comprometendo a cumprir a legislação ambiental, minerar de maneira ordenada e recuperar as áreas degradadas, chamado Termo de Ajuste de Conduta, para continuar a operar. Mas isto diminuiu o lucro do minerador, que acaba transferindo para o preço final do produto estas despesas. O setor minerador está sendo obrigado a se acostumar com a preocupação ambiental, responsabilidade social e desenvolvimento sustentável, parceiros atualmente da construção civil.

A extração de areia por cava na região de Itaguaí - Seropédica começou na década de 60. E nas décadas de 80-90 houve no município do Rio de Janeiro, principal comprador desta areia, uma grande expansão na construção civil com o crescimento de bairros como a Barra da Tijuca, com a construção das linhas Vermelha e Amarela, do metrô *etc.*, o que exigiu muito do pólo minerador vizinho.

Nos últimos anos, o setor vem sofrendo com a falta de obras de grande porte, mas existe a preocupação que, quando ocorrer uma nova explosão da construção civil no estado do Rio de Janeiro (construção do anel viário em torno da Baía de Guanabara, novos viadutos e pontes e novas linhas do metrô), o setor irá sofrer com a escassez de agregados.

Já no município de Campos dos Goytacazes, situado ao norte do estado do Rio de Janeiro, a extração de areia é realizada com o auxílio de dragas. Esta extração vem causando o assoreamento do rio Paraíba do Sul com o surgimento de enormes bancos de areia no perímetro da cidade, como mostrado na Figura 2.2.



Figura 2.2 – Fotos da situação de assoreamento no leito do rio Paraíba do Sul e de draga operando no rio (Departamento de Recursos Minerais – DRM/RJ, www.drm.rj.gov.br, acesso em 04/06).

Esses bancos são obstáculos para o fluxo normal das águas, prejudicando a região ribeirinha, havendo a necessidade de retirada deste material depositado. É preciso nessa região a realização de estudos voltados ao detalhamento da mineração de

areia, enfatizando as implicações ambientais sobre o ecossistema, dadas à importância econômico-social-ambiental do rio Paraíba do Sul.

Destaca-se que a extração de areia no rio Paraíba do Sul acontece em quantidade e qualidade significativas, e que esta areia se enquadra perfeitamente nas especificações de uso na construção civil, sendo indicado estudos específicos aprofundados, com vista a agregar valor ao produto, destinando-o para uso mais nobre. Atualmente seu preço é muito baixo, cerca de R\$ 5,00 por m³, o que estimula a extração cada vez maior e sem controle eficaz.

Estima-se, a partir de 2006, um período de investimentos na indústria da construção civil (em obras de infra-estrutura) e habitação no Brasil, oriundos em parte do setor público (em torno de 60%), o que permitirá a retomada de crescimento do setor de agregados na razão de 3% a 5% ao ano (Sumário Mineral Brasileiro, 2005). Com isso, a mineração de agregados da construção civil deverá se intensificar, exigindo mais cuidados para o licenciamento destas atividades e, principalmente, a fiscalização como medida de controle.

De acordo com a Revista Ciência Hoje, (<http://cienciahoje.uol.com.br>, acessado em 01/05), a quantidade de areia consumida anualmente na construção civil brasileira daria para construir 7100 estádios como o Maracanã. A retirada de areia dos rios agride sua calha natural, ocasiona um aumento da vazão de água e acelera, assim, a velocidade de erosão de suas margens.

Já é consenso que a extração de areia natural é uma atividade insustentável. Países da Europa e os Estados Unidos já adotam a sua substituição por areia artificial desde a década de 70. No Brasil, porém, o uso desta tecnologia é muito restrito: somente 10% do mercado de areia de região metropolitana de São Paulo. Mas a areia artificial vem se tornando cada vez mais uma opção interessante do ponto de vista econômico, em função dos gastos com transporte que ocorrem com a areia natural e por ser ecologicamente mais correta.

O maior problema para o aproveitamento das reservas existentes é a urbanização crescente que esteriliza importantes depósitos ou restringe a extração. A ocupação

do entorno de pedreiras por habitações e restrições ambientais à utilização de várzeas e leitos de rios para extração de areia criam sérios problemas para as lavras em operação.

2.1.3 Conflito na atividade mineral

A exploração de agregados é atualmente uma das atividades extrativas mais importantes do setor mineral brasileiro, pelo volume produzido, pelos empregos gerados e pelo enorme efeito multiplicador que produz na economia (Pereira e Almeida, 2004).

É sabido também que não há como minerar sem impactar. Entretanto, existem metodologias que podem ser implantadas no sentido de atenuar, controlar, mitigar e até mesmo compensar esses impactos (Plano Nacional de Agregados, 2006).

Em geral, a mineração provoca um conjunto de efeitos não desejados que podem ser denominados de externalidades. Algumas dessas externalidades são: alterações ambientais; conflitos de uso do solo; depreciação de imóveis circunvizinhos, geração de áreas degradadas e transtornos ao tráfego urbano. Estas externalidades geram conflitos com a comunidade que, normalmente, têm origem quando da implantação do empreendimento, pois o empreendedor não se informa sobre as expectativas, anseios e preocupações da comunidade que vive nas proximidades da empresa de mineração (Bitar, 1997).

A extração de areia sofre com a desinformação e a falta de planejamento e de uma legislação eficiente. Por se localizar próximo aos grandes centros urbanos e por serem visíveis, as marcas deixadas durante o processo produtivo acabam causando má impressão e um desgaste do setor.

No Brasil, face à abundância de agregados adequados para a construção civil na maioria de suas regiões metropolitanas, as unidades produtoras tendem a se localizar o mais próximo ao mercado. Problemas relacionados às políticas de uso e ocupação do solo vêm provocando sucessivos conflitos de localização, na medida

em que ocorre o “sufocamento” das unidades produtoras pelo avanço desordenado da urbanização (Calaes, 2006).

A extração de areia e rocha para brita era uma atividade sem grandes problemas, realizada em locais periféricos, distantes dos centros urbanos. A partir da década de 60, com a urbanização crescente, ocorreu o aumento da população. Este crescimento gerou o surgimento de habitações em locais antes inabitados, ocorrendo a transferência de pessoas dos centros para as periferias e conflitos para a extração de agregados nestes locais devido à dificuldade na convivência mineração *versus* área urbana, causada entre outras coisas pela poluição visual e sonora desta atividade.

Nessa disputa, a mineração começou a ser vista como indesejada por parcelas da população que passaram a buscar formas de restringir a atividade junto às autoridades. Incompreensões de ambas as partes muitas vezes levaram essas disputas a uma verdadeira guerra. Conseqüentemente, o setor convive com impasses de ordem locacional e ambiental, com decorrentes impactos negativos para o ambiente.

Segundo a revista *Areia e Brita* (1997), os produtores de areia se tornaram bodes-expiatórios da grande onda ecológica que surgiu há alguns anos. A extração de areia não é pior do que os inúmeros loteamentos clandestinos em áreas de mananciais e reservas, minerais e ecológicas. O que não se pode negar é a vital e necessária importância da areia como agregado na construção civil.

A degradação ambiental causada pela atividade mineradora de insumos para a construção civil é objeto de preocupação em vários países do mundo e tem gerado conflitos entre a sociedade civil organizada e os mineradores de areia. A produção de bens minerais é imprescindível em qualquer parte do mundo. Portanto, é necessária a busca de aperfeiçoamentos para extração desses materiais, cuja importância econômica e social é indiscutível, de forma a se conseguir uma integração, sem ferir a paisagem e o meio ambiente (Reis e Dias, 2003).

Valverde e Sintoni (1994) argumentaram que a mineração de areia tornou-se problemática, pois se constitui na busca de matéria-prima de baixa relação preço/volume, sendo seu principal fator limitante a distância do mercado consumidor. Desse modo, as mineradoras procuram áreas mais próximas possíveis dos centros de consumo (centros urbanos na sua maioria), o que potencializa situações de conflito entre mineração e uso urbano do espaço.

Os impactos causados pela mineração geram, associados à competição pelo uso e ocupação do solo, conflitos sócio-ambientais pela falta de metodologias de intervenção que reconheçam a pluralidade dos interesses envolvidos. Os conflitos gerados pela mineração exigem, devido à expansão desordenada e sem controle dos loteamentos nas áreas limítrofes, uma constante evolução na condução desta atividade para evitar situações de impasse (Farias, 2002).

Segundo Sánchez (1994) *apud* Farias (2002), existe do ponto de vista da empresa, uma tendência de ver os impactos causados pela mineração unicamente sob as formas de poluição, que são objeto de regulamentação pelo poder público que estabelece padrões ambientais: poluição do ar e das águas; vibrações; e ruídos. É necessário que o empreendedor informe-se sobre as expectativas, os anseios e as preocupações da comunidade, do governo (nos três níveis), do corpo técnico e dos funcionários da empresa, isto é, das partes envolvidas e não só daquelas do acionista principal.

A solução dos conflitos originados da atividade de mineração exige, principalmente em APP (áreas de preservação permanente, que são aquelas áreas necessárias à preservação dos recursos e paisagens naturais e à salvaguarda do equilíbrio ecológico), uma coordenação dos poderes públicos que atuam no setor mineral, em conjunto com a sociedade civil e com os empresários, de modo que sejam implementadas normas e procedimentos com critérios claros (Farias, 2002).

O minerador brasileiro tem feito esforços para acompanhar as demandas atuais em torno da questão ambiental e da mineração. As empresas estão, em sua maioria, aplicando técnicas mais modernas e ambientalmente mais satisfatórias.

Com o crescimento acelerado das cidades, que ocasiona um *déficit* habitacional enorme e outras demandas como a necessidade de saneamento básico, pavimentação *etc.*, e com o sucateamento da infra-estrutura, que cria um entrave para o desenvolvimento econômico do país, apresentar soluções abrangentes para estes problemas demandará um consumo crescente de insumos minerais de uso direto na construção civil.

O Plano Nacional de Aproveitamento de Agregados para a Construção Civil, do Ministério de Minas e Energia, deve trazer instrumentos para permitir que estes recursos minerais estejam disponíveis para a sociedade na quantidade e qualidade necessárias, bem como os locais onde haverá demanda a preços compatíveis. Isto porque, qualquer estudo sobre reservas de agregados deve levar em consideração o planejamento local existente e/ou as restrições que a sociedade impõe à atividade. Em outras palavras, de nada vale a existência de reservas de ótima qualidade, quantidade e localização, se a sociedade restringir ou impedir o seu aproveitamento (Revista Areia e Brita, 2005).

Todos os dados apresentados neste item demonstraram que a exploração e comercialização de areia como agregado na construção civil vai se tornar cada vez mais difícil e onerosa. Por causa desses motivos, faz-se necessário um investimento no desenvolvimento e pesquisa de materiais alternativos que possam substituir a areia natural na construção civil, como o uso de resíduos industriais.

2.2. Reciclagem de resíduos industriais

De acordo com o *site* Reciclagem.net (acesso em 02/06), pode ser considerado resíduo qualquer material que sobra após uma ação ou processo produtivo. Diversos tipos de resíduos (sólidos, líquidos e gasosos) são gerados nos processos de extração de recursos naturais, transformação, fabricação ou consumo de produtos e serviços. Estes resíduos passam a ser descartados e acumulados no meio ambiente, causando não somente problemas de poluição, como também caracterizando um desperdício da matéria originalmente utilizada.

São considerados resíduos industriais os subprodutos resultantes das atividades do setor secundário, como restos de alimentos, madeiras, tecidos, couros, metais, produtos químicos e outros e também os provenientes do beneficiamento de produtos agrícolas e florestais e os resíduos do uso de carvão vegetal no setor siderúrgico e o gás de alto-forno a carvão vegetal. Seu potencial poluidor é variável, dependendo muito da sua composição.

O Brasil produz, a cada ano, cerca de 2,9 milhões de toneladas de resíduo industrial. Estima-se que apenas 29% do resíduo industrial produzido no Brasil recebe correta destinação. O setor de tratamento de resíduos industriais no Brasil tem potencial para gerar R\$ 1 bilhão por ano. No entanto, atualmente, o setor gera somente ¼ desta soma, ou seja, cerca de R\$ 240 milhões/ano, devido às seguintes razões: fiscalização ineficiente e baixa penetração do conceito de responsabilidade social e ambiental nas empresas, que não se acostumaram a colocar em suas planilhas os custos com o descarte de resíduos; além disso, as empresas ainda acham caro o serviço de destinação (<http://www.tribel.com.br>, acesso em 05/06).

Milhares de toneladas de resíduos industriais e agrícolas gerados no processo de transformação de matérias-primas de diferentes segmentos são produzidos anualmente, sendo que atualmente a maioria destes materiais não possui aplicação específica e gera problemas de contaminação do meio ambiente devido à sua deposição desordenada.

Segundo Silva (1994), a denominação “resíduo” é meramente circunstancial, sendo referida apenas ao material que apresenta-se acumulado, sem destinação de uso. A partir do momento em que se encontre uma aplicação qualificada para o mesmo, passa a ser considerado como um co-produto, sendo necessário um estudo concensuoso de suas características e possíveis oportunidades de aplicação.

Silva (1994) descreve ainda que experiências executadas em países como a Alemanha, França e Estados Unidos mostram que o retorno dos investimentos em pesquisas e desenvolvimento de novos produtos baseados em resíduos é relativamente proveitoso e provam que tais pesquisas são essenciais para a sobrevivência e o desenvolvimento de uma nação, principalmente nos dias atuais.

Nos países desenvolvidos, existe uma tendência muito forte de regulamentar a questão da deposição dos resíduos no meio ambiente. Nos últimos anos, tem-se verificado um crescente número de trabalhos voltados para a utilização e o aproveitamento de resíduos industriais e agrícolas na produção de diversos materiais voltados para o setor da construção civil, como argamassas, blocos, painéis e concretos (Ferreira *et al.*, 1997 *apud* Freitas, 2005).

Nos últimos anos, percebe-se uma preocupação da sociedade com a preservação do meio ambiente e, conseqüentemente, com o crescente acúmulo de resíduos e dejetos de diferentes origens.

A questão ambiental tem se tornado cada vez mais um ponto decisivo na continuidade ou não de um determinado negócio. A avaliação e a minimização dos impactos sobre o meio ambiente, causados por todos os tipos de ações, estão adquirindo cada vez maior importância, devido à evidente limitação dos recursos naturais disponíveis, à importância de se preservar o ambiente natural e à necessidade de se ter um desenvolvimento sustentável (Carneiro, 2003 *apud* Lima, 2005).

No modelo atual de produção, resíduos sempre são gerados na produção de bens de consumo. Assim, a massa de resíduos gerados é superior à massa de bens de consumo em longo prazo para qualquer economia. Neste processo, matérias-primas não-renováveis são transformadas em lixo que se acumula em aterros, ocupando espaços e, muitas vezes, concentrando produtos perigosos. Esta concentração de resíduos significa muitas vezes um risco ambiental, posto que acidentes são possíveis, especialmente porque não existe garantia que em longo prazo os mesmos continuarão a ser guardados e operados com segurança (John, 2000b).

A possibilidade de redução dos resíduos gerados nos diferentes processos produtivos apresenta limites técnicos, de forma que resíduos sempre existirão. A política de proteção ambiental hoje vigente é voltada quase que exclusivamente para a deposição controlada dos resíduos. Para controlar os riscos de acidentes, alguns

aterros têm recebido aperfeiçoamentos constantes, o que têm levado o preço destes serviços a valores muitas vezes economicamente inviáveis (John, 2000a).

Pimentel (2005) afirma que a reciclagem é a mola mestra do equilíbrio ecológico, e seu conceito abrange diversos aspectos técnicos, sociais e econômicos da relação homem/meio ambiente. Entender a importância da reciclagem é bom e fácil, mas saber praticá-la é um grande desafio, pois a relação custo/benefício de muitos destes estudos, bem gerenciados, chega a resultados satisfatórios e bastante rentáveis.

Lima (2005) afirma também que a legislação que disciplina as questões do meio ambiente tem sido mais rigorosa no sentido de obrigar os geradores de resíduos a tratá-los de maneira adequada, colocando a reciclagem como uma forma atraente para soluções dos problemas de gerenciamento de resíduos, tanto para o lado empresarial quanto para os órgãos de proteção ambiental.

Ainda para Lima (2005), o processo de reciclagem é muito importante por preservar os recursos naturais e o meio ambiente, diminuindo o material aterrado ou jogado a céu aberto, evitando-se a poluição do ar, da terra e da água. Contribui ainda para o adequado manejo dos resíduos sólidos, minimizando os problemas com vetores e doenças associadas aos resíduos e, além disso, torna o custo da produção menor, se comparado com o da produção originada da matéria-prima virgem.

De fato, os resíduos se transformaram em graves problemas urbanos e ambientais com um gerenciamento oneroso e complexo. A escassez de áreas de deposição de resíduos causada pela ocupação e valorização de áreas urbanas, os altos custos sociais no gerenciamento de resíduos, os problemas de saneamento público e a contaminação ambiental são alguns destes problemas (John *et al.*, 2003).

A reciclagem pode contribuir bastante com a diminuição das áreas destinadas à deposição de resíduos e dos custos que isto acarreta. A incorporação de resíduos na produção de materiais pode reduzir o consumo de energia para a produção do mesmo produto sem resíduos e, dependendo de onde esteja localizado o resíduo e

seu mercado consumidor potencial, diminuir distâncias de transporte e contribuir para a redução da poluição gerada (Afonso, 2005).

Com o objetivo de reduzir a geração de resíduos nos processos industriais e agrícolas, principalmente os poluentes, bem como melhor reaproveitá-los, seja no próprio processo produtivo ou como matéria-prima na elaboração de outros materiais, tem-se investido cada vez mais em pesquisas para a transformação destes, até então considerados apenas resíduos, em co-produtos de interesse comercial (Della *et al.*, 2001 *apud* Freitas, 2005).

Marino (2004) relata que pesquisas vêm sendo desenvolvidas há muitos anos, por técnicos ou órgãos independentes e sem visão empresarial, visando ao aproveitamento parcial ou total de resíduos sólidos industriais, em diversas áreas da atividade econômica. Verificam-se também esforços conjuntos que objetivam identificar oportunidades específicas de reutilização de resíduos industriais.

De acordo com a Universidade de São Paulo-USP (1997), a utilização de resíduos como matéria-prima possibilita: a redução de uso de recursos naturais; a redução de demanda de energia para sua extração; a redução de transporte dos mesmos; a redução do volume utilizado nos aterros sanitários e industriais, aprovados ou não, significando risco de acidentes ambientais; e a redução dos custos totais, diretos e indiretos na construção de habitações, infra-estrutura ou obras sociais.

A preocupação com a reciclagem de materiais, não incorporados ao produto final de uma indústria, constitui questão fundamental para os objetivos de desenvolvimento sustentável de um país. Em todo o mundo, o setor siderúrgico e metal-mecânico são destacados como setores industriais que gerenciam, de forma satisfatória, os co-produtos, subprodutos e resíduos gerados, reciclando-os no seu processo produtivo ou encontrando aplicações que viabilizem a utilização dos materiais, em vez de uma simples disposição. Nestas utilizações, destaca-se o uso nos segmentos da construção civil (Lima *et al.*, 2000).

Lima (2005) argumenta que o grande desafio das pesquisas de produtos reciclados é a competição em preço com seu concorrente de mercado, o que não é uma tarefa

simples. Isto é resolvido, em parte, quando se tem um processo de reciclagem de fácil obtenção. Porém, em alguns casos a economia só é perceptível em longo prazo ou de forma indireta, com a economia proporcionada ao uso de matérias-primas naturais (preservação dos recursos naturais) ou a melhoria da saúde das pessoas pela redução da poluição (menores custos com saúde da população).

Diferentemente do Brasil, em diversos países desenvolvidos são instituídas políticas de valorização dos produtos e serviços ditos “ambientalmente preferíveis”, definidos como aqueles que possuem menor efeito nocivo ao ambiente ou à saúde, quando comparados com seus competidores durante todo seu ciclo de vida (Clinton, 1993 *apud* Silva *et al.*, 2001).

Do ponto de vista da viabilidade técnica, o novo produto com uso de material reciclado deve satisfazer aos ditames da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e às solicitações a que estará submetido durante sua utilização. Deve ser funcional para o usuário e com tecnologia simples para ser aplicado. A razão primordial para que qualquer produto tenha absoluto sucesso é sem dúvida o próprio usuário, não esquecendo as necessidades da indústria da construção civil e, conseqüentemente, os projetistas.

Os materiais convencionais de construção civil demandam em sua fabricação de significativa quantidade de energia, consomem recursos já em escassez e geram grandes volumes de resíduos. Daí a importância de se buscar a utilização de resíduos que possibilitem a redução do consumo de combustíveis no processo de obtenção de novos produtos. Além desta vantagem ecológica, os materiais alternativos poderão viabilizar, como conseqüência, construções com menor custo (Castilho, 1996).

Silva Filho *et al.* (2002) cita que a construção civil ao mesmo tempo em que é uma grande geradora de resíduos, é também, potencialmente, uma grande recicladora de resíduos originários de outras indústrias, tais como: siderurgia, química e petroquímica.

Segundo Vázquez (2001), o setor da construção civil tornou-se algo primordial nas políticas ambientais, crescendo bastante nos últimos anos. Este destaca-se pelo grande potencial em absorver vários tipos de resíduos industriais, principalmente utilizando-se de processos e métodos construtivos pré-fabricados, que deixará a obra mais “enxuta”, reduzindo o custo da mesma, gerando menos resíduos e ainda podendo contribuir para a preservação do meio ambiente.

Segundo Rocha e Cheriaf (2003), as pesquisas sobre resíduos de construção e demolição, resíduos industriais e agroindustriais vêm tomando cada vez mais destaque no cenário da construção civil, em virtude da necessidade ambiental e do potencial técnico e econômico que esses resíduos representam, principalmente pelo fato desses resíduos serem constituídos principalmente de silicatos, aluminatos e óxidos alcalinos, que é a constituição química básica dos materiais de construção.

Percebe-se dessa forma o quanto a construção civil tem potencial para a absorção de produtos alternativos reciclados, oriundos de quase todos os setores, desempenhando assim um papel de extrema importância na questão ambiental, além de constituir um caminho de extrema importância na área econômica para o mercado de trabalho e de produção (Garlet, 1998).

De acordo com John (1999), a cadeia da construção civil é o setor da economia que mais consome materiais naturais, tendo, portanto, um grande potencial reciclador. A primeira e a mais visível das contribuições ambientais da reciclagem é a preservação de recursos naturais, que é conseguida pela substituição por resíduos reciclados. A incorporação de resíduos reciclados na produção de materiais de construção também pode reduzir o consumo de energia, porque podem diminuir as distâncias de transportes de matérias-primas. Existindo um processo de obtenção de agregados reciclados, os benefícios serão visíveis, pois se pode minorar consideravelmente o volume de resíduos a serem depositados.

O grande volume de recursos naturais consumido e uma grande geração dos resíduos nos processos industriais fazem da reciclagem uma boa alternativa. A proteção do solo e da água, a limitação da produção de perdas e a reutilização de

materiais são itens-chave para o conceito de desenvolvimento sustentável (Pera,1996).

Muitos resíduos vêm sendo aplicados em pesquisas como agregados graúdo e miúdo na confecção de concretos e argamassas, levando-se em consideração os seguintes aspectos: a necessidade de se encontrar uma disposição adequada para os resíduos e a escassez de recursos para a produção dos agregados naturais.

A reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) como agregados para argamassas e concretos já foi estudada por vários autores como Levy (1997), Zordan (1997), Ângulo (2000), Miranda (2000), Lima (2005), entre outros, e tem se mostrado viável em estudos brasileiros do ponto de vista tecnológico e econômico. Um dos problemas mais graves nos RCD é variabilidade de composição e, conseqüentemente, de outras propriedades destes agregados reciclados.

Os resíduos provenientes de pedreiras também são utilizados na construção civil na forma de agregados (britas e areias). Utilizam-se da incorporação de unidades de beneficiamento nas pedreiras e se objetiva que o impacto da exploração seja minorado, conduzindo a um maior aproveitamento dos recursos naturais não renováveis, e ainda, que a alternativa encontrada seja um fator indutor de novos empreendimentos e de geração de empregos. O Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) vem pesquisado o tema frequentemente.

Os resíduos de corte de mármore (RCM) e de corte de granito (RCG) foram também utilizados como agregados em argamassas por Gonçalves (2000), Camon (1997) e Moura *et al.* (2002), entre outros, e apresentam ótimo desempenho. Outros resíduos também obtiveram resultados satisfatórios como agregados na construção civil e se destacam como agregados mais leves que os naturais, tais como os resíduos da indústria de calçados (EVA - etileno acetado de vinila) e resíduos de borrachas automotivas.

Sob o ponto de vista logístico, as escórias siderúrgicas ou metal-mecânicas apresentam condições favoráveis de reciclagem. Entretanto no aspecto técnico, incluindo aí suas características intrínsecas, ainda há muito a ser avaliado,

especialmente naquelas derivadas de produção de aço e de outros processos metalúrgicos de beneficiamento de metais não-ferrosos.

A legislação ambiental cada vez mais exigente e o crescimento da consciência ecológica têm impulsionado o interesse pela reciclagem de resíduos, mas, além destes, os fatores econômicos, tais como o alto custo de deposição (acima de U\$ 100,00/tonelada em alguns casos), vêm também acelerando este processo (Sbrighi e Helene, 2005).

As escórias apresentam-se como resíduos dos que em maior volume são gerados no mundo. Destes, as escórias de alto-forno e de aciaria constituem um pouco mais da metade de todos os outros resíduos metalúrgicos gerados (Masuero *et al.*, 1998 *apud* Moura, 2000).

Entre as escórias metalúrgicas destacam-se, além das de alto-forno e de aciaria já citadas, a escória de cobre, de ferro-cromo, entre outras, as quais vêm sendo bastante estudadas e aplicadas na construção civil, na forma de adições ao cimento ou como agregado graúdo e/ou miúdo na fabricação de concretos e argamassas. Todas elas estão apresentando excelentes resultados, incentivando assim a pesquisa e utilização destes tipos de escórias.

No próximo item será apresentado outro tipo de escória, produzida pelo setor metal-mecânico, a escória de fluxo de soldagem (EFS). Esta foi pesquisada no presente trabalho, buscando que sua reciclagem obtenha um desempenho positivo como outras escórias alcançaram.

2.3. Escória de fluxo de soldagem

2.3.1 Processo de soldagem a arco submerso

O processo de produção da Escória de Fluxo de Soldagem (EFS) difere das outras escórias. Enquanto as escórias de alto-forno, de aciaria e de cobre são oriundas de processos de fabricação do ferro-gusa, do aço e do beneficiamento do cobre, respectivamente, a geração da EFS se dá por um processo de soldagem.

Nesse processo automático chamado soldagem a arco submerso (SAS), o metal de base e a poça de fusão ficam totalmente submersos em um fluxo granulado que garante a proteção contra os efeitos da atmosfera. O fluxo granulado funde-se parcialmente, formando uma camada de escória líquida que depois se solidifica. A este material sólido dá-se o nome de escória de fluxo de soldagem (Modenesi, 2003).

O processo de soldagem por arco submerso é um processo no qual o calor para a soldagem é fornecido por um arco elétrico desenvolvido entre um eletrodo de arame sólido ou tubular e a peça-obra. O arco fica protegido por uma camada de fluxo granular fundido que o protege, assim como o metal fundido e a poça de fusão, da contaminação atmosférica.

Como o arco elétrico fica completamente coberto pelo fluxo sob a forma de grânulos, este não é visível. A região da solda é alimentada pelo fluxo que produz uma completa cobertura do arco e da poça de fusão, daí o nome “arco submerso”. A soldagem se desenvolve sem faíscas, luminosidades, respingos ou radiação, que caracterizam os demais processos de soldagem de arco aberto.

Paranhos e Souza (1999) explicam que durante a soldagem, o calor produzido pelo arco elétrico funde uma parte do fluxo juntamente com a ponta do eletrodo, como ilustra a Figura 2.3. A poça da solda permanece sempre envolta e protegida pelo fluxo escorificante, sobrepondo-se ainda por uma camada de fluxo não fundido.

O eletrodo permanece a uma pequena distância acima do metal base, e o arco elétrico se desenvolve nesta posição. Com o deslocamento do eletrodo ao longo da junta, o fluxo fundido sobrenada e se separa do metal de solda líquido sob a forma de escória.

Na soldagem por arco submerso, a corrente elétrica flui através do arco e da poça de fusão, que consiste em metal de solda e fluxo fundidos. Em adição à sua função protetora, o fluxo pode fornecer elementos desoxidantes e, em solda de aços-liga,

pode conter elementos de liga que modificam a composição química do metal depositado.

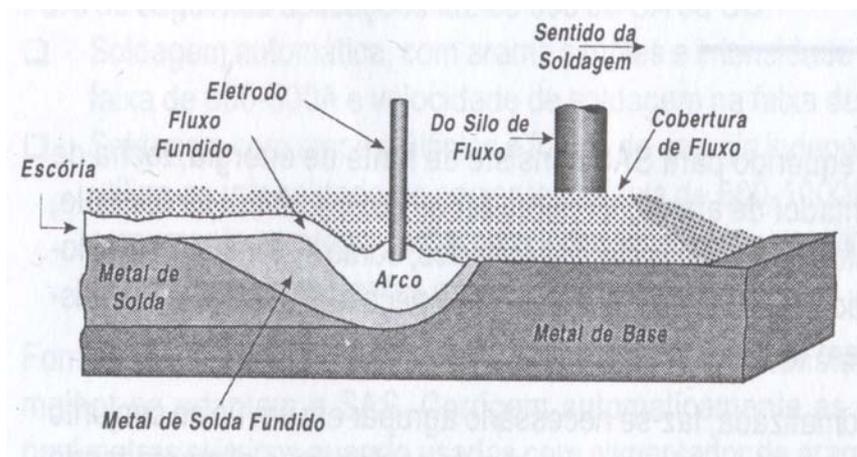


Figura 2.3 – Ilustração do processo de soldagem a arco submerso (Paranhos e Souza, 1999).

O fluxo é alimentado por gravidade ligeiramente à frente do arco ou concentricamente ao eletrodo. Esta independência do par fluxo-eletrodo é outra característica do processo que o difere do processo de soldagem com eletrodo revestido. Na soldagem a arco submerso, esta separação permite que se utilize diferentes combinações fluxo-aramé, podendo com isto selecionar combinações que atendam especificamente a um dado tipo de junta em especial (Gimenes Jr. e Ramalho, 2004).

O equipamento requerido para a SAS consiste de fonte de energia, tocha de soldagem, alimentador de arame e de fluxo e painel de controle (Paranhos e Souza, 1999). Para Fortes e Araújo (2004), cinco elementos se encontram presentes na execução de uma SAS: calor gerado pela passagem de uma corrente elétrica através de um arco; arame para soldagem; as peças a serem soldadas; fluxo escorificante; o movimento relativo entre o cabeçote de soldagem e as peças de trabalho. A Figura 2.4 ilustra o equipamento básico necessário para se realizar uma SAS.

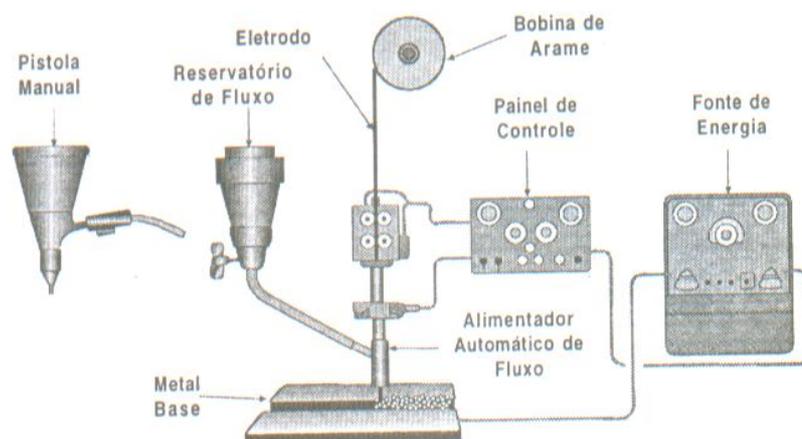


Figura 2.4 – Equipamento básico para a soldagem a arco submerso (Paranhos e Souza, 1999).

Também de acordo com Paranhos e Souza (1999), o metal de solda, que tem ponto de fusão mais elevado do que a escória, se solidifica, enquanto a escória permanece fundida por mais algum tempo. A escória também protege o metal de solda recém-solidificado, pois este é ainda, devido a sua alta temperatura, muito reativo com o nitrogênio e o oxigênio da atmosfera, com facilidade de formar óxidos e nitretos que alteram as propriedades das juntas soldadas.

Com o resfriamento posterior, remove-se o fluxo não fundido (que pode ser reaproveitado) através de aspiração mecânica ou por meio de métodos manuais, e a escória, relativamente espessa, de aspecto vítreo e compacto, se destaca com facilidade, como pode ser visto nas Figuras 2.5 e 2.6.



Figura 2.5 – Retirada da EFS durante a soldagem.



Figura 2.6 – EFS destacada da soldagem.

Paranhos e Souza (1999) especificam ainda que o processo de SAS é empregado em grande escala na indústria devido à sua facilidade de operação e produtividade. No Brasil, este processo é utilizado na fabricação metálica como tubos, vasos de pressão, caldeiras e trocadores de calor, equipamentos siderúrgicos, navios, autopeças e todo tipo de equipamento pesado. Ainda, encontra grande uso na recuperação de peças, como rolos de lingotamento contínuo e partes rodantes de tratores.

A SAS permite um alto grau de automação, sendo o eletrodo continuamente alimentado ao cabeçote de soldagem, conferindo a este rapidez, economia e repetibilidade de resultados quando comparado aos demais processos de soldagem a arco elétrico.

Outra característica do processo da SAS está em seu rendimento, pois, praticamente, pode-se dizer que não há perdas de material por projeção (formação de respingos). Possibilita também o uso de elevadas correntes de soldagem, o que, aliado às altas densidades de corrente, oferece ao processo alta taxa de deposição, quando comparado a outros processos de soldagem. Em média, se gasta com este processo cerca de 1/3 do tempo necessário para fazer o mesmo trabalho com eletrodos revestidos (Gimenes Jr. e Ramalho, 2004).

Fortes e Araújo (2004) destacam como vantagens do processo: elevada velocidade de soldagem; maiores taxas de deposição; boa integridade do metal de solda;

processo de fácil uso; melhor ambiente de trabalho e maior segurança para o operador. As soldas feitas por arco submerso apresentam boa ductilidade, boa uniformidade e uma excelente aparência do cordão de solda. Obtêm-se propriedades mecânicas no metal de solda sempre compatíveis às do metal base.

A maior limitação deste processo de soldagem é o fato de que não permite a soldagem em posições que não sejam a plana ou horizontal. Ainda assim, a soldagem na posição horizontal só é possível com a utilização de retentores de fluxo de soldagem. Na soldagem circunferencial, pode-se recorrer a sustentadores de fluxo como o que é apresentado na Figura 2.7, para manter a camada de fluxo sobre a poça. (Gimenes Jr. e Ramalho, 2004).

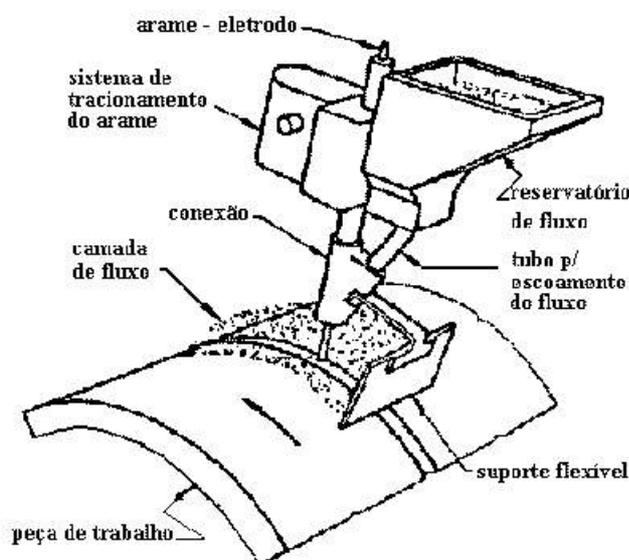


Figura 2.7 – Exemplo de recurso para sustentação de fluxo durante SAS (Gimenes Jr. e Ramalho, 2004).

Para cada 1 kg de fluxo consumido, em média, é consumido igual peso de arame, que por sua vez gera igual peso de escória de soldagem. O mercado de fluxo e de arame para soldagem a arco submerso no Brasil foi estimado por Morete *et al.* (2006) em cerca de 500 t/mês para o ano de 2002. Logo, é previsto que a geração do resíduo de EFS também seja da ordem de 500 t/mês. Somente no Estado de São Paulo, aproximadamente 250 t/mês deste resíduo é gerado pelas grandes indústrias do segmento metal-mecânico.

2.3.2 Classificação do fluxo de soldagem

Os fluxos utilizados na SAS são compostos minerais granulares e fusíveis que cobrem o arco e produzem proteção, limpeza e controle da geometria do cordão de solda. Eles influenciam fortemente a usabilidade e as propriedades mecânicas do metal de solda. Muitos fluxos diferentes estão disponíveis no mercado, cada um oferecendo características peculiares de desempenho, permitindo otimizações de processo para os diferentes requisitos de aplicação.

Fortes e Araújo (2004) afirmam que dois fatores influenciam a escolha do fluxo: características de desempenho e propriedades mecânicas. As características de desempenho incluem facilidade de remoção da escória; capacidade de remoção de óxidos; capacidade de condução de corrente elétrica; possibilidade de uso de vários arames e possibilidade de aplicação de corrente alternada. As propriedades mecânicas são de importância primária para muitas aplicações críticas, tais como vasos de pressão e serviços a baixa temperatura. Para essas soldas, deve haver um compromisso das características de desempenho para satisfazer às propriedades mecânicas requeridas.

Segundo Davis (1981), por ser um processo por proteção por escória, este usa um fluxo que tem as funções: estabilizar o arco elétrico; formar uma escória que protege a poça de solda líquida contra a ação da atmosfera; atuar como desoxidante, limpando o metal de solda líquido; atuar como isolante térmico, concentrando o calor na poça de fusão; e controlar o acabamento e a geometria do cordão de solda. A parte não fundida do fluxo age como isolante térmico, concentrando o calor na poça de fusão; que irá caracterizar a alta penetração que pode ser obtida com o processo, e formando a escória que protege a poça de solda líquida contra a ação da atmosfera. O fluxo fundido é, normalmente, condutivo, embora no estado sólido, a frio, não o seja.

De acordo com o método de fabricação, os fluxos podem ser aglomerados ou fundidos. Os fluxos aglomerados são constituídos de compostos minerais finamente moídos e ferro-ligas ou ligas similares que têm como principal função desoxidar a poça da solda; a estes ingredientes é adicionado um agente aglomerante. O produto

agregado e granulado é sinterizado em fornos com temperatura entre 600°C e 900°C. Já os fluxos fundidos são constituídos dos mesmos componentes dos fluxos aglomerados. Estes ingredientes são fundidos em forno elétrico em temperaturas entre 1300°C e 1500°C. Esse fluxo tem custo de fabricação elevado (Paranhos e Souza, 1999).

Os fluxos aglomerados (Figura 2.8) são mais usados e permitem o uso de desoxidantes e a adição de elementos de liga; permitem o uso de uma camada de fluxo mais espessa na zona de solda devido à sua baixa densidade; a escória se destaca com facilidade e possui baixo custo de fabricação.



Figura 2.8 - Fluxo granulado.

Os fluxos que darão origem à escória podem ser classificados de acordo com a neutralidade, pois qualquer fluxo interfere na composição química do metal da solda. Assim sendo, a nomenclatura, que segundo a ANSI/AWS A5-17/A5.17M (1997) descreve o comportamento do fluxo e, geralmente, refere-se ao teor de manganês e/ou de silício que será transferido do fluxo para o metal de solda, é a seguinte:

- Fluxos ativos: são definidos como "aqueles que contêm quantidades apreciáveis de manganês, silício ou ambos, que são desoxidantes adicionados ao fluxo para melhorar a resistência à porosidade e a trincas causadas pelos contaminantes no metal de base ou dele provenientes". A elevação da tensão do arco durante a soldagem causa um aumento significativo do consumo de fluxo, aumentando os teores de manganês e/ou

de silício no depósito de solda e, conseqüentemente, aumentando também sua resistência mecânica e dureza e diminuindo sua tenacidade.

- Fluxos neutros: estes fluxos são "aqueles que não produzem alterações significativas na composição química do metal depositado como resultado de grandes mudanças na tensão do arco e, portanto, no comprimento do arco". Conseqüentemente, a resistência mecânica do depósito de solda não é significativamente alterada pela quantidade fundida de fluxo, que varia com a tensão de soldagem. Estes fluxos apresentam maior sensibilidade à porosidade e às trincas.
- Fluxos ligados: são aqueles que, além da alteração dos teores de manganês e silício, adicionam outros elementos de liga (cromo, níquel, molibdênio, cobre etc.) ao metal de solda. São necessários cuidados como o controle dos parâmetros de soldagem, pois o teor dos elementos de liga na solda será função do consumo específico de fluxo. As principais aplicações dos fluxos ligados são: a soldagem de aços baixa liga e revestimento duro.

Os fluxos também são classificados pelo IIW (*International Institute of Welding*) quanto à composição química pelo índice de basicidade. Uma das fórmulas mais utilizadas para expressar o índice de basicidade (IB) de um fluxo, segundo Fortes e Araújo (2004), é:

$$IB = \frac{CaO + CaF_2 + MgO + K_2O + Na_2O + Li_2O + \frac{1}{2}(MnO + FeO)}{SiO_2 + (Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Sendo,

- IB < 1 Fluxos ácidos
- 1 < IB < 1,5 Fluxos semi-básicos
- IB > 1,5 Fluxos básicos

Não há nenhuma relação direta entre os conceitos de neutralidade e basicidade. De forma geral, mas não uma regra, os fluxos ácidos são também ativos quanto à

neutralidade e os básicos e semi-básicos correspondem aos fluxos neutros quanto à neutralidade.

As EFS são classificadas de acordo com fluxo que a origina. Nesta dissertação foi aplicada a classificação pelo índice de basicidade e o enquadramento das três EFS analisadas e utilizadas será mostrado no próximo capítulo.

2.3.3 Destinação da EFS

Atualmente não existem recomendações para o uso da EFS no Brasil, sendo, na maioria das vezes, disposta em aterros sanitários. Assim, a busca por alternativas tecnológicas para a reciclagem deste resíduo é de alto interesse econômico e ambiental. A reciclagem das EFS é um assunto novo, poucas pesquisas foram realizadas a respeito.

Carter (1988) analisou o reprocessamento e re-uso da EFS como fluxo na SAS e concluiu que é possível, desde que seja utilizado um procedimento para esmagamento e peneiramento da EFS de forma que o tamanho de partícula se assemelhe àquele do fluxo original. Mas ressaltou que trabalhos futuros devem ser feitos para confirmar esta análise. De fato, pode se observar que muitas empresas re-utilizam a EFS como fluxo, mas mesmo assim quase a totalidade da produção desse resíduo no Brasil não possui destinação.

Devido à preocupação ambiental e ao interesse da indústria produtora de EFS em encontrar uma destinação para este resíduo, Dias *et al.* (2004) estudaram a aplicação da EFS como agregado para a produção de concreto. Os resultados obtidos permitiram concluir que:

- A textura superficial lisa da EFS quando utilizada como agregado graúdo tem influência positiva na trabalhabilidade e negativa nas resistências mecânicas avaliadas, para concretos com relação água-cimento constante.

- A morfologia irregular, alongada e lamelar, bem como a textura superficial lisa da EFS quando utilizada como agregado miúdo não interfere significativamente na trabalhabilidade e nas resistências mecânicas avaliadas.
- Os concretos confeccionados com EFS como agregado, tanto miúdo como graúdo, atendem adequadamente (quanto às propriedades avaliadas) às exigências de fabricação de peças de concreto para infraestrutura urbana, tais como guias, sarjetas, elementos de drenagem e outras aplicações onde não é exigida resistência mecânica elevada.
- A baixa resistência mecânica do concreto foi relacionada à textura superficial lisa da EFS quando utilizada como agregado graúdo, mas quando utilizada como agregado miúdo não influenciou de maneira significativa a resistência mecânica. Assim, concluiu-se que a EFS poderia ser utilizada como substituto do agregado miúdo convencional na fabricação de argamassas e concretos não-estruturais destinados à construção civil.

No entanto, mais estudos com argamassas e/ou concretos com EFS substituindo o agregado miúdo deveriam ser efetuados para que a aplicação deste resíduo seja atestada e regulamentada como de uso confiável. Os resultados desse estudo serviram de motivação para a realização desta dissertação.

Morete *et al.* (2006) realizou um trabalho objetivando reaproveitar tal resíduo como uma matéria-prima alternativa para fabricação de produtos de cerâmica vermelha para a construção civil. Os resultados experimentais obtidos indicaram claramente que o resíduo de escória de fluxo de soldagem gerado pelo setor metal-mecânico pode ser utilizado como uma matéria-prima alternativa na formulação de massa argilosa para fabricação de cerâmica vermelha. Contudo, os corpos cerâmicos apresentaram propriedades tecnológicas promissoras contendo apenas até 10% em peso de resíduo de escória de soldagem.

Logo, esta dissertação visa a um estudo da substituição total da areia natural por EFS, uma reciclagem mais abrangente e com reutilização mais volumosa deste

resíduo, que irá trazer, se comprovada seu sucesso, grande vantagem para esse problema ambiental (deposição inadequada das EFS).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Materiais

Para realização do programa experimental desta dissertação, que objetiva a caracterização da EFS e seu emprego em argamassas de múltiplo uso como agregado miúdo, foram utilizados materiais convencionais como cimento, água e areia, além da EFS. As principais características desses materiais são descritas a seguir.

3.1.1. Cimento Portland

O cimento utilizado na confecção das argamassas foi o cimento Portland composto com escória de alto-forno, CPIIE-32 da marca Votoran. A escória de alto-forno tem a propriedade de ligante hidráulico muito resistente, proporcionando ao cimento melhoria de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final. Este cimento foi escolhido por tratar-se de um material de fácil disponibilidade no mercado e também por ser o cimento mais utilizado na produção de elementos construtivos em geral.

As principais características físicas e químicas do cimento Portland são mostradas na Tabela 3.1. A área específica superficial foi determinada pelo permeabilímetro de Blaine de acordo com a NBR NM 76 (1998) e a massa específica teórica de acordo com as prescrições da NBR 6474 (1984). Já a composição química foi obtida por espectroscopia por fluorescência de raios X (*EDX*).

3.1.2. Água

A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento do município de Campos dos Goytacazes-RJ.

TABELA 3.1 – Características do cimento Portland.

*CaO (%)	70,21
*SiO ₂ (%)	17,03
*Al ₂ O ₃ (%)	5,89
*SO ₃ (%)	3,38
*Fe ₂ O ₃ (%)	1,82
*K ₂ O (%)	0,86
*TiO ₂ (%)	0,44
*Outros (%)	0,38
Área específica Blaine (m ² .kg ⁻¹)	342
Massa específica (kg.m ⁻³)	2,92

* Resultados obtidos por espectroscopia por fluorescência de raios X

3.1.3. Agregado Miúdo

De acordo com Tartuce e Giovannetti (1990), agregado é a união de materiais com graduação, isto é, grãos de diferentes tamanhos formando uma verdadeira escala de tamanhos. Por uma questão econômica deve-se empregar agregados bem graduados, pois quanto mais perfeita for a graduação menor será o volume de vazios e mais econômica a argamassa fabricada com esse material inerte.

Nesta dissertação como agregados miúdos foram utilizados Areia Natural e EFS, em seus três tipos: EFS Ácida, EFS Semi-Básica e EFS Básica. Para melhor comparação dos resultados entre as argamassas fabricadas, os agregados possuíram mesma composição granulométrica, a da areia normal brasileira (areia-padrão).

A Areia Natural e as EFS foram separadas em quatro frações, na mesma proporção em massa, de acordo com a NBR 7214 (1982) que prescreve a areia normal para ensaio de cimento. A nomenclatura de cada fração da areia normal e o intervalo entre peneiras que as abrangem estão colocadas a seguir:

Fração grossa:	2,4 mm - 1,2 mm
Fração média grossa:	1,2 mm - 0,6 mm
Fração média fina:	0,6 mm - 0,3 mm
Fração fina:	0,3 mm - 0,15 mm

A concepção da areia com tal composição granulométrica surgiu de um estudo desenvolvido na pós-graduação do Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica-USP, onde se avaliou a influência da curva granulométrica em algumas propriedades das argamassas (Carneiro, 1997). A partir disso, esta composição granulométrica de areia vem sendo comumente utilizada em pesquisas.

As principais características da Areia Natural e das EFS são apresentadas a seguir.

3.1.3.1. Areia Natural

Foi utilizada areia natural do rio Paraíba do Sul lavada e seca em estufa por 24 horas antes da utilização. O material caracterizado conforme recomendação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui módulo de finura de 2,65 (NBR 7211, 1983); massa específica aparente no estado solto de $1,39 \text{ g/cm}^3$ (NBR 7251, 1982) e massa específica teórica de $2,62 \text{ g/cm}^3$ (NBR 6508, 1984). Sua caracterização química foi realizada por meio de espectroscopia por fluorescência de raios X e mostrou que o material é composto por 100% de SiO_2 .

Essa areia é adequada para esta dissertação, pois é de natureza quartzosa e com ausência de materiais argilosos, não interferindo negativamente no desempenho das propriedades da argamassa depois de endurecida.

3.1.3.2. Escória de Fluxo de Soldagem

Nesta dissertação foram utilizados três tipos de EFS, duas provenientes da empresa Machado Vianna Comércio e Indústria Ltda. – Caldeiraria, Usinagem e Fundição e uma cedida pela Aalborg Industries S/A.

Primeiramente foi determinada a composição química, por espectroscopia por fluorescência de raios X, destes resíduos. Com esses resultados foi possível calcular o índice de basicidade (Equação 2.1) e classificar as EFS de acordo com esse critério.

Porém, como o equipamento utilizado nesta dissertação não é capacitado para quantificar elementos químicos com pesos atômicos mais leves que o sódio, como, por exemplo, o flúor, importante componente para a determinação do índice de basicidade, não foi possível calcular o índice de basicidade das EFS pela caracterização química.

Então, a classificação adotada para as três EFS utilizadas nesta dissertação continuou seguindo o critério de basicidade, só que de acordo com o informado pelos fabricantes das EFS, como mostrado a seguir:

- Escória de fluxo de soldagem ácida (EFS Ácida): produzida no processo de SAS com o fluxo ácido CARBOOX 108 e fornecida por Aalborg Industries S/A.
- Escória de fluxo de soldagem semi-básico (EFS Semi-Básica): cedida pela empresa Machado Vianna Comércio e Indústria Ltda. e produzida no processo de SAS com o fluxo neutro CARBOOX 105.
- Escória de fluxo de soldagem básico (EFS Básica): produzida no processo de SAS com o fluxo básico Licolnweld 802 e cedida pela empresa Machado Vianna Comércio e Indústria Ltda.

Também foi realizada nessas três EFS uma análise mineralógica com o intuito de verificar se este resíduo possui risco e/ou restrição de seu emprego, e uma caracterização física para comprovação de que esse resíduo pode apresentar uma granulometria compatível ao agregado miúdo. Também foi realizada a caracterização ambiental das EFS, de acordo com a NBR 10004 (1987), em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas.

3.2. Metodologia

John *et al.* (2003) ponderam que uma metodologia, que tenha por objetivo orientar atividades de pesquisa e desenvolvimento de reciclagem de um resíduo como material de construção civil, deve reunir estudo aprofundado do processo de geração dos resíduos, caracterização química, mineralógica, microestrutural e física dos resíduos, bem como a sua variabilidade. Além do desenvolvimento dos novos produtos, a avaliação do desempenho técnico, econômico e ambiental do mesmo é também etapa importante do processo de pesquisa.

Seguindo essa metodologia, a seguir são apresentados os procedimentos adotados na caracterização da EFS e classificação e qualificação das argamassas elaboradas com esse resíduo.

A amostragem da EFS foi realizada segundo a NBR 10007 (1987) com o recolhimento de toda a escória necessária para a pesquisa de uma vez só. As amostras foram colocadas em sacos apropriados e trazidas para o Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), onde a partir disto puderam ser beneficiadas e caracterizadas.

3.2.1. Beneficiamento da EFS

A EFS apresenta originalmente tamanho alongado, relativamente espesso, de aspecto vítreo e compacto (Figura 2.6). Por isso, necessita de uma cominuição para adequá-las às dimensões do agregado miúdo utilizado na confecção de argamassas.

A NBR 7211 (1983) fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados, miúdos e graúdos, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas. Dessa forma, define areia ou agregado miúdo como areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT de 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 0,075 mm.

A EFS foi beneficiada no LECIV/UENF, através de britagem em um britador de mandíbulas Pulverisette® 1 da marca Fritsch (Figura 3.1), ajustado para se obter a granulometria desejada. Após passar o resíduo cerca de três vezes pelo triturador, o mesmo foi peneirado na peneira 4,8mm, sendo necessário que o material passante corresponda ao mínimo de 95% do peso do material para ser considerado areia.



Figura 3.1 – Triturador de mandíbulas utilizado.

Após essa etapa a EFS foi peneirada segundo a série normal de peneiras, que abrange as seguintes aberturas de malhas, em milímetros: 2,4 - 1,2 - 0,6 - 0,3 - 0,15 e as porções retidas nas aberturas das quatro últimas frações granulométricas foram selecionadas e armazenadas para compor, com 25% em peso cada, a EFS padrão. Nessa fase foi utilizado um peneirador mecânico mostrado na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Peneirador mecânico.

3.2.2. Caracterização química da EFS

A caracterização química das matérias-primas foi realizada no LECIV, por espectroscopia por fluorescência de raios X em um equipamento Shimadzu EDX-700 (Figura 3.3). As amostras foram passadas na peneira de abertura 0,075 mm (#200). Este equipamento possui a limitação de não ser capaz de quantificar elementos com peso atômico menor que o sódio.



Figura 3.3 – Equipamento Shimadzu EDX-700

3.2.3. Caracterização física da EFS

Na caracterização física foram determinadas a massa unitária no estado solto (NBR 7251, 1982) e a massa específica por meio do Frasco de Chapman (NBR 9776, 1987). A massa unitária é a massa de unidade de volume, incluindo neste os vazios, permeáveis e impermeáveis, contidos nos grãos. A massa específica real dos grãos é a massa da unidade de volume, excluindo destes os vazios permeáveis e aqueles entre os grãos.

3.2.4. Caracterização mineralógica da EFS

Para identificação da composição mineralógica do material, foi utilizada a técnica de difração de raios X (DRX), a qual foi realizada no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), em um difratômetro SIEMENS modelo D5000 com radiação $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$

operando a 40 kV e 110 mA. Os compostos foram identificados por meio de programas-biblioteca de padrões.

3.2.5. Caracterização ambiental da EFS

A caracterização ambiental foi obtida seguindo as recomendações da NBR 10004 (1987) que classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que esses resíduos possam ter manuseio e destinação adequados. A caracterização dos resíduos por esta norma utiliza como parâmetros os ensaios de lixiviação (NBR 10005, 1987) e solubilização de resíduos (NBR 10006, 1987).

A amostra de EFS foi submetida a esses ensaios pela equipe do Laboratório de Meio Ambiente (LABMA) do Instituto Nacional de Tecnologia (INT). Em seguida à lixiviação e solubilização, os extratos de amostra obtidos foram submetidos a uma análise química realizada pelo Laboratório de Análises Inorgânicas (LABAI) também do Instituto Nacional de Tecnologia (INT), visando verificar sua composição e quantificar os elementos presentes, de modo a verificar se os mesmos se enquadram aos limites máximos permitidos pela NBR 10004 (1987).

Por essa norma, os resíduos podem ser classificados em: resíduos classe I (perigosos); resíduos classe II (não-inertes) e resíduos classe III (inertes). Perigosos são os que apresentam periculosidade quanto à origem ou possuem características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade e patogenicidade; inertes apresentam combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água; não-inertes são os que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou classe III.

3.2.6. Caracterização das argamassas de múltiplo uso

3.2.6.1. Índice de consistência padrão

A proporção de material adotada para confecção das argamassas foi, em peso, de uma parte de cimento para três de agregado miúdo. A quantidade de água foi

definida de acordo com a consistência em mesa de abatimento (*flow table*), conforme NBR 13276 (1995). Esta norma prescreve o método de determinação do teor de água no preparo de argamassas para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e tetos, para obtenção do índice de consistência padrão a ser utilizado na realização de ensaios necessários à caracterização do material.

Como parâmetro de controle, a norma fixa para todas as argamassas a consistência em 255 ± 10 mm de diâmetro na mesa de abatimento. Essa faixa garante uma boa trabalhabilidade e facilidade de aplicação da argamassa em situações reais. A Figura 3.4 ilustra o procedimento de realização desse ensaio.

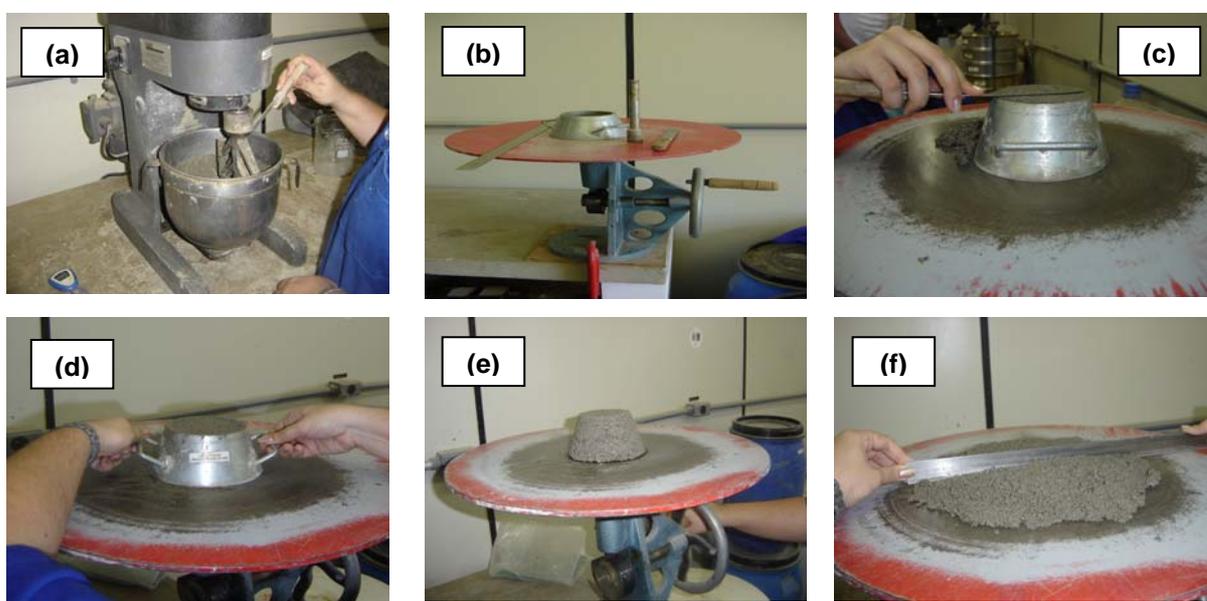


Figura 3.4 – Procedimento de ensaio para a obtenção do índice de consistência padrão: (a) preparação da argamassa; (b) equipamentos utilizados no ensaio; (c) rasamento após o preenchimento do corpo-de-prova; (d) momento da retirada do corpo-de-prova; (e) corpo-de-prova desmoldado; (f) medição do espalhamento na mesa de consistência após aplicação dos movimentos.

3.2.6.2. Densidade de massa

A densidade de massa quantifica, segundo a NBR 13278 (1995), a massa específica da argamassa no estado fresco. A realização deste ensaio corresponde a uma parte do procedimento para a obtenção do teor de ar incorporado de uma argamassa.

Preenche-se com argamassa, preparada de acordo com a NBR 13276 (1995), um recipiente cilíndrico calibrado de PVC (Figura 3.5a), compactando-a; formando três camadas com 20 golpes cada, correspondendo à entrada e à saída da espátula na posição vertical (Figura 3.5b), sendo a última camada complementada com 5 golpes de soquete (Figura 3.5c); a seguir determina-se a massa contida no recipiente (figura 3.5d). Assim obtém-se a densidade de massa, dividindo esta pelo volume do recipiente cilíndrico.



Figura 3.5 – Procedimento do ensaio de densidade de massa e de teor de ar incorporado: (a) equipamentos utilizados no ensaio; (b) compactação com a espátula; (c) compactação com soquete; (d) medição da massa no recipiente.

3.2.6.3. Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado é a quantidade de ar aprisionado na argamassa fresca, parâmetro que influencia diretamente a densidade de massa relativa da argamassa nos estados fresco e endurecido, pois o ar possui densidade menor que a argamassa e ocupa uma fração da sua massa.

Essa propriedade é determinada através do procedimento de ensaio prescrito pela NBR 13278 (1995). A determinação é indireta, calculada pela relação entre a densidade de massa no estado fresco e a densidade de massa teórica, medida em um recipiente de volume conhecido como mostrado na Figura 3.5. Esta relação representa o volume de sólidos de argamassa, sendo o complemento para a unidade de massa o volume de vazios correspondente ao teor de ar. O resultado é expresso em porcentagem. Quanto maior a densidade de massa ou menor o teor de ar incorporado, mais compacta a argamassa será.

A NBR 13281 (2001) classifica como argamassa tipo *a* aquelas com teor de ar incorporado abaixo de 8%, tipo *b* com teor de ar incorporado entre 8% e 18% e tipo *c* acima de 18%.

3.2.6.4. Capacidade de retenção de água

Indica a capacidade da argamassa de reter a água de amassamento, possibilitando uma melhora nas reações de hidratação do cimento, diminuindo os vazios internos e atenuando a retração por secagem. O princípio da determinação da retenção de água pela NBR 13277 (1995) visa quantificar a água absorvida em papel-filtro colocado sobre a argamassa fresca, sob uma dada pressão, comprimida por um peso sobre o papel (Figura 3.6). A argamassa é preparada de acordo com a NBR 13276 (1995).

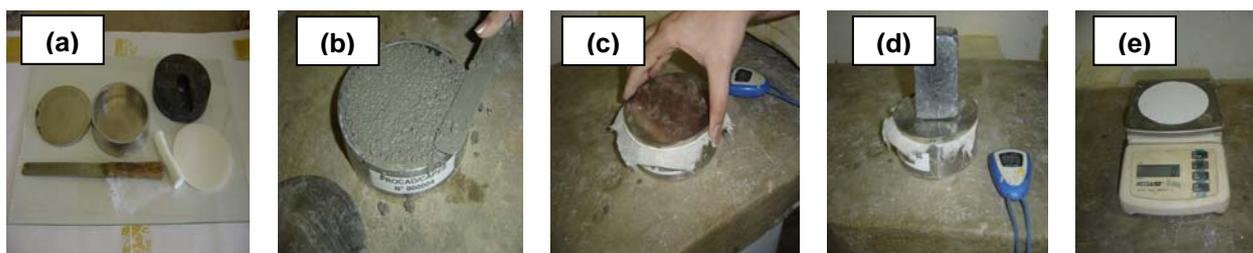


Figura 3.6 – Ensaio de capacidade de retenção de água em argamassas: (a) equipamentos utilizados no ensaio; (b) corpo-de-prova sendo preenchido com argamassa; (c) colocação do papel-filtro, gaze e placa metálica; (d) colocação do peso; (e) pesagem do papel-filtro após o ensaio.

A NBR 13281 (2001) classifica como argamassa com capacidade de retenção de água normal a que apresenta porcentagem de retenção de água entre 80 e 90% e com capacidade de retenção de água alta a que apresenta porcentagem de retenção de água maior que 90%.

3.2.6.5. Densidade de massa aparente

Esse ensaio é regido pela NBR 13280 (1995) e determina a densidade de massa aparente de argamassas no estado endurecido. Foram utilizados quatro corpos-de-prova (Figura 3.7) preparados e curados conforme a NBR 13279 (1995), totalizando 16 corpos-de-prova neste ensaio. Após a cura, os mesmos foram colocados em uma

estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$, até que a massa ficasse constante. Após a medição de suas dimensões e pesagem de sua massa, foi calculada a densidade de massa aparente endurecida dos corpos-de-prova.



Figura 3.7 – Corpos-de-prova utilizados para a determinação da densidade de massa aparente.

3.2.6.6. Evolução da resistência à compressão

Nakakura e Cincotto (2004) afirmam que a resistência à compressão é a característica mais comumente determinada tanto para argamassa de assentamento como para argamassa de revestimento. Entende-se que esta propriedade, importante para o controle de produção do cimento e adotada para a argamassa, verifica a uniformidade de produção.

A resistência à compressão está relacionada à capacidade que a argamassa tem de resistir a esforços de compressão, decorrentes de cargas estáticas ou dinâmicas atuantes nas edificações, ou decorrentes de efeitos das condições ambientais. Os ensaios de resistência à compressão seguiram as prescrições da NBR 13279 (1995). As argamassas devem possuir resistência mecânica compatível com os esforços a que serão solicitadas. Em argamassas de assentamento para alvenarias estruturais, a resistência à compressão é uma propriedade fundamental.

A fim de verificar a evolução de resistência das argamassas, foram moldados quatro corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm para cada idade e tipo de argamassa, sendo ao fim do ensaio confeccionados 112 corpos-de-prova. Estes foram rompidos por compressão axial nas idades de 1, 3, 7, 28, 90 e 120 dias, numa prensa hidráulica Versa Tester, situada no LECIV, com capacidade de carga de 250

kN e taxa de carregamento de 0,5 MPa/s (Figura 3.8). A resistência à compressão em MPa é obtida pela divisão da carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova.



Figura 3.8 – Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão.

A NBR 13281 (2001) também classifica as argamassas de acordo com a resistência à compressão, como mostra a Tabela 3.2 a seguir.

Tabela 3.2 – Classificação das argamassas segundo a resistência à compressão (NBR 13281, 2001).

Identificação	Limites (MPa)
Tipo I	$\geq 0,1$ e $< 4,0$
Tipo II	$\geq 4,0$ e $\leq 8,0$
Tipo III	$> 8,0$

3.2.6.7. Evolução da resistência à tração por compressão diametral

De acordo com Dias *et al.* (2006), esta propriedade de resistência à tração por compressão diametral é de grande relevância na avaliação de argamassas de revestimentos, pois as mesmas devem suportar esforços no sentido de evitar a fissuração do revestimento.

A determinação da resistência à tração por compressão diametral seguiu as prescrições da NBR 7222 (1983), que regulamenta o método. Os corpos-de-prova foram cilíndricos de 50 mm x 100 mm, quatro por idade, moldados conforme NBR

7215 (1996) e rompidos nas idades de 3, 7, 28, 90 e 120 dias sob velocidade constante de 0,25 MPa/s. Neste ensaio, foram fabricados 96 corpos-de-prova e estes foram rompidos na posição horizontal entre os pratos da prensa (Figura 3.9), mesma aparelhagem definida na realização dos ensaios de resistência à compressão de argamassas.

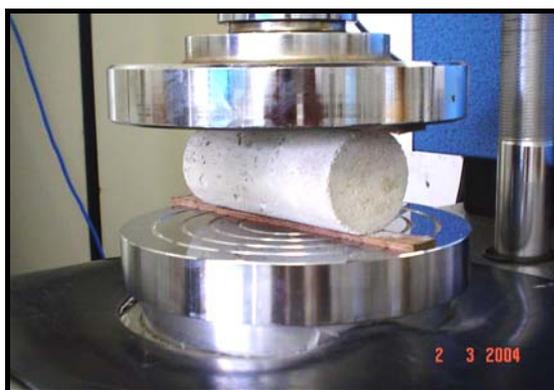


Figura 3.9 – Posição de rompimento dos corpos-de-prova para determinação da resistência à tração por compressão diametral (Afonso, 2005).

3.2.6.8. Evolução da resistência de aderência

Foi utilizado o procedimento da NBR 13528 (1995), que prescreve o método para a determinação da resistência de aderência à tração de revestimentos de paredes e tetos. A superfície sobre a qual foi aplicada a argamassa era composta por alvenaria que simulava uma parede (Figura 3.10), onde foram obtidos seis corpos-de-prova por idade, distantes entre si em 50 mm. Os corpos-de-prova tinham seção circular de 50 mm de diâmetro e foram extraídos com auxílio de uma serra-copo.



Figura 3.10 – Superfície utilizada no ensaio de resistência de aderência.

Nesse ensaio, pastilhas metálicas circulares são coladas aos corpos-de-prova por meio de adesivo epóxi, e ligadas diretamente ao equipamento de tração. A Figura 3.11 ilustra os furos e as pastilhas coladas, e em seguida o arrancamento com aparelho de tração utilizado neste ensaio de aderência. A resistência de aderência à tração é calculada dividindo a carga de ruptura pela área da pastilha.



Figura 3.11 – Detalhe dos corpos-de-prova sendo submetidos ao ensaio de aderência.

Os ensaios foram realizados nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias para o acompanhamento da evolução da resistência de aderência. Os ensaios foram realizados no LECIV, com o uso de um equipamento dotado de uma célula de carga e uma unidade de leitura que expressa os valores das cargas de ruptura.

3.2.7. Análise da durabilidade das argamassas de múltiplo uso

A durabilidade é uma característica essencial para qualquer material e tem influência direta no seu desempenho e aceitação. Quando se trata de uma argamassa constituída de resíduo, faz-se necessária a avaliação da durabilidade, principalmente no que se refere à resistência a situações adversas extrínsecas. Por esta razão, foram realizados quatro tipos de ensaios de durabilidade com as argamassas confeccionadas com e sem EFS.

3.2.7.1. Absorção de água por capilaridade

A obtenção da absorção de água por capilaridade seguiu as determinações da NBR 9779 (1995) que prescreve o método para a determinação da absorção de água através da ascensão capilar. Os corpos-de-prova de argamassa de 50 mm x

100 mm foram moldados de acordo com a NBR 7215 (1996), quatro corpos-de-prova para cada traço. Após a cura em ambiente de laboratório (23°C e umidade relativa do ar de 65%), os mesmos foram pesados e, em seguida, levados para uma estufa a temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até que a massa permanecesse constante.

Posteriormente, os corpos-de-prova foram parcialmente imersos em um recipiente de modo que o nível d'água ficasse constante a $5 \pm 1\text{mm}$ acima da sua face inferior, sem que este tocasse o fundo do recipiente (Figura 3.12). Durante o ensaio, determinou-se a massa dos corpos-de-prova com 3, 6, 24, 48 e 72 horas. A absorção foi calculada dividindo o aumento da massa dos corpos-de-prova durante esses períodos de tempo pela área da seção transversal da superfície dos mesmos em contato com a água.

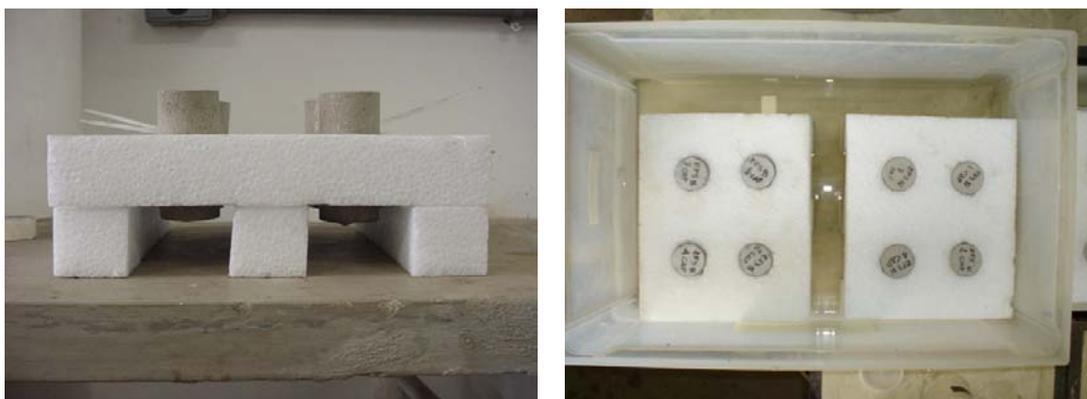


Figura 3.12 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.

3.2.7.2. Absorção de água por imersão

Para a determinação da absorção de água por imersão foi seguida a NBR 9778 (1987), que determina a absorção de água por imersão, o índice de vazios e a massa específica da argamassa endurecida. As argamassas também foram moldadas de acordo com a NBR 7215 (1996), sendo feitos quatro corpos-de-prova de 50 mm x 100 mm para cada tipo de argamassa. Foi determinada a massa dos mesmos após permanência durante 24h, 48h e 72h em estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Após esse processo, os corpos-de-prova foram mantidos com 1/3 de seu volume imerso nas primeiras 4h e 2/3 nas 4h subseqüentes, sendo completamente

imerso nas 64h restantes. Em seguida, foram determinadas as massas após 24h, 48h e 72h de imersão e calculada a absorção para estes períodos.

3.2.7.3. Lixiviação contínua

Esse ensaio foi realizado por meio de um equipamento de degradação de grandes dimensões (Figura 3.13) implementado por Salles (2006) no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da UENF. O equipamento submete corpos-de-prova de argamassas à exposição em diferentes processos de degradação, estabelecendo assim, diversos mecanismos de degradação.



Figura 3.13 – Aparelho de lixiviação contínua.

Para a previsão do comportamento do material a longo prazo, visando uma estimativa da durabilidade, faz-se necessária uma extrapolação dos resultados experimentais, obtidos a partir de ensaios em corpos-de-prova com degradação induzida de forma acelerada no laboratório.

No entanto, as condições de degradação no laboratório não são idênticas às condições de campo. Todavia, alguns procedimentos de degradação no laboratório podem ser representativos das condições de degradação no campo. Destaca-se que um dos ensaios mais representativo das condições de degradação natural é, provavelmente, o ensaio de lixiviação contínua (Cunha Pinto, 2006).

O equipamento é constituído basicamente por uma câmara de degradação, dois sistemas independentes de lixiviação e um sistema de controle. No equipamento, os corpos-de-prova foram submetidos à variação de temperatura e umidade através de dois processos de lixiviação com água destilada e seguida secagem parcial. Nesta pesquisa, foi utilizada a temperatura máxima igual a 75°C e mínima igual a 35°C, para os reservatórios A e B (Figura 3.14a), respectivamente.

A lixiviação dos corpos-de-prova foi feita por meio de circulação d'água dos reservatórios inferiores para a câmara de degradação através de bombas centrífugas (Figura 3.14b) localizadas na parte inferior dos reservatórios d'água, que lançavam a água de lixiviação para conjuntos de aspersores (Figura 3.14c) localizados no topo da câmara de degradação. Os aspersores provocam a lavagem homogênea e contínua sem concentração de jatos d'água nos corpos-de-prova.

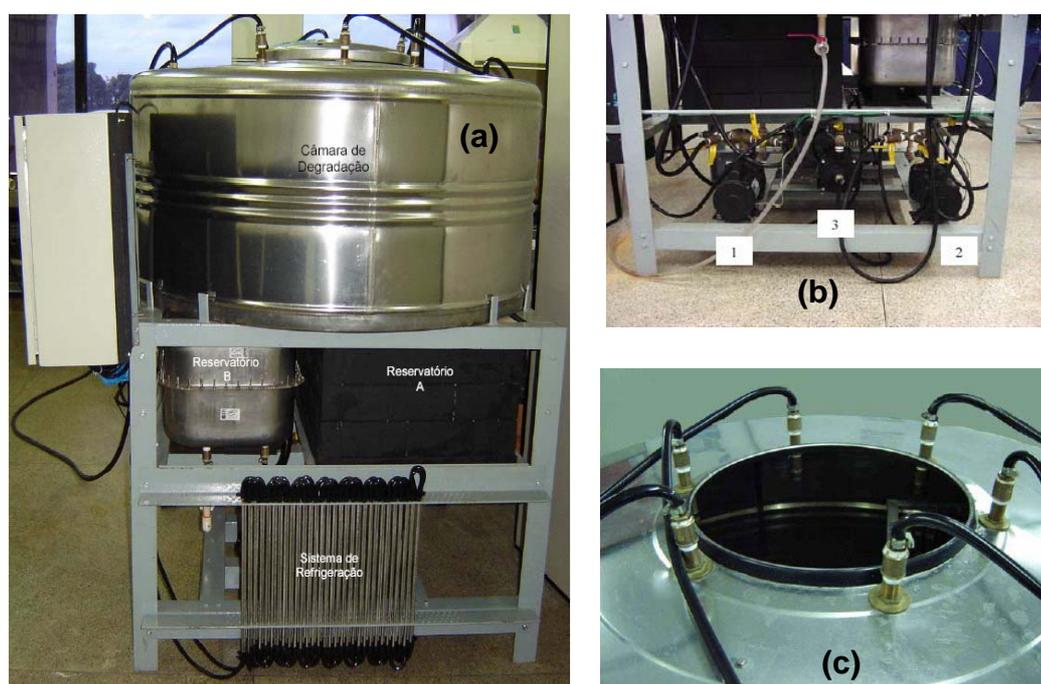


Figura 3.14 – Detalhes do aparelho de lixiviação contínua. (a) vista lateral do equipamento com: câmara de degradação, reservatórios e sistema de refrigeração; (b) sistemas de bombas; (c) aspersores dos sistemas de lixiviação no topo da câmara de degradação (Salles, 2006).

Ocorrem basicamente dois processos de degradação no equipamento: o 1.º processo de degradação corresponde à lixiviação e secagem parcial utilizando água quente do reservatório A; o 2.º processo de degradação refere-se à lixiviação e secagem parcial utilizando a água perto da temperatura ambiente do reservatório B. A duração de cada processo é de uma hora, sendo alternados 15 minutos de lixiviação e 15 minutos de secagem parcial.

Para as argamassas estudadas, foram escolhidos três ciclos de degradação: 300, 750 e 1500 horas cada. Não existe nenhuma referência quanto ao uso desse equipamento para lixiviação de argamassas; portanto, esse ensaio teve caráter experimental buscando-se períodos ideais com ciclos onde o material se degradasse. Foram submetidas a esse ensaio três tipos de argamassas com diferentes agregados (Areia Natural, EFS Semi-Básica e EFS Básica) estudados neste trabalho. Para este ensaio não foi produzida argamassas com EFS A devido à quantidade escassa da mesma.

Após os ciclos de lixiviação, foram analisadas as mudanças na resistência à compressão e na resistência à tração por compressão diametral segundo as metodologias já expostas nos itens 3.2.6.6 e 3.2.6.7. Para cada ensaio, foram moldados, conforme NBR 7215 (1996), cinco corpos-de-prova de 50 mm x 100 mm de cada um dos traços, totalizando 90 corpos-de-prova para esse ensaio.

3.2.7.4. Ciclagem água-estufa

O ensaio de ciclagem objetivou simular o comportamento das argamassas submetidas a situações de mudanças severas de umidade e temperatura através de ciclos de molhagem e secagem. O ensaio seguiu a metodologia usada por Afonso (2005), que consiste em efetuar ciclos onde a argamassa é imersa em água durante um período de 17 horas a uma temperatura de 23°C e na seqüência colocada em estufa, a uma temperatura de 70°C, durante 30 horas.

Entre o período de permanência em estufa e imersão em água (Figura 3.15), os corpos-de-prova eram resfriados em temperatura ambiente de laboratório (23°C e umidade relativa do ar de 65%) durante 1 hora. Os corpos-de-prova foram curados

em ambiente de laboratório (LECIV) durante 28 dias e submetidos à ciclagem por mesmo período.



Figura 3.15 – Corpos-de-prova durante o ensaio de ciclagem água-estufa.

Após esse processo, avaliou-se a resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova segundo as metodologias já expostas nos itens 3.2.6.6 e 3.2.6.7. Foram confeccionados quatro corpos-de-prova de 50 mm x 100 mm para cada tipo de argamassa (com Areia Natural, EFS Ácida, EFS Semi-Básica e EFS Básica) no ensaio resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral, totalizando 32 corpos-de-prova nesse ensaio.

3.2.8. Análise microestrutural das argamassas de múltiplo uso

O principal objetivo da realização da análise microestrutural foi observar a interação entre a matriz cimentícia e os agregados (areia natural e EFS), além da verificação de alguma anormalidade nas argamassas após o ensaio de durabilidade água-estufa.

As análises microestruturais foram realizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com imagens de elétrons secundários no Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME) do Instituto Militar de Engenharia (IME/RJ). O equipamento empregado foi um microscópio eletrônico de varredura de baixo vácuo (MEV JSM 5800-LV) da marca JEOL. O feixe de elétrons foi gerado a partir de um filamento de tungstênio e a tensão variou entre 10 e 25 kV. A distância de trabalho variou entre 20 e 35 mm. As amostras foram secas em estufa a uma temperatura de

110°C por um período de 24 horas e submetidas a uma deposição metálica antes do ensaio.



Figura 3.16 – Microscópio Eletrônico de Varredura (JEOL JSM – 5800 LV).

3.2.9. Argamassas com os três tipos de EFS

Um dos objetivos de um estudo envolvendo a reciclagem é a otimização da reutilização do resíduo buscando maneiras de melhor aproveitá-lo. No caso da EFS, que possui três tipos é interessante comprovar se as argamassas sofrem algum tipo de mudança se utilizados os três tipos, simultaneamente, simulando uma situação onde não haveria controle para a separação entre as escórias.

Para simular essa situação, foi desenvolvida uma argamassa utilizando como agregado miúdo 1/3 em massa de cada EFS. Foi analisado se a mesma iria apresentar alguma diferença significativa em relação aos traços com somente um tipo de EFS.

Foi avaliada a evolução de resistência à compressão dessa argamassa, pois este parâmetro pode indicar sua qualidade e se existe a obrigação de não se misturar as EFS originadas de fluxos distintos. Foram moldados quatro corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm, de acordo com a NBR 7215 (1996), para o ensaio de resistência à compressão axial nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. Para simplificar a discussão foi adotada a seguinte nomenclatura para as EFS:

EFS Ácida:	EFS A
EFS Semi-Básica:	EFS SB
EFS Básica:	EFS B
Mistura das três EFS:	EFS M

4.1. Beneficiamento das EFS

O beneficiamento das EFS foi realizado por meio do uso um britador de mandíbulas e as escórias apresentaram distribuição granulométrica satisfatória após esse processo (Figura 4.1), demonstrando, assim, a eficiência do processo de transformação das escórias em agregado miúdo, ou seja, mais de 98% do material passando pela peneira de máximo diâmetro nominal igual a 4,8 mm, valor esse que define agregado miúdo.

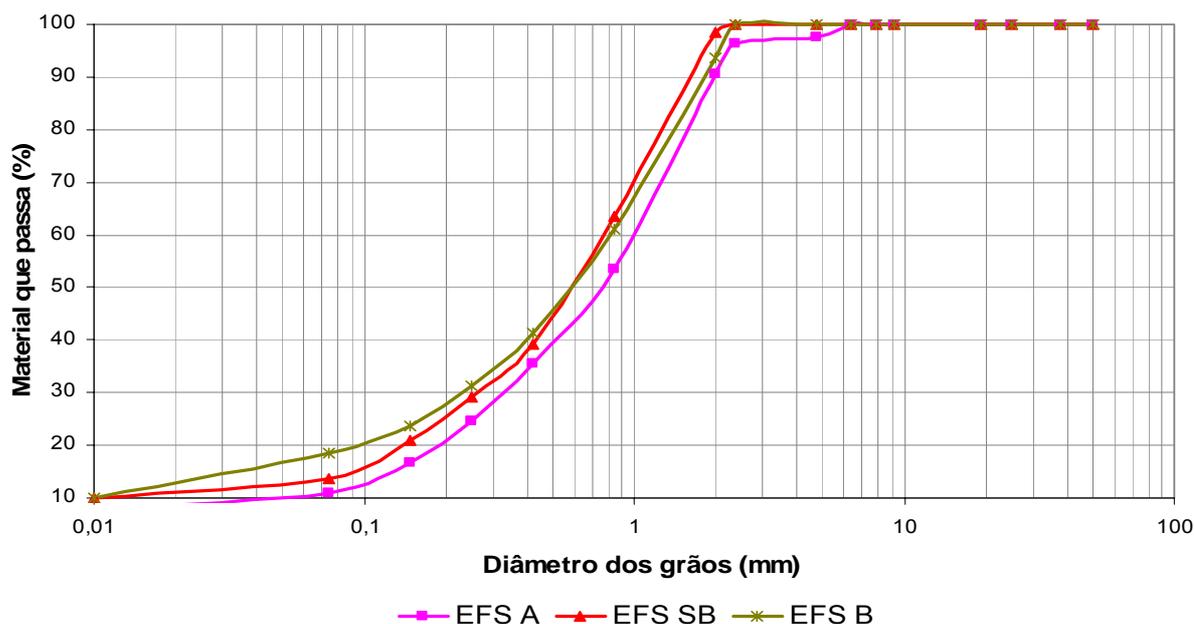


Figura 4.1 – Distribuição granulométrica das EFS.

É possível observar que as três EFS apresentaram distribuições granulométricas similares e contínuas. A granulometria contínua do agregado miúdo em uma argamassa é importante, pois diminui sua permeabilidade e melhora sua trabalhabilidade. Também aumenta a resistência mecânica e a aderência com o substrato, e diminui a retração por secagem da mesma.

A etapa seguinte procurou adequar a distribuição granulométrica das EFS à distribuição da Areia Normal Brasileira (NBR 7214, 1982) através da separação em frações (Figura 4.2) de escória retidas nas malhas das peneiras 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm, com a utilização de 25% em massa de cada fração na confecção das argamassas.

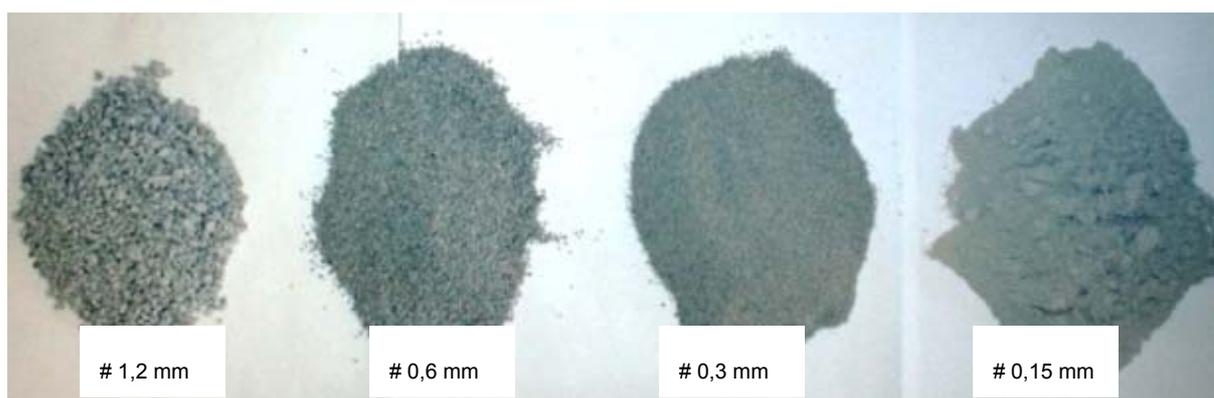


Figura 4.2 – Frações granulométricas da EFS Normal.

Tanto para a areia como para as EFS, a fração 0,15 mm foi a de maior dificuldade de obtenção e a fração 1,2 mm foi a mais facilmente obtida. Em função disso, foi necessário retornar com essa fração para o triturador para se conseguir maior quantidade das frações de menor diâmetro. Provavelmente, se fosse utilizado um britador com maior poder de diminuição, como britadores industriais, isso não ocorreria.

4.2. Caracterização química das EFS

Uma das principais preocupações quando se trata de um agregado a ser utilizado em misturas cimentícias é a sua composição química. O agregado deve se manter

estável perante os componentes da mistura (cimento e água). Se esse agregado possuir componentes que reagem negativamente, durante ou após a mistura e o endurecimento das argamassas, a durabilidade destas estará comprometida, já que essas reações podem gerar expansões capazes de fissurar a argamassa. Esse fenômeno químico pode ocorrer devido a presença de minerais potencialmente reativos (óxidos livres) nos agregados, que reagem com álcalis presentes no cimento e/ou com a água da mistura.

Na Tabela 4.1 estão os resultados da caracterização química da EFS A, EFS SB e EFS B. O aparelho no qual foi realizado esse ensaio não era capacitado para quantificar elementos com baixo peso atômico (igual ou inferior ao sódio), o que pode ter afetado o resultado, pois é sabido que os fluxos que originam as EFS possuem quantidades consideráveis de flúor e lítio, os quais não foram quantificados. Deste modo, suas porcentagens foram distribuídas pelo próprio *software* do equipamento, que efetua uma correção composicional para que o somatório dos óxidos encontrados na análise seja igual a 100%. Isso pode explicar a grande porcentagem de Al_2O_3 , CaO , SiO_2 e MgO nas EFS, elementos não esperados em quantidades tão elevadas.

Tabela 4.1 – Caracterização química das EFS.

Óxidos (%)	EFS A	EFS SB	EFS B
Al_2O_3	29,64	28,14	13,87
CaO	15,37	20,11	42,13
SiO_2	23,10	15,64	14,36
MgO	11,77	15,23	23,77
MnO	11,83	9,64	1,42
Fe_2O_3	4,10	4,09	1,16
P_2O_5	—	1,87	—
SO_3	1,43	1,81	0,84
TiO_2	2,16	1,61	0,12
K_2O	0,33	0,94	2,33
Outros	0,27	0,92	0,01

Com base nas composições químicas apresentadas nessa tabela, pode-se observar

que, mesmo de naturezas distintas, as EFS contêm óxidos em comum, mas em proporções diferentes, tais como Al_2O_3 , CaO , SiO_2 , MgO , MnO e Fe_2O_3 , que também fazem parte da constituição do cimento Portland. O óxido mais deletério é o MgO (periclase) que se estiver na forma livre, não combinado, pode formar brucita [$\text{Mg}(\text{OH})_2$] devido a sua reação lenta com a água, ocasionando expansão destrutiva na argamassa endurecida.

Segundo Masuero *et al.* (2004), não são todas as formas de óxido do magnésio que são prejudiciais, mas sim aquelas em que ele se encontra não combinado ou sob a forma livre, conhecida como periclásio livre. Esta, após hidratação, reage formando $\text{Mg}(\text{OH})_2$, denominada de brucita, que causa expansão do volume da pasta. Entre as combinações de MgO não prejudiciais estão: olivina (M_2S), merwinita (C_3MS), diopsido (CMS_2), monticelita (CMS) e espinélio (MA).

Do mesmo modo, a presença de sílica amorfa pode causar na argamassa a reação álcali-sílica, reação química da sílica reativa contida nos agregados com hidróxidos alcalinos resultantes da hidratação do cimento, a qual forma um gel altamente instável. Este gel álcali-sílica absorve água e se expande dentro da pasta, causando fissuras.

Além disso, vê-se que o álcali presente (K_2O) nos três tipos de escórias não chega a 5% da composição das mesmas, limite considerado aceitável; e o teor de pentóxido de fósforo (P_2O_5), óxido que pode proporcionar um aumento do tempo de pega, também fica abaixo dos 5% estabelecidos.

A EFS A é composta quimicamente por concentrações elevadas de Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , MnO e MgO , o que confirma sua classificação ácida devido à presença de óxidos ácidos, em especial SiO_2 e MnO , e menor quantidade de CaO em relação às outras EFS. A EFS SB também é constituída principalmente por estes compostos: Al_2O_3 , CaO , SiO_2 , MgO e MnO .

A EFS B tem grande quantidade de CaO e MgO , óxidos básicos que confirmam sua classificação segundo o fabricante. Estes óxidos, se estiverem sob a forma livre, são

os principais responsáveis pela expansividade de escórias em geral (aciaria, alto-forno etc.), causando fissuração e queda de resistência mecânica das argamassas fabricadas com esse material. Essas reações são mais lentas e afetam a durabilidade das argamassas.

4.3. Caracterização física das EFS

A EFS A tem massa específica real de $3,36 \text{ g/cm}^3$ e massa unitária de $2,65 \text{ g/cm}^3$; a EFS SB $3,38 \text{ g/cm}^3$ e $2,74 \text{ g/cm}^3$; e a EFS B $3,26 \text{ g/cm}^3$ e $2,67 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Esses resultados demonstram que praticamente não há diferença entre as massas real e unitária das EFS, e que elas são cerca de 30% mais pesadas que a areia natural.

Este resultado é positivo, pois significa que, provavelmente, as argamassas com EFS serão mais densas e compactadas que às com areia natural e, conseqüentemente, resistirão mais a esforços mecânicos.

4.4. Caracterização mineralógica das EFS

A análise por difração de raios X (DRX) possibilitou a identificação das fases cristalinas das EFS. Na EFS A (Figura 4.3), foi possível identificar picos de espinélio (MgAl_2O_4), que evidencia que o MgO encontra-se combinado com a alumina e, portanto, não prejudicará a durabilidade da argamassa. O espinélio possui propriedade refratária com grande resistência à fissuração, e costuma melhorar também as resistências mecânica, à fluência, à corrosão e ao choque térmico em argamassas.

Na EFS SB (Figura 4.4), verificou-se a presença de picos característicos de fluorita (CaF_2), de periclase (MgO) e de espinélio (MgAl_2O_4). O flúor não foi detectado na caracterização química da EFS SB, mas foi informado pelo fabricante. Sua presença quando combinado com CaO forma a fluorita, composto que aumenta a resistência inicial da argamassa. Nesta EFS, o MgO novamente se apresenta na forma de espinélio não sendo prejudicial à argamassa.

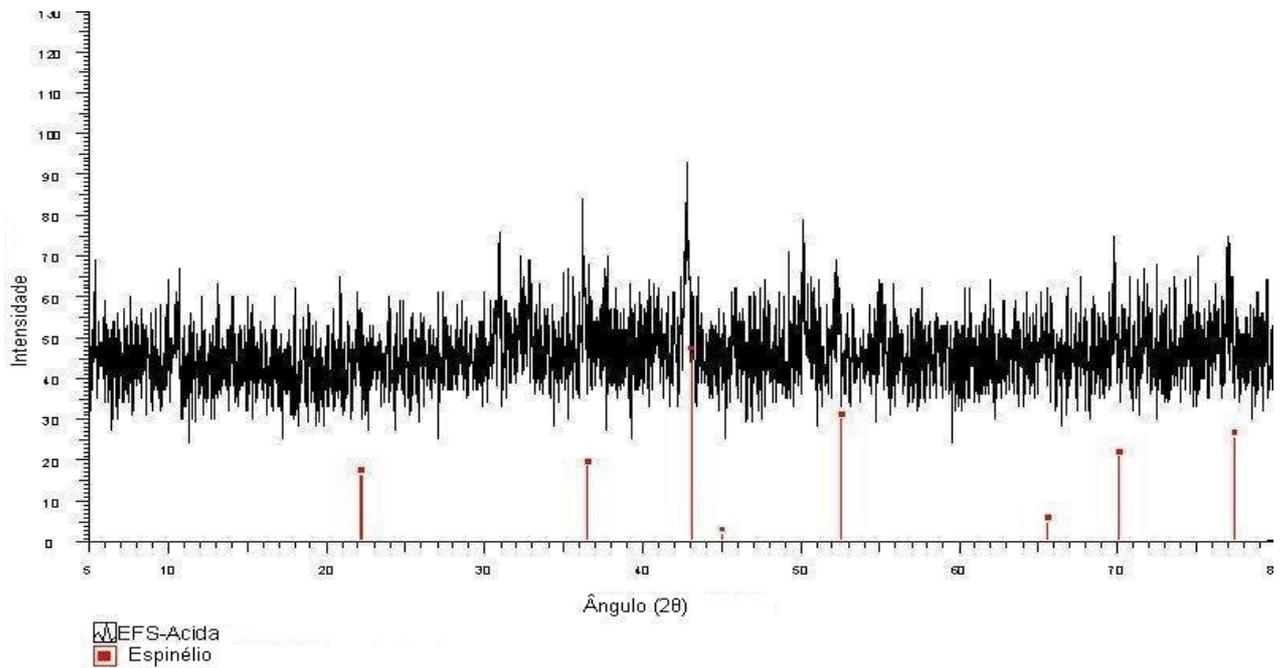


Figura 4.3 – Difratoograma da EFS A.

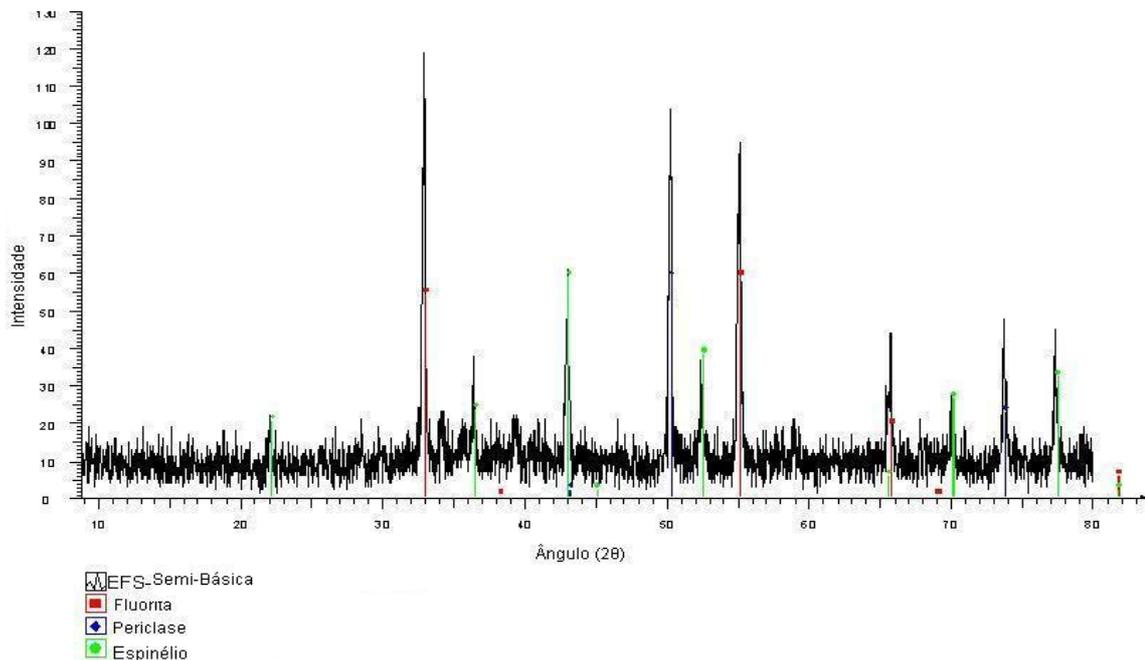


Figura 4.4 – Difratoograma da EFS SB.

Na EFS B (Figura 4.5), ocorrem picos característicos de calcita (CaCO_3) e portlandita [Ca(OH)_2]. É comum nas argamassas a presença de portlandita (hidróxido de cálcio) e calcita (carbonato de cálcio), produtos da hidratação e da carbonatação do C_3S e C_2S .

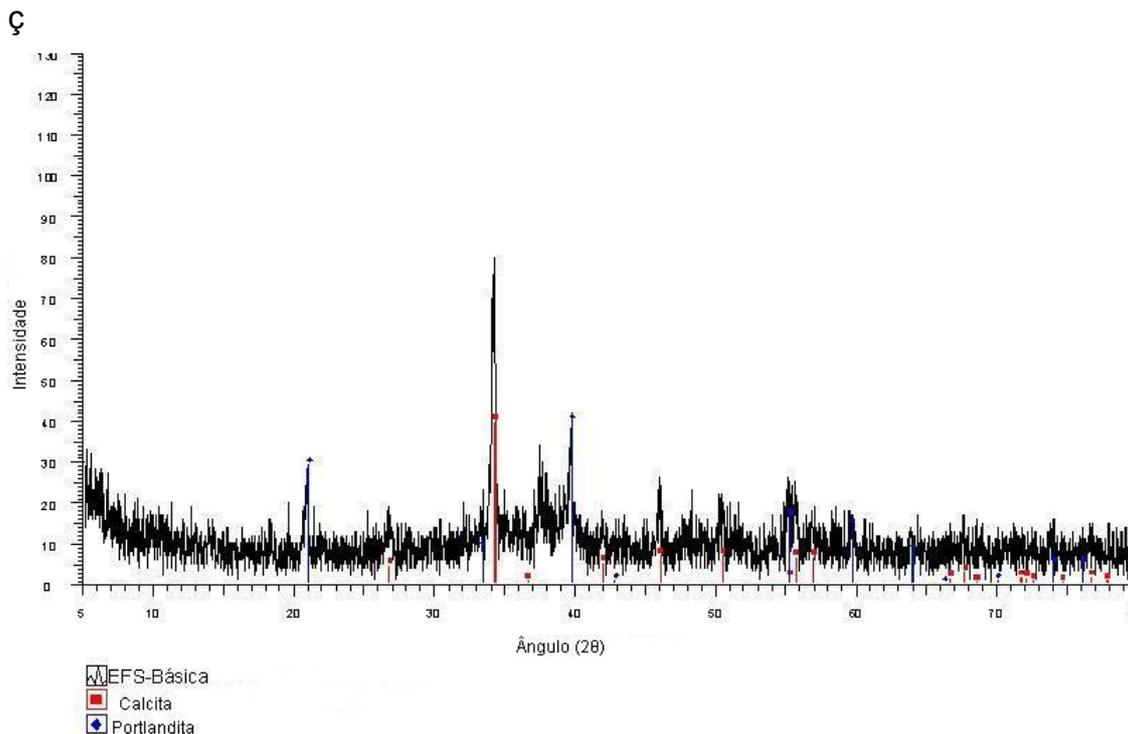


Figura 4.5 – Difratograma da EFS B.

Esse processo de ataque por agentes agressivos com sulfatos e ácidos pode acarretar a lixiviação do hidróxido de cálcio, sua difusão contínua para a superfície da argamassa aumenta a porosidade desta, diminui sua resistência e abre caminho para agentes agressivos. A formação destes sais na superfície, com o envelhecimento precoce da estrutura, é chamada de carbonatação por eflorescência. Mas há casos em que a carbonatação é benéfica; quando os poros são pequenos, o carbonato de cálcio é bloqueado e serve de escudo contra um ataque ou decomposição. Em todo caso, estes processos (hidratação e carbonatação) tornam a EFS B estável, evitando-se, assim, a expansividade comum em certas escórias com alto teor de CaO.

4.5. Caracterização ambiental do resíduo

As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os resultados dos ensaios de lixiviação (NBR 10005, 1987) e de solubilização de resíduos (NBR 10006, 1987). Segundo a NBR 10004 (1987), os resíduos são classificados em: classe I (perigosos); classe II (não-inertes) e classe III (inertes), de acordo com algumas características que possuem.

Nenhuma das EFS apresenta periculosidade; inflamabilidade; corrosividade; reatividade; patogenidade e toxicidade; pois, como mostra a Tabela 4.2, o extrato do lixiviado não contém nenhum poluente em concentração superior aos valores limitados pela NBR 10004 (1987). Desta forma, as EFS não se enquadram como resíduo perigoso.

Tabela 4.2 – Resultados do ensaio de lixiviação.

Poluente	Resultado do extrato do lixiviado (mg/L)	Limite máximo no lixiviado (mg/L) segundo NBR 10004 (1997)
Arsênio	N.D.	5,0
Bário	N.D.	100,0
Cádmio	N.D.	0,5
Chumbo	N.D.	5,0
Cromo Total	0,08	5,0
Fluoreto	N.D.	150,0
Mercúrio	< 0,0001	0,1
Prata	N.D.	5,0
Selênio	N.D.	1,0

N.D.= não detectado

Já o resultado do ensaio de solubilização (Tabela 4.3), que classifica os resíduos inertes (classe III) em função da potabilidade da água da concentração solubilizada de constituintes do resíduo, segundo a NBR 10004 (1987), mostrou teores de cromo total e de alumínio superiores ao limite máximo prescrito, sendo, portando, a EFS um resíduo **classe II** (não-inerte).

4.6. Caracterização das argamassas de múltiplo uso

4.6.1. Índice de consistência padrão

Os traços de argamassas foram preparados com o teor de água necessário para atingir o índice de consistência padrão de 255 ± 10 mm da NBR 13276 (1995). A Tabela 4.4 mostra o teor necessário para se alcançar este intervalo, o diâmetro de

espalhamento obtido e a relação água/cimento dos traços.

Tabela 4.3 – Resultados do ensaio de solubilização.

Poluente	Resultado do extrato solubilizado (mg/L)	Limite máximo no extrato (mg/L) segundo NBR 10004 (1997)
Arsênio	N.D.	0,05
Bário	N.D.	1,0
Cádmio	N.D.	0,005
Cianeto	N.D.	0,05
Chumbo	N.D.	0,1
Cromo Total	0,08	0,05
Fenol	N.D.	0,001
Fluoreto	N.D.	1,5
Mercúrio	< 0,0001	0,001
Nitrato (mg N/L)	N.D.	10,0
Prata	N.D.	0,05
Selênio	N.D.	0,01
Alumínio	1,8	0,2
Cloreto	37,0	250,0
Cobre	N.D.	1,0
Dureza (mgCaCO ₃ /L)	44,0	500,0
Ferro	0,28	0,3
Manganês	0,04	0,1
Sódio	161,0	200
Sulfato (mg SO ₄ /L)	< 1,0	400,0
Zinco	N.D.	5,0

N.D.= não detectado

Tabela 4.4 – Resultados obtidos na mesa de consistência.

Traço	Teor de água (%)	Diâmetro obtido (mm)
Areia 1:3:0,56	14	245
EFS A 1:3:0,52	13	260
EFS SB 1:3:0,56	14	250
EFS B 1:3:0,48	12	257

As argamassas apresentaram teores de água próximos, não havendo nenhuma diferença significativa entre as argamassas com EFS e areia natural. Destacam-se os traços com areia natural e EFS SB, que apresentaram teor de água igual e diâmetros de espalhamento bem próximos, indicando baixa variabilidade da consistência das argamassas pela substituição do agregado convencional pelo resíduo.

Quanto à argamassa com EFS B, é interessante notar a formação do traço considerado padrão (1:3:0,48) para argamassas convencionais. Pode-se concluir que a utilização das EFS pouco afetou a trabalhabilidade e a produtividade das argamassas, pois estas propriedades estão diretamente relacionadas à consistência.

Outra observação importante é que agregados com maiores massas específicas acarretam num maior consumo de cimento para a produção de argamassas e, conseqüentemente, necessitam de maior quantidade de água para se obter a consistência padrão, como mostra a Figura 4.6.

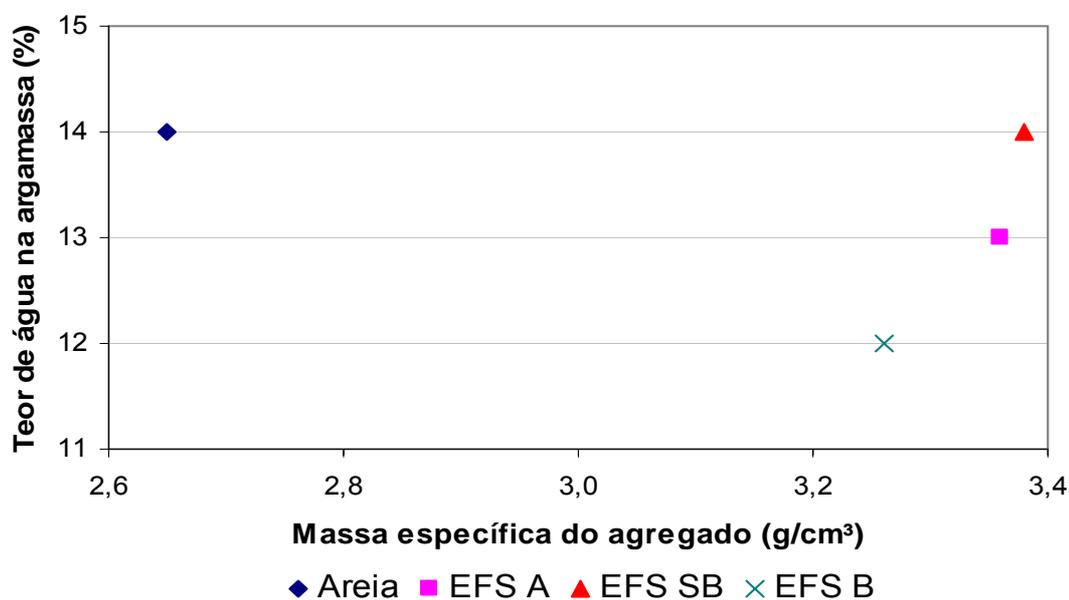


Figura 4.6 – Relação entre a massa específica do agregado e o teor de água da argamassa.

4.6.2. Densidade de massa

Este ensaio determina a densidade de massa, ou seja, a massa específica da argamassa no estado fresco. Existe uma relação direta entre a massa específica do agregado e a massa específica da argamassa fresca, como pode ser observado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Comparação entre as massas específicas dos agregados e das argamassas.

Traço	Massa específica do agregado (g/cm ³)	Massa específica da argamassa fresca (g/cm ³)
Areia 1:3:0,56	2,65	2,02
EFS A 1:3:0,52	3,36	2,41
EFS SB 1:3:0,56	3,38	2,51
EFS B 1:3:0,48	3,26	2,34

As elevadas massas específicas das EFS influenciaram a densidade de massa das argamassas, tornando-as mais pesadas do que a confeccionada com Areia Natural. Uma maior densidade da argamassa revela uma maior compactação da mesma, um menor índice de vazios e uma diminuição da quantidade de argamassa a ser empregada, o que aumenta sua produtividade.

4.6.3. Teor de ar incorporado

A comparação entre a densidade de massa e os teores de ar incorporado (NBR 13278, 1995) e a classificação segundo a NBR 13281 (1995) das argamassas estudadas são mostradas na Figura 4.7. Segundo Nakakura (2003), o teor de ar incorporado interfere diretamente em outras propriedades da argamassa como, por exemplo, a resistência à compressão e aderência.

O traço com EFS SB foi o que apresentou o menor teor de ar incorporado e alcançou a melhor classificação (*tipo a*) entre as argamassas avaliadas. Já as argamassas com EFS A e EFS B alcançaram mesma classificação da argamassa com Areia Natural (*tipo b*), demonstrando que a substituição do agregado não

prejudicou essa propriedade importante da argamassa. Ou seja, as argamassas com EFS eram mais compactas, com menos vazios e, conseqüentemente, mais resistentes mecanicamente.

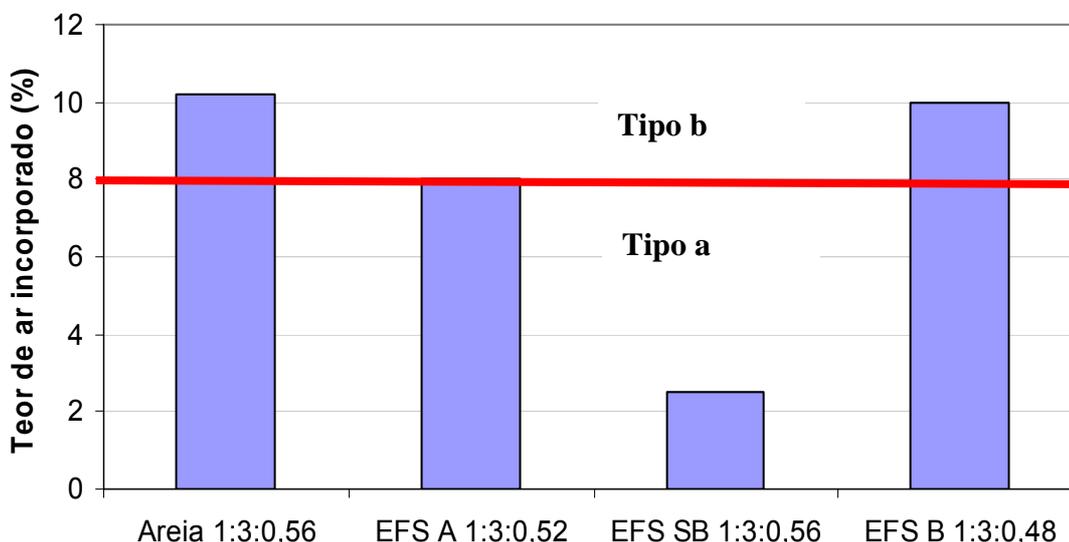


Figura 4.7 - Teores de ar incorporado e classificação segundo a NBR 13281 (1995).

Miranda (2000) constatou que à medida que decresceu o teor de água das argamassas analisadas, o teor de ar incorporado aumentou, apontando que de certa forma o preenchimento de vazios não pode ocorrer se não for acompanhado de uma maior demanda de água.

Além disso, existe uma relação direta entre a densidade de massa e o teor de ar incorporado (Figura 4.8), quanto maior a densidade da argamassa, menos vazios esta terá e menor será seu teor de ar incorporado. As argamassas confeccionadas com EFS possuem densidade de massa superior às de areia; portanto, apresentam menor teor de ar incorporado.

4.6.4. Capacidade de retenção de água

A capacidade de retenção de água (NBR 13277, 1995) é uma das características mais preocupantes em relação a uma argamassa que utiliza agregado reciclado, pois a perda de água nas argamassas de assentamento para blocos ou tijolos pode

afetar a trabalhabilidade e a resistência mecânica da mesma, além de poder levar retrações, causando fissuração e perda de aderência desta ao substrato.

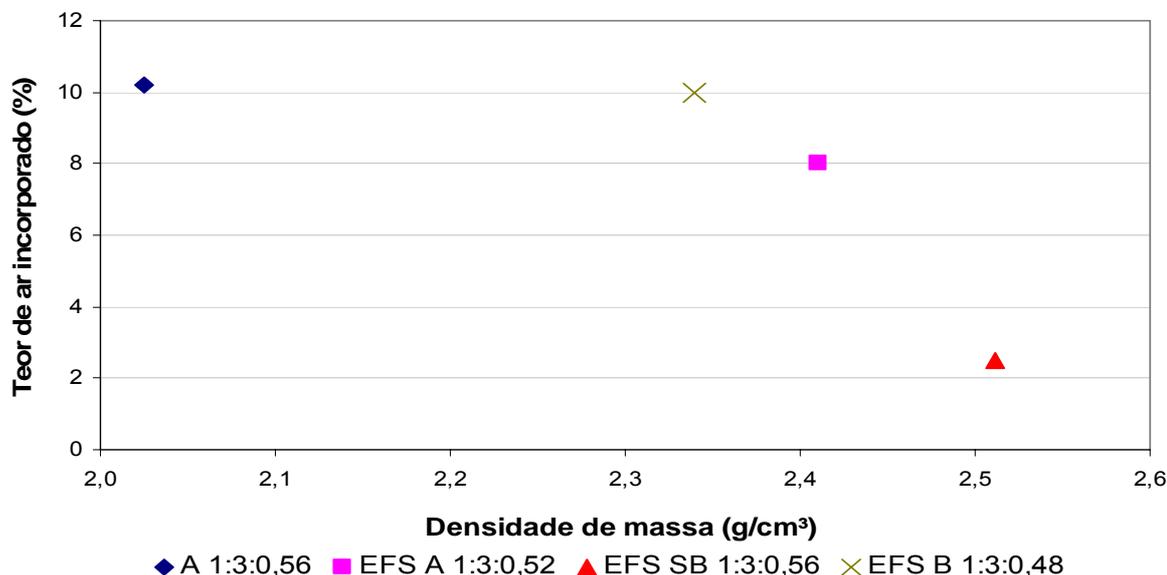


Figura 4.8 – Relação entre a densidade de massa e o teor de ar incorporado.

Na Figura 4.9 é possível observar os resultados dos ensaios de retenção de água, onde as argamassas que exigiram menor teor de água para se alcançar a consistência padrão, apresentaram as maiores retenções de água. Todas as argamassas alcançaram classificação pela NBR 13281 (2001) de possuírem no mínimo capacidade normal de retenção de água.

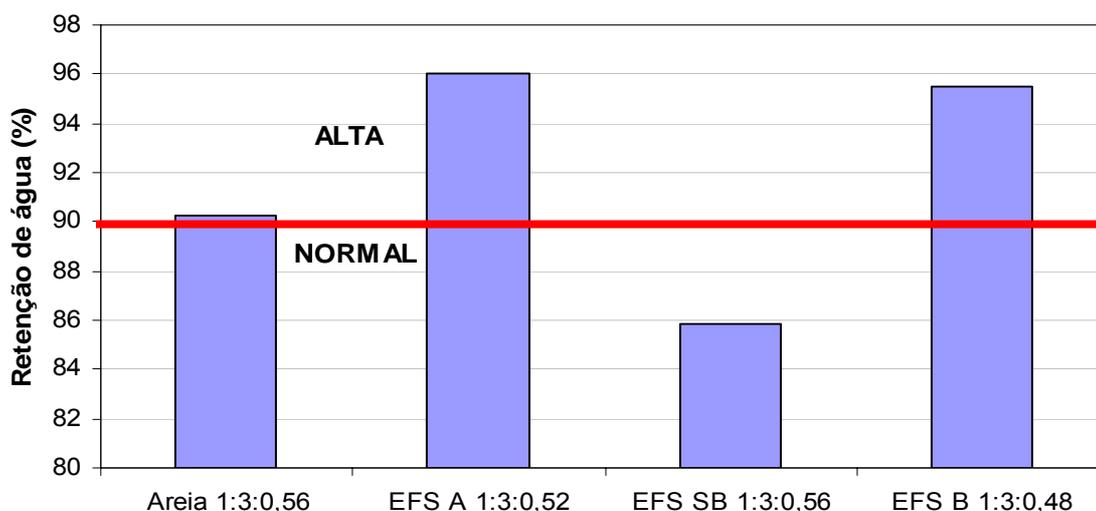


Figura 4.9 – Comparação da capacidade de retenção de água nas argamassas.

É freqüente ocorrer esse fenômeno, pois, de acordo com Nakakura (2003), a retenção de água é resultado quase que exclusivamente da água exsudada da argamassa; por isso, argamassas com maior teor de água perdem mais água para o ambiente e possuem menor capacidade de retenção de água.

As argamassas confeccionadas com Areia Natural, EFS A e EFS B apresentaram retenção de água acima de 90%; portanto, são argamassas com alta capacidade de retenção de água. Este resultado é satisfatório, pois quanto menos água a argamassa perder para o ambiente, mais adequada será a hidratação do cimento, diminuindo a retração por secagem e garantindo o desempenho esperado da argamassa.

Já a argamassa com EFS SB apresentou retenção de água entre 80 e 90%, ou seja, argamassa com capacidade normal de retenção de água. Um resultado inferior à Areia Natural nesta propriedade, mas igualmente aceitável, pois alcançou uma classificação suficiente para sua utilização. Assim, não desqualifica a EFS SB como agregado miúdo na confecção de argamassas.

4.6.5. Densidade de massa aparente

Este ensaio determina a densidade de massa aparente de argamassas no estado endurecido. Pode-se concluir que praticamente não ocorreram alterações entre as densidades de massa no estado endurecido e no estado fresco (Tabela 4.6). As argamassas com EFS apresentaram densidades superiores à da Areia Natural, influenciadas pelas maiores massas específicas dos agregados reciclados.

Segundo Nakakura e Cincotto (2004), o valor da densidade de massa da argamassa é um indicativo da compacidade resultante da proporção de mistura agregado/aglomerante e da distribuição granulométrica do conjunto; determina indiretamente a quantidade de água de amassamento perdida por evaporação.

Tabela 4.6 – Comparação entre as densidades de massa das argamassas nos estados fresco e endurecido.

	Densidade de massa da argamassa no estado fresco (g/cm ³)	Densidade de massa da argamassa no estado endurecido (g/cm ³)
Areia Natural	2,02	2,00
EFS A	2,41	2,36
EFS SB	2,51	2,50
EFS B	2,34	2,32

É interessante observar que as argamassas mantiveram praticamente a mesma densidade no estado endurecido em virtude de possuírem uma elevada capacidade de retenção de água e um baixo índice de vazios. Os resultados desse ensaio comprovam o melhor empacotamento do agregado miúdo de EFS em relação à Areia Natural, demonstrados no ensaio com a argamassa no estado fresco e agora evidenciado com a maior densidade de massa no estado endurecido.

4.6.6. Evolução da resistência à compressão

A resistência à compressão é uma das características mais importantes de uma argamassa. Por isso nesta dissertação, foi realizado um estudo da evolução das resistências das argamassas com EFS A, EFS SB, EFS B e Areia Natural com 1, 3, 7, 28, 90 e 120 dias (Figura 4.10), a fim de acompanhar o comportamento das mesmas por um maior período de tempo e observar se ocorrem mudanças de resistência em idades avançadas.

É possível observar que todas as argamassas atingiram resistência mecânica superior à exigida pela NBR 13281 (1995) para argamassas de múltiplo uso, de no mínimo 8 MPa aos 28 dias de idade, para que a argamassa seja classificada como classe III, ou seja, de melhor desempenho mecânico.

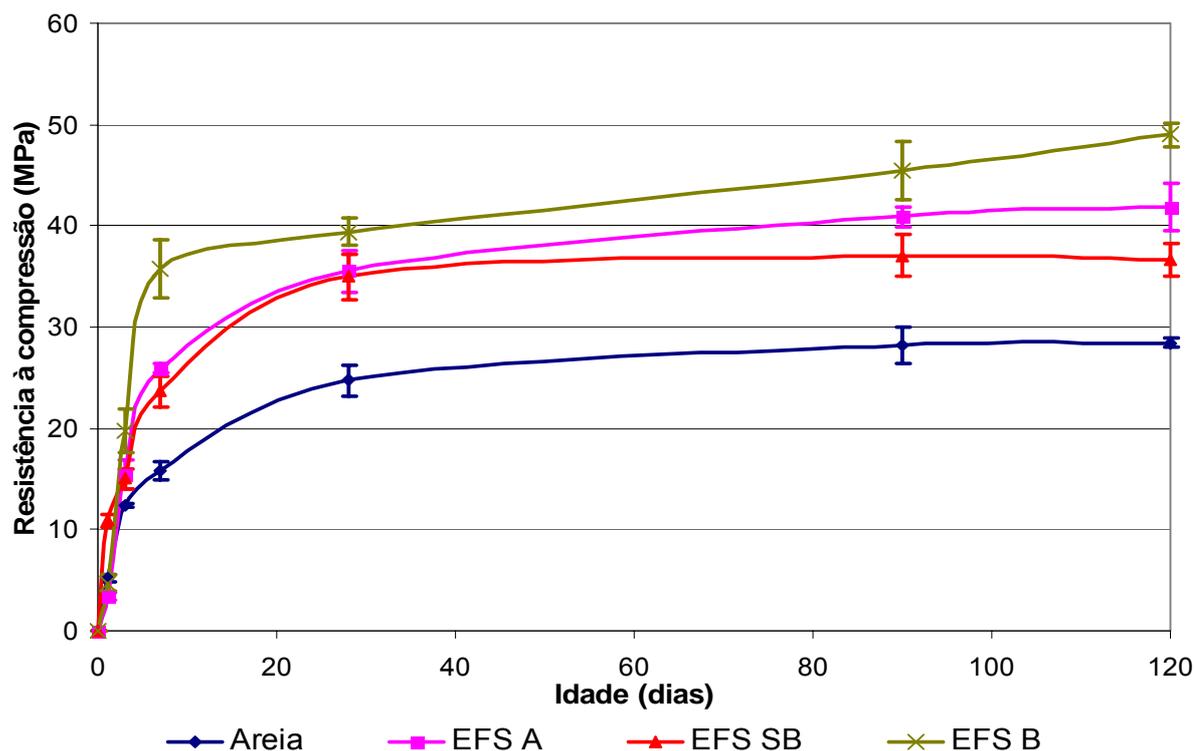


Figura 4.10 – Evolução da resistência à compressão.

É necessário ressaltar que o traço utilizado para a confecção dessa argamassa foi o 1:3, traço considerado padrão para argamassas de múltiplo uso. Entretanto, em argamassas de revestimento, em função de uma maior economia, costuma-se utilizar traços iguais a 1:5, 1:6, 1:7 e 1:8, e essas argamassas terão menor resistência à compressão, ou seja, próximas dos limites estabelecidos pela NBR 13281 (2001).

Os resultados mostraram que as argamassas com EFS apresentaram desempenho superior à de referência (Areia Natural), principalmente para as idades mais avançadas. Nota-se também um aumento da resistência à compressão em função do tempo até a idade de 120 dias. É importante salientar que em nenhuma das idades houve queda da resistência das argamassas, o que demonstra não terem problemas de durabilidade ou interferência de agentes agressivos intrínsecos visíveis.

Destaca-se como o traço de maior resistência mecânica entre todas as argamassas confeccionadas o 1:3:0,48 com EFS B que alcançou, aos 28 dias, a resistência de

39 MPa e, aos 120 dias, 49 MPa. Segundo Silva (2006), um menor consumo de água na composição é responsável pelo aumento das resistências mecânicas das argamassas, como verificado nas argamassas avaliadas neste estudo (Figura 4.11). Este resultado está também relacionado a excelente capacidade de retenção de água alcançada (95%) pela argamassa com EFS B.

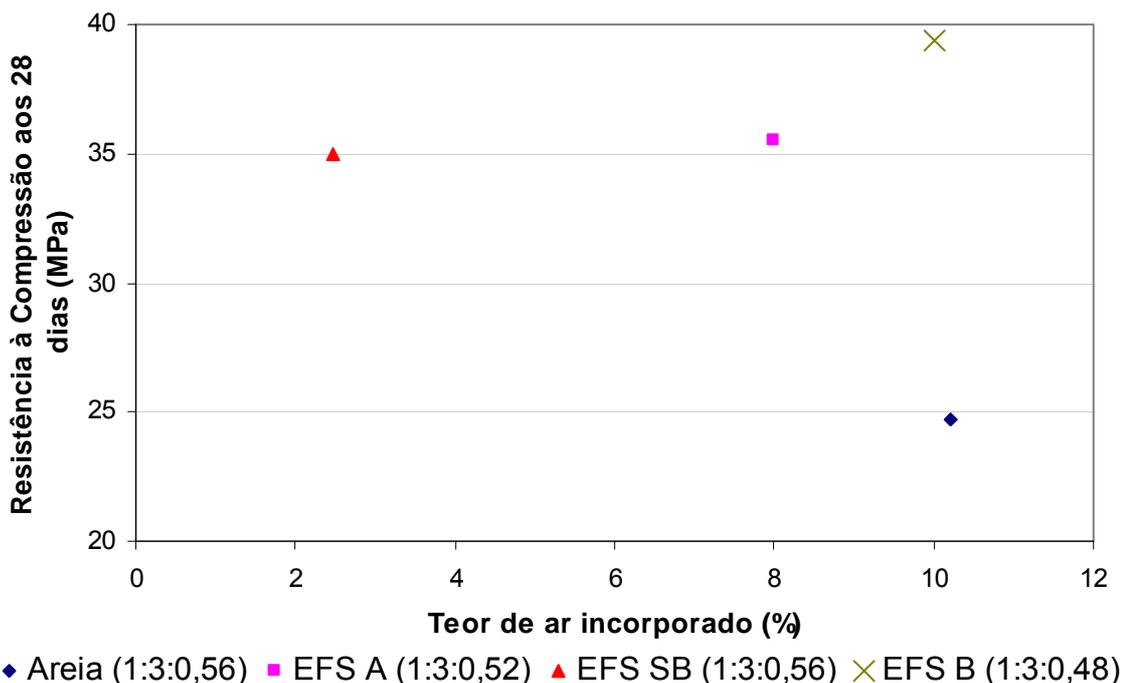


Figura 4.11 – Comparação entre o teor de água da argamassa e a resistência à compressão aos 28 dias.

No caso das argamassas com Areia Natural e EFS SB, que possuem mesmo teor de água, a melhor resistência à compressão se deve a maior massa específica, menor quantidade de ar incorporado e outras características da EFS que melhoram as resistências mecânicas das argamassas, apesar da menor capacidade de retenção de água (86% da EFS SB contra 90% da Areia Natural).

Dos resultados obtidos, conclui-se que as argamassas com EFS substituindo totalmente a areia não perderam resistência, ao contrário, tiveram ganho em até 50% de resistência à compressão em relação a argamassa com Areia Natural, valores de resistências consideradas elevadas, que viabilizam o uso desse resíduo como agregado reciclado.

4.6.7. Evolução da resistência à tração por compressão diametral

Os resultados desse ensaio estão ilustrados na Figura 4.12. Essa propriedade é fundamental em argamassas de revestimentos, pois está relacionada à fissuração de áreas expostas. Quanto maior a resistência à tração, maior será a capacidade da argamassa de resistir a fissurações que são originadas de tensões de tração ou da retração por secagem. Essas fissuras devem ser evitadas, pois servem para o ingresso de agentes agressivos que prejudicam a durabilidade da argamassa, além de diminuir a área de contato com o substrato e, conseqüentemente, diminuir a resistência de aderência.

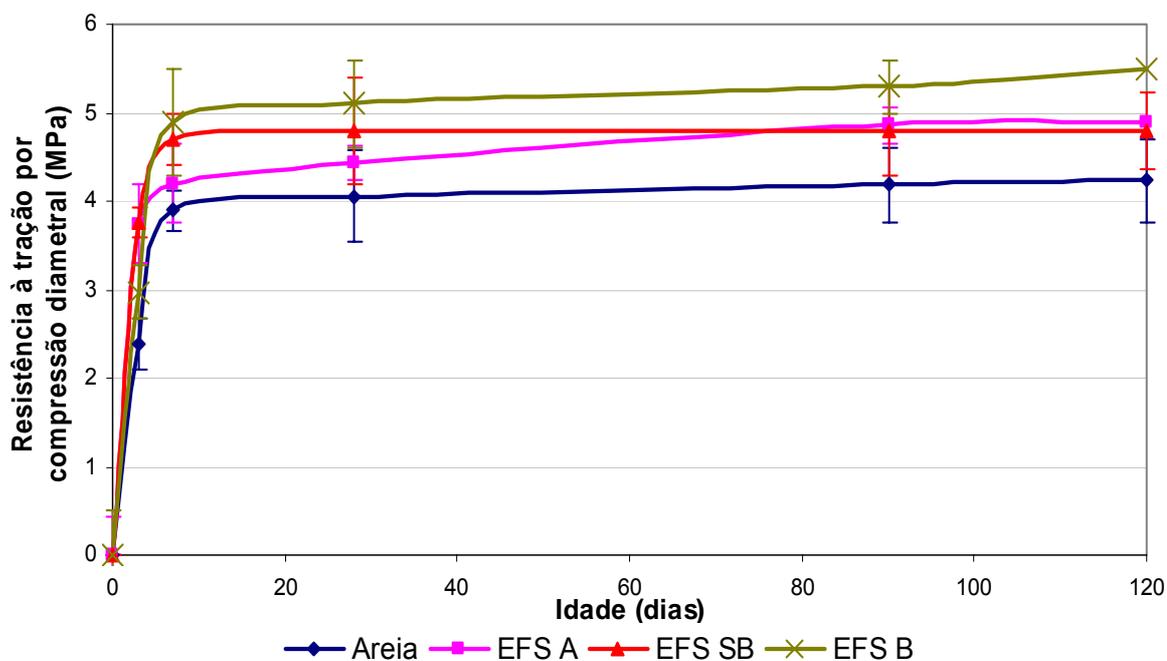


Figura 4.12 – Evolução da resistência à tração por compressão diametral.

Todos os traços apresentaram comportamentos parecidos, com maior crescimento da resistência à tração até os 7 dias, seguido de uma estabilização da resistência em idades mais avançadas. Destaca-se o traço 1:3:0,56 com EFS SB com elevadas resistências em todas as idades (6,76 e 6,84 MPa nas idades de 28 e 120 dias, respectivamente), ou seja, um desempenho 62% superior à argamassa de referência (Areia Natural).

Todas as argamassas obtiveram resistências à tração por compressão diametral satisfatórias, com destaque para aquelas com EFS, que alcançaram valores superiores aos de argamassa de Areia Natural em todas as idades.

4.6.8. Evolução da resistência de aderência

Falhas na aderência argamassa-substrato podem facilitar o aparecimento de patologias que afetam o revestimento e a durabilidade da estrutura. Por esse motivo, existe uma preocupação com a resistência de aderência de uma argamassa. A NBR 13749 (1996) prescreve que as argamassas empregadas para revestimento devem, aos 28 dias de idade, alcançar no mínimo 0,2 MPa de resistência de aderência para serem aplicadas em revestimentos internos, e no mínimo 0,3 MPa para revestimentos externos.

A Figura 4.13 mostra a evolução da resistência de aderência das argamassas com Areia Natural, EFS A, EFS SB e EFS B nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias. As linhas pontilhadas representam os valores exigidos pela ABNT aos 28 dias de idade. Todas as argamassas atingiram o mínimo de 0,2 MPa, atendendo à exigência para aplicação em paredes internas e tetos, sendo que as argamassas com EFS B com 0,52 MPa e EFS SB com 0,31 MPa alcançaram o mínimo para serem utilizadas em revestimentos externos.

4.7. Análise da durabilidade das argamassas de múltiplo uso

A procura por materiais que garantam um desenvolvimento sustentável colocou no mercado uma série de materiais que possuem boas características mecânicas sem, porém, nenhuma garantia de durabilidade. Isso porque as normas técnicas não exigem ainda a durabilidade como critério de aceitação para todas as classes de argamassas (Rocha *et al.*, 2006).

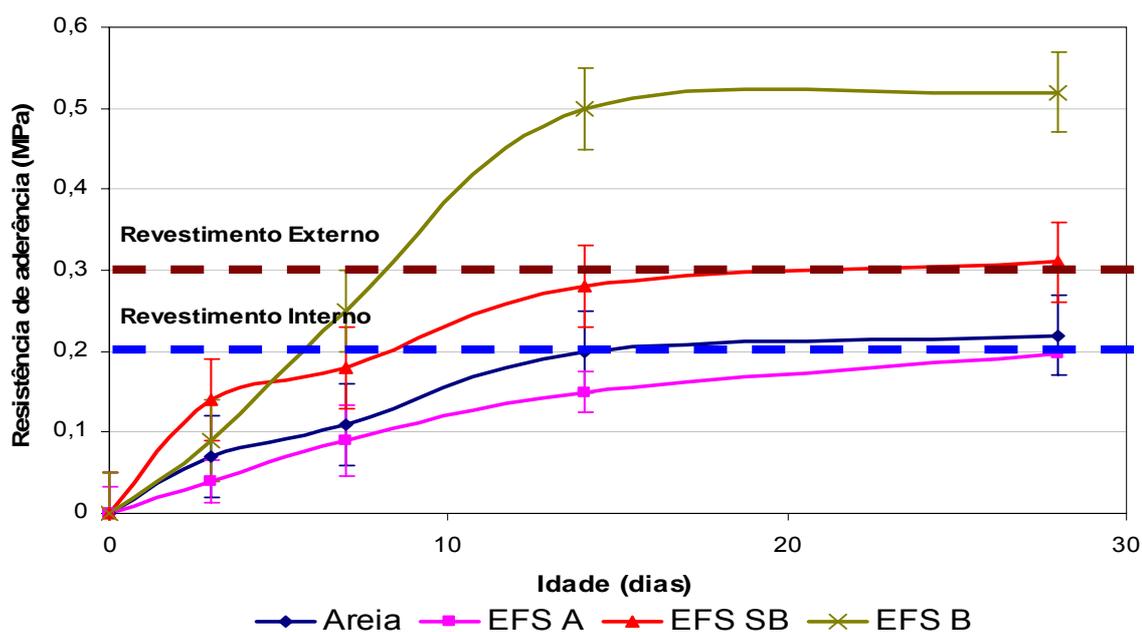


Figura 4.13 – Evolução da resistência de aderência.

A durabilidade de uma argamassa com agregado reciclado é uma característica essencial para sua aceitação no mercado. Nesta dissertação as argamassas foram submetidas a condições adversas de temperatura e umidade e foram analisados parâmetros que indicam como estas resistem a estas situações: absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, lixiviação contínua e ciclagem água-estufa.

4.7.1. Absorção de água por capilaridade

Na Figura 4.14 estão ilustrados os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade. Estes mostram que a argamassa com Areia Natural obteve maior absorção por capilaridade entre todas as argamassas avaliadas. A elevada massa específica das EFS gerou argamassas mais densificadas. Outro fator observado nestes resultados foi que maiores relações entre água e cimento levaram a maiores absorções, causadas provavelmente pela maior ocorrência de capilares e aumento de porosidade da argamassa com relação a/c maior.

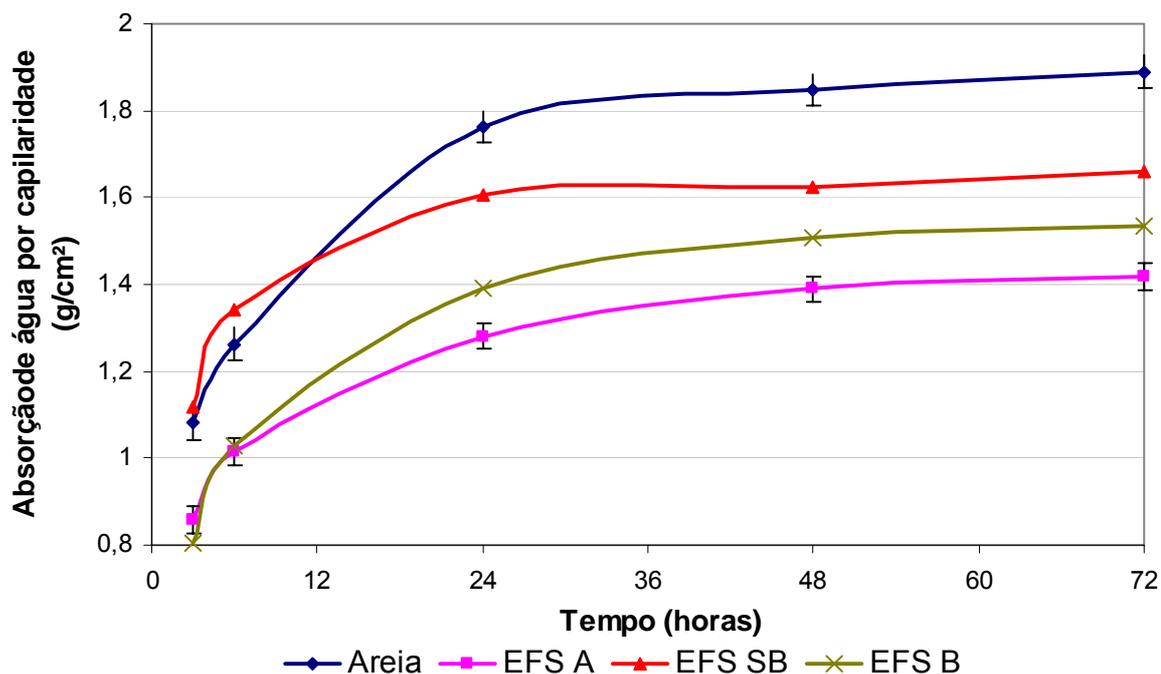


Figura 4.14 – Evolução da absorção de água por capilaridade.

As curvas mostram que no período de 72 horas as argamassas praticamente atingiram o estado de saturação por capilaridade e que a absorção é mais acentuada nas primeiras 24 horas, atingindo quase o máximo, já no primeiro dia.

4.7.2. Absorção de água por imersão

Os resultados do ensaio de absorção de água por imersão estão reunidos na Figura 4.15. Através destes, é possível concluir que ocorreu fenômeno similar ao ensaio de absorção por capilaridade, com as argamassas com EFS alcançando melhores resultados do que a argamassa com Areia Natural, em razão da maior massa específica da EFS. Neste ensaio também fica evidente a influência da relação a/c na absorção de água, haja vista a argamassa com menor relação a/c (EFS B 1:3:0,48) apresentar a menor absorção de água.

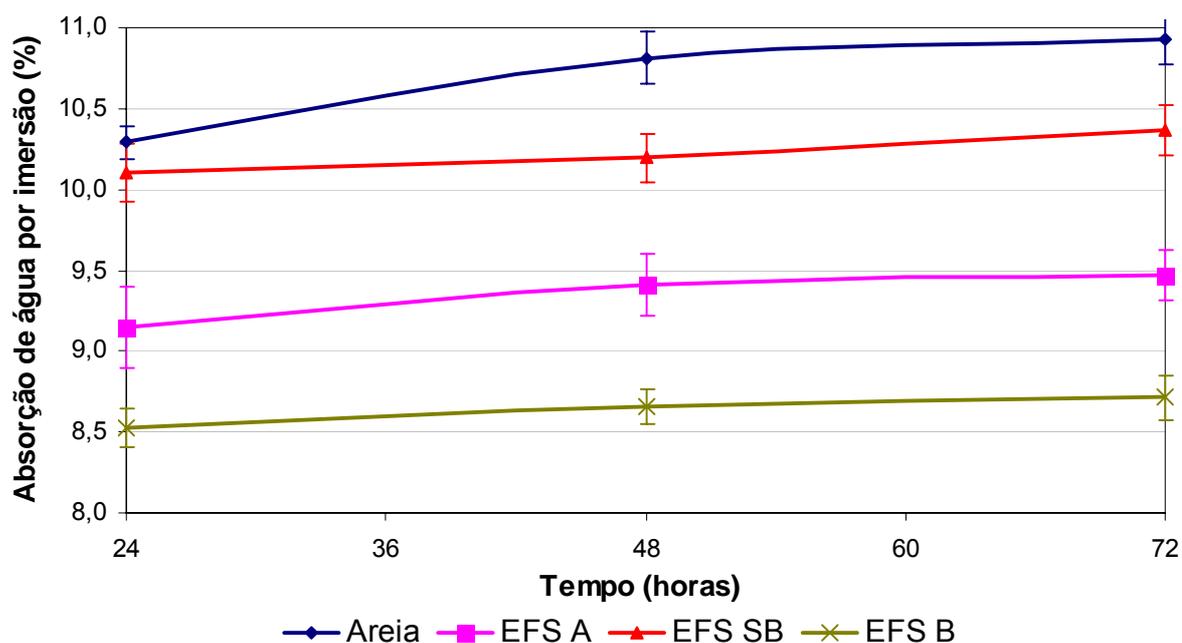


Figura 4.15 – Evolução da absorção de água por imersão.

4.7.3. Lixiviação contínua

Neste ensaio as argamassas foram submetidas à degradação devido à variação de temperatura e umidade, através de ciclos de lixiviação com água quente, secagem parcial, lixiviação com água à temperatura ambiente e, novamente, secagem parcial. Estes ciclos tiveram duração de 300, 750 e 1500 horas cada. Na Figura 4.16 observa-se as argamassas dispostas dentro do equipamento após 750 e 1500 horas de ensaio.

Neste ensaio foram estudadas argamassas com Areia Natural, EFS SB e EFS B. Não foi confeccionada argamassa com EFS A devido à quantidade reduzida da mesma. Os resultados das principais características das argamassas ensaiadas após o ensaio de lixiviação contínua estão descritos a seguir.

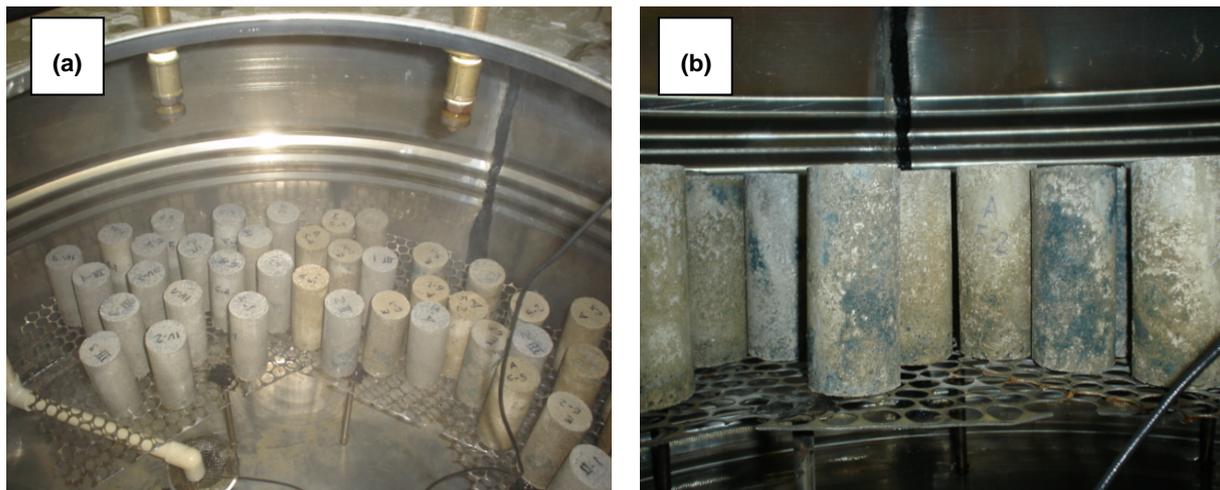


Figura 4.16 – Corpos-de-prova das argamassas dentro do equipamento de lixiviação contínua: (a) após 750 horas (b) após 1500 horas.

4.7.3.1. Variação da resistência à compressão

Os resultados da resistência à compressão das argamassas após o ensaio de lixiviação contínua estão apresentados na Figura 4.17. As argamassas com Areia Natural (1:3:0,56) e com EFS SB (1:3:0,56) que possuem mesma relação a/c tiveram comportamentos similares; pequeno aumento de resistência até o ciclo de 750 horas (aproximadamente 25%) e queda de resistência entre 750 e 1500 horas.

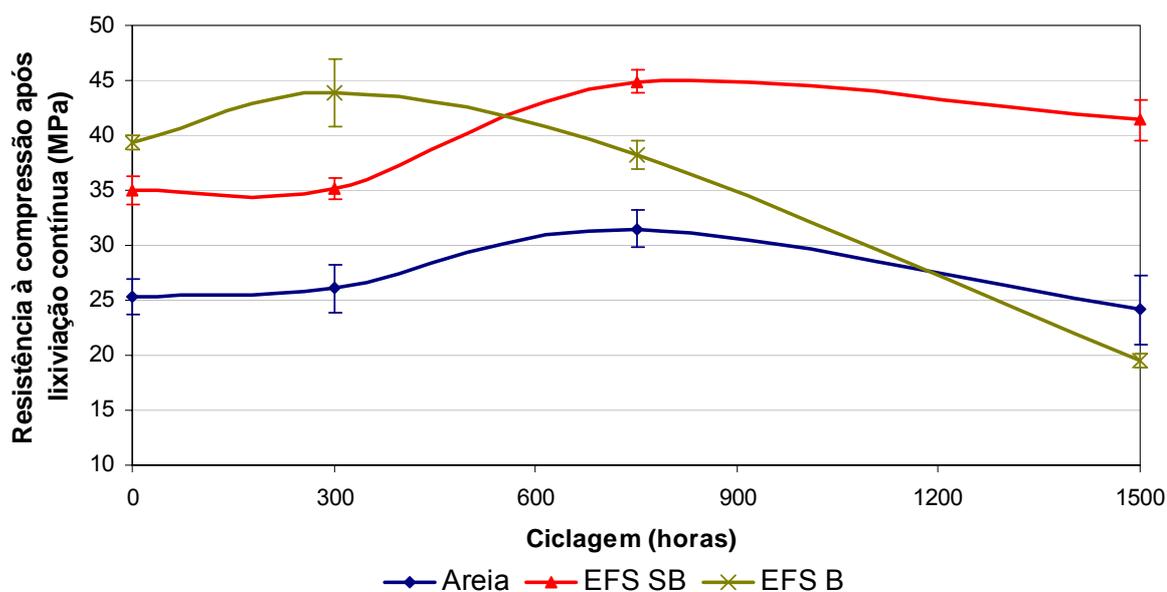


Figura 4.17 – Evolução da resistência à compressão após ciclos de lixiviação contínua.

Apesar desta queda de resistência mecânica no caso da EFS SB, que possui menor teor de ar incorporado entre as argamassas estudadas, a resistência à compressão continuou superior ao valor antes da lixiviação contínua. Já a argamassa com Areia Natural apresentou após o ciclo de 1500 horas uma diminuição de 5% do valor da resistência à compressão aos 28 dias.

A argamassa com EFS B apresentou um comportamento diferente durante a lixiviação; aumento inicial de resistência mecânica de até 12% após o ciclo de 300 horas; quedas consecutivas da resistência nos ciclos mais avançados, alcançando resistência à compressão de 19,5 MPa ao final do ciclo de 1500 horas, ou seja, uma diminuição de 50% do valor da resistência antes da lixiviação.

Pode-se concluir que todas as argamassas apresentaram um aumento da resistência no ciclo inicial, causada pela circulação de água quente, que proporcionou às argamassas uma cura térmica e, portanto, aceleração do processo de hidratação do cimento Portland.

Nos ciclos mais avançados, as argamassas começaram a sofrer com a condição adversa do ambiente, absorvendo e perdendo água na lavagem e secagem parcial, resultando em variação de massa das mesmas, causando trincas e diminuição da resistência à compressão, especialmente na argamassa com mais vazios, ou seja, com maior teor de ar incorporado (EFS B).

4.7.3.2. Variação da resistência à tração por compressão diametral

Os resultados da resistência à tração por compressão diametral das argamassas após o ensaio de lixiviação contínua são apresentados na Figura 4.18. Observa-se que todas as argamassas sofreram queda de resistência à tração durante os ciclos. A diminuição da resistência à tração está ligada ao aparecimento de vazios logo no início do ensaio de lixiviação contínua, as quais prejudicam a resistência à tração. Essas fissuras facilitam também o ingresso de agentes patogênicos afetando a durabilidade das argamassas.

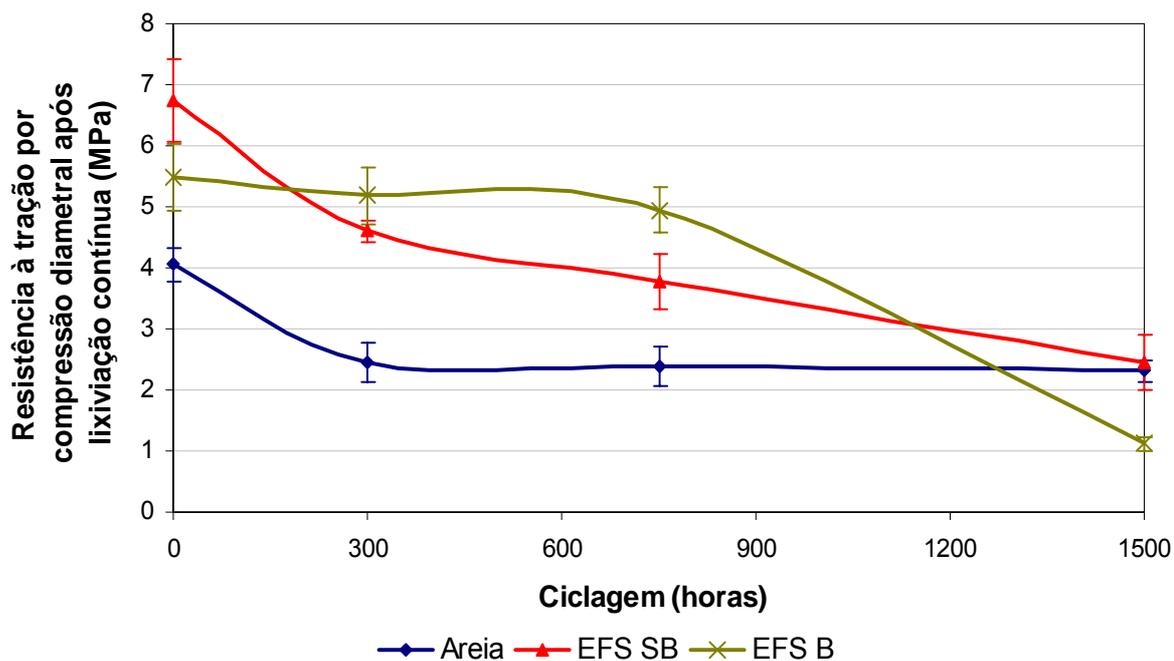


Figura 4.18 – Evolução da resistência à tração por compressão diametral após ciclos de lixiviação contínua.

A argamassa com Areia Natural perdeu cerca de 40% da resistência antes do início do ensaio, essa perda ocorre quase que totalmente até o ciclo de 300 horas. A argamassa com EFS SB chega a perder ao fim do ciclo de 1500 horas 60% da sua resistência, alcançando 2,5 MPa, mas, mesmo assim obtém uma resistência superior a da argamassa com Areia Natural.

A maior perda de resistência à tração ocorreu na argamassa com EFS B e pode ser explicada, como na variação da resistência à compressão após o ensaio de lixiviação contínua, pelo maior teor de vazios existentes em seu interior, que facilitou o aparecimento de trincas e a diminuição das resistências mecânicas.

Estes resultados revelam que o ensaio de lixiviação contínua afetou mais sensivelmente a resistência à tração por compressão diametral do que a resistência à compressão, já que o ensaio de tração tende a propagar as fissuras abertas durante este ensaio de durabilidade enquanto o ensaio de compressão tende a fechá-las.

4.7.4. Ciclagem água-estufa

Este ensaio de ciclagem água-estufa visou analisar o comportamento das argamassas perante condições muito severas de temperatura e umidade, buscando simular a real aplicação dessa argamassa, como revestimento externo, que sofrerá a influência da instabilidade do ambiente. A Figura 4.19 mostra a situação dos corpos-de-prova de argamassa com EFS B, que foi a mais afetada após ciclagem água-estufa. Os resultados das principais características das argamassas após a ciclagem água-estufa estão apresentados a seguir.



Figura 4.19 – Condições dos corpos-de-prova de argamassa com EFS B após ciclagem água-estufa.

4.7.4.1. Variação da resistência à compressão

A comparação entre os valores de resistência à compressão das argamassas antes e depois da exposição à ciclagem água-estufa está apresentada na Figura 4.20. É possível observar a queda da resistência em todas as argamassas, como já era esperado, pelo elevado grau de agressividade do ensaio.

Como ocorreu após exposição à lixiviação contínua, a argamassa com EFS B foi a que mais perdeu resistência, cerca de 60%, chegando a marca de 15 MPa. A argamassa com EFS A teve redução de 21%, com EFS SB 25% e com Areia Natural 31%. As argamassas com EFS A e EFS SB, que são mais densas e contêm menos

água, mantiveram o melhor resultado em relação à argamassa de referência.

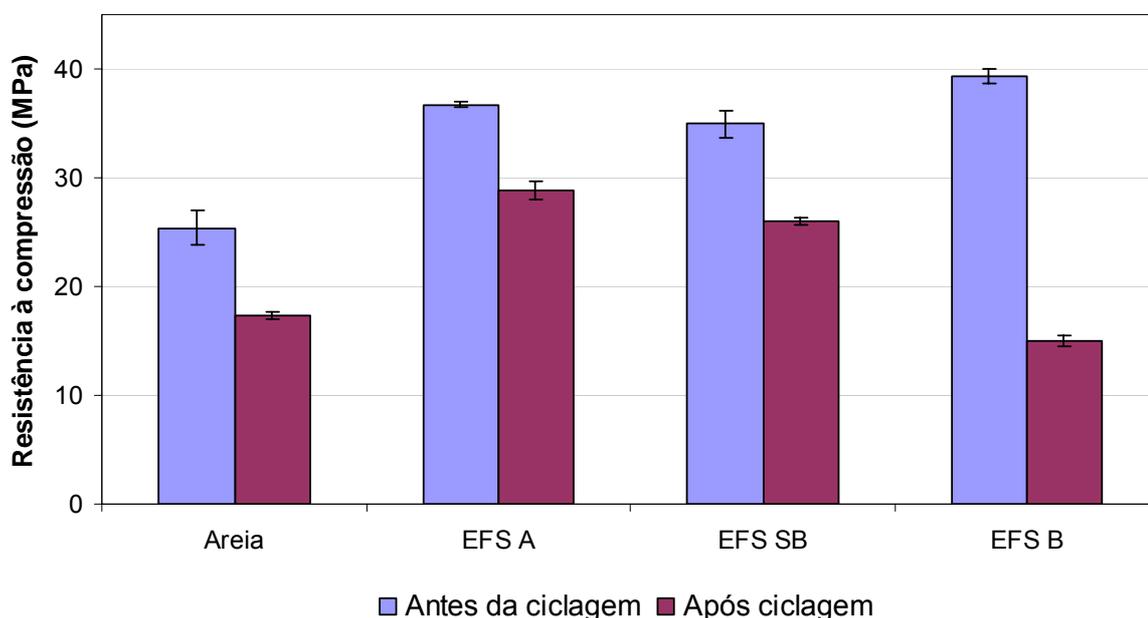


Figura 4.20 – Comparação da resistência à compressão das argamassas antes e após ciclagem água-estufa.

4.7.4.2. Variação da resistência à tração por compressão diametral

A Figura 4.21 apresenta a comparação entre os valores de resistência à tração por compressão diametral das argamassas antes e depois da exposição à ciclagem água-estufa. Todas as argamassas sofreram diminuição da resistência à tração, característica extremamente influenciada pelo aparecimento de fissuras, que é comum durante um ensaio agressivo como este.

Após a ciclagem água-estufa, a argamassa com EFS B atingiu resistência à tração de 1,5 MPa, redução de 70%, ou seja, valor extremamente elevado. A argamassa com EFS A alcançou 3,2 MPa de resistência à tração após a ciclagem, com EFS SB 2,7 MPa e com Areia Natural 3,0 MPa, reduções de 60%, 27% e 25%, respectivamente.

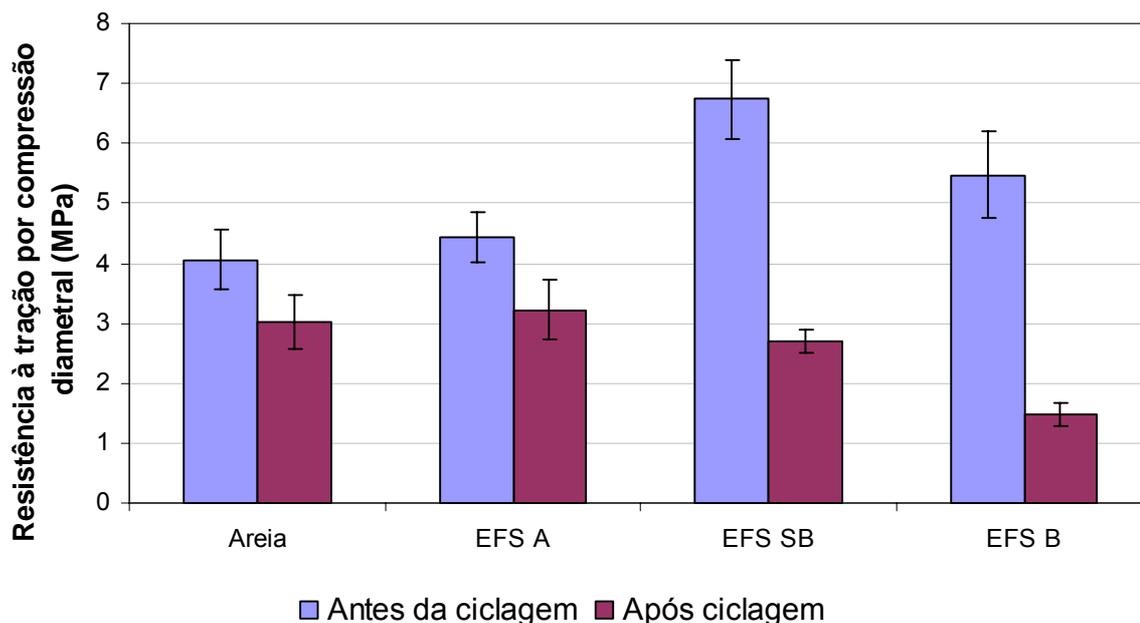


Figura 4.21 – Comparação da resistência à tração por compressão diametral das argamassas antes e após ciclagem água-estufa.

4.8. Análise microestrutural das argamassas de múltiplo uso

Na Figura 4.22 é possível observar as micrografias eletrônicas de varredura das superfícies de ruptura das argamassas com diferentes tipos de agregado miúdo. Verifica-se que as argamassas apresentam uma adequada interface agregado-matriz, com distribuição homogênea de agregados de tamanhos diversos por toda a matriz cimentícia e adesão da matriz aos agregados. Essa adequada interação foi responsável pelo bom desempenho das características da argamassa, tornando-a resistente e com boa trabalhabilidade.

É possível visualizar na Figura 4.23 as diferenças entre as estruturas da argamassa com EFS B como agregado antes e depois da ciclagem água-estufa. De acordo com as imagens, observa-se que a argamassa após a ciclagem apresenta fissuras na matriz, resultado da entrada e saída de água do seu interior durante o ensaio. Esses vazios foram os responsáveis pela perda de resistência mecânica das argamassas após a ciclagem.

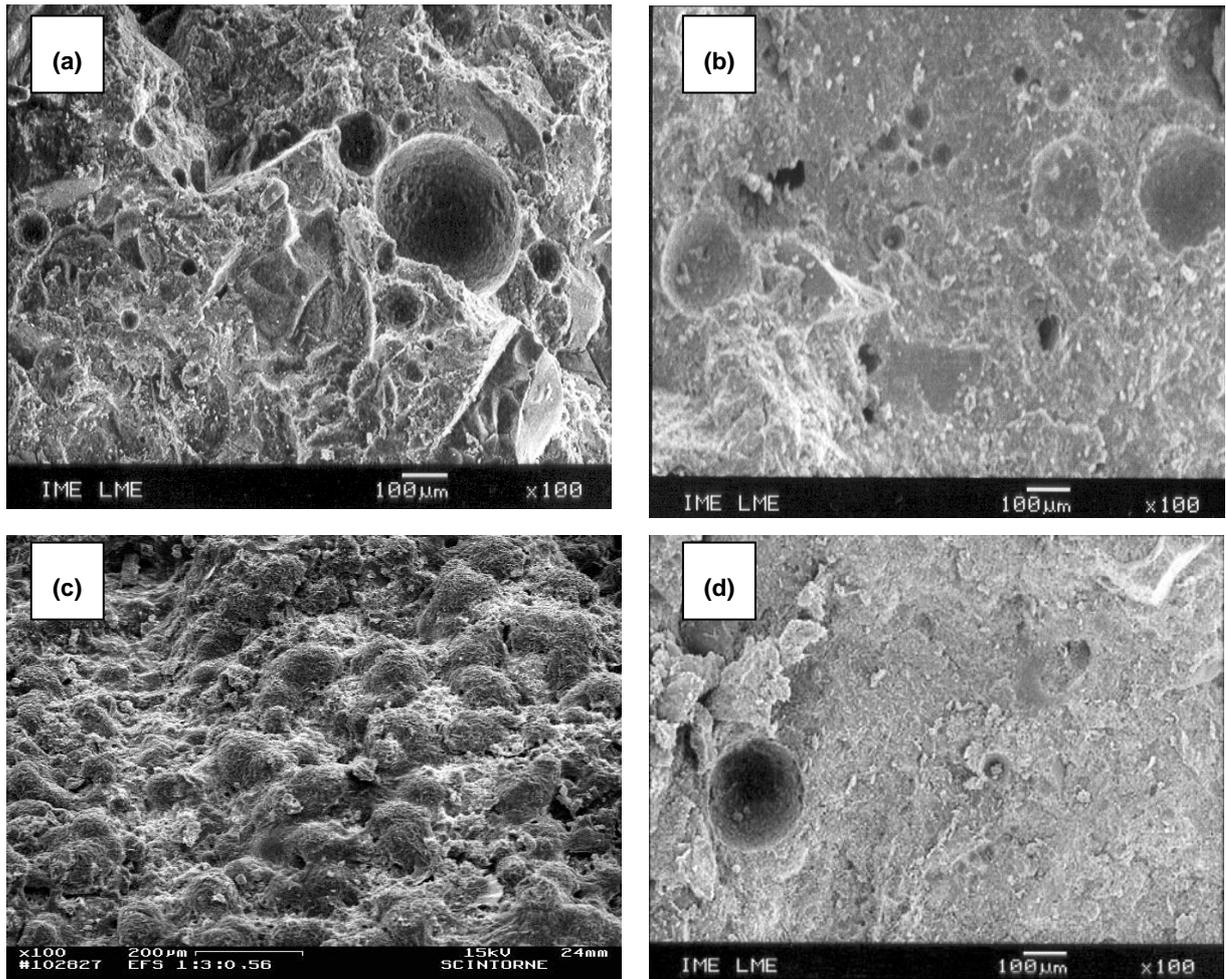


Figura 4.22 – Micrografias eletrônicas de varredura das argamassas com aumento de 100x. (a) argamassa com Areia; (b) argamassa com EFS A; (c) argamassa com EFS SB; (d) argamassa com EFS B.

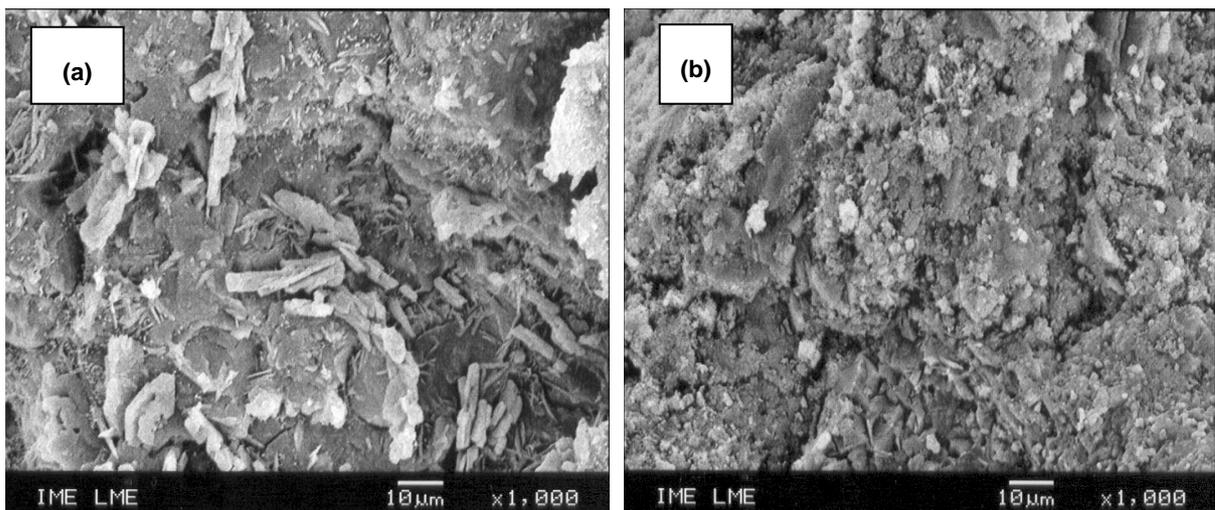


Figura 4.23 – Micrografias eletrônicas de varredura da argamassa com EFS B (a) sem ciclagem; (b) com ciclagem.

4.9. Argamassa com os três tipos de EFS

A Figura 4.24 mostra a evolução da resistência à compressão das argamassas com agregado miúdo formado pela mistura dos três tipos de EFS ($\frac{1}{3}$ de cada EFS). O teor de água para essa argamassa foi o obtido pelo ensaio de consistência padrão (NBR 13276, 1995) e o resultado obtido foi de 12%, resultando em um traço para a argamassa com EFS M de 1:3:0,48.

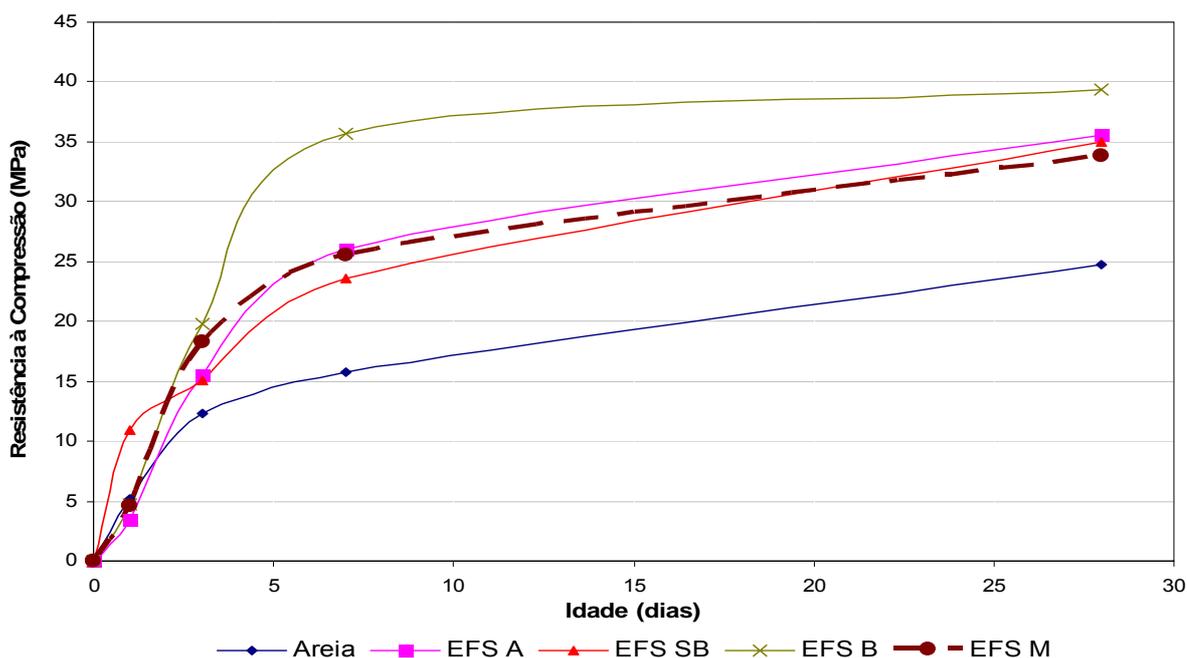


Figura 4.24 – Comparação da evolução da resistência à compressão das argamassas.

Os resultados foram semelhantes as das outras argamassas com cada tipo de EFS e superiores aos da argamassa com Areia Natural em todas as idades, atendendo ao mínimo exigido por norma. A argamassa com EFS M como agregado alcançou resistências à compressão de 4,6; 18,3; 25,5 e 33,9 MPa nas idades de 1, 7, 14 e 28 dias, respectivamente.

Este resultado é bastante satisfatório, pois indica a possibilidade de otimizar a reciclagem da EFS como agregado miúdo na confecção das argamassas de múltiplo uso, fabricando uma argamassa com os três tipos de EFS sem preocupação com sua separação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

O principal resultado obtido foi a comprovação que a EFS possui um desempenho satisfatório como agregado miúdo na produção de argamassas de múltiplo uso, substituindo totalmente a areia natural, não sendo observado em nenhum dos ensaios perdas das características das argamassas que impossibilite sua utilização como agregado reciclado.

Isso representa um importante progresso, principalmente, na questão ambiental, na qual poderá ocorrer diminuição do despejo de EFS em aterros sanitários e as despesas das empresas fabricantes com seu transporte, disposição e licenças ou multas. Além disso, este resíduo se mostrou uma alternativa economicamente e ecologicamente viável como substituto da Areia Natural, bem natural finito muito utilizado, extraído descontroladamente e que já sofre com *déficit* em várias regiões do país, especialmente nas grandes regiões produtoras de EFS.

A caracterização da EFS atendeu às exigências da ABNT para agregado miúdo. Este resíduo obteve classificação classe II (não-inerte) em sua caracterização ambiental, mas sua composição química e mineralógica não é prejudicial ao desempenho das argamassas.

Com base nos resultados obtidos no programa experimental, foi possível concluir que as argamassas constituídas com EFS atenderam a todos os limites de classificação exigidos pela NBR 13281 (1995): em relação ao teor de ar incorporado, as argamassas com EFS apresentaram resultados superiores do que as argamassas com areia natural e a utilização de EFS não afetou a resistência mecânica das argamassas; ao contrário, estas apresentaram resultados bem superiores.

Segundo a NBR 13281 (1995), as argamassas ensaiadas obtiveram a seguinte classificação: argamassa com Areia Natural, traço 1:3:0,56 com 12% de água,

classificação **III-alta-b** correspondente a classe III de resistência a compressão, alta retenção de água e tipo b de teor de ar incorporado; argamassa com EFS A, traço 1:3:0,52 com 13% de água, classificação **III-alta-b**; argamassa com EFS SB, traço 1:3:0,56 com 14% de água, classificação **III-normal-a** e argamassa com EFS B, traço 1:3:0,48 com 12% de água, classificação **III-alta-b**. Observa-se que a argamassa que mais destacou-se de acordo com esta norma foi a com EFS Semi-Básica.

As argamassas com EFS também não perderam consistência e trabalhabilidade em relação às argamassas com areia natural. Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e resistência de aderência ao substrato se destacaram pelas excelentes marcas alcançadas, com todas atingindo o valor mínimo exigido por norma para revestimento interno de 2 MPa. Ressalta-se que a argamassa com EFS B obteve classificação para ser utilizada em revestimentos externos, alcançando resistência de aderência superior a 3 MPa. Além disso, as argamassas também se comportaram satisfatoriamente perante os ensaios de durabilidade.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, indicam-se estudos futuros sobre:

- Caracterização de argamassas utilizando os três tipos de EFS.
- Estudo da viabilidade técnico e econômica desta reciclagem.
- Otimização da curva granulométrica da EFS para a obtenção de argamassas com maior compactação.
- Estudo de argamassas utilizando Areia Natural e EFS conjugados, com porcentagens diferentes, visando atingir combinações diferentes, mas que não percam características da argamassa.
- Avaliação de traços com maiores relações cimento/agregado, por exemplo, 1:5, 1:6 e 1:7.

- Estudo da durabilidade das argamassas com resíduo para maiores tempos de ensaio.
- Estudo comparativo com outros trabalhos da literatura referentes a argamassas com agregado miúdo reciclado, em especial com resíduos industriais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afonso W. M. (2005) *Caracterização de resíduo de corte de rochas na produção de argamassa*. Dissertação (de mestrado em Engenharia Civil) – Campos do Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF. 122p.

Ângulo, S.C. (2000) *Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de demolição reciclados*. Dissertação (de mestrado) – São Paulo-SP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, 172p.

Almeida, S., Sampaio J. A. (2002), Obtenção de areia artificial com base em finos de pedreiras, *XIX ENTMME. I Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste*, vol.2, p.263-268.

Alves, N.J.D. (2002) *Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento*. Dissertação de Mestrado – Brasília-DF, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília - UNB.

American National Standard Institute – American Welding Society – A5.17/A5.17M (1997). Annex of guide to AWS specification for carbon steel electrodes and fluxes for submerged arc welding.

Anuário Mineral Brasileiro - Edição 2000. DNPM/MME. Brasília, DF.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2001) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - requisitos: NBR 13281. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1998) Argamassa colante industrializada para assentamento de placas de cerâmica - determinação da resistência de aderência: NBR 14084. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1998) Cimento Portland - determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine): NBR NM 76. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1998) Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento: NBR 7200. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1996) Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – especificação: NBR 13749. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1996) Cimento Portland - determinação da resistência à compressão: NBR 7215. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1995) Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por capilaridade: NBR 9778. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1995) Argamassa para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e tetos - determinação da resistência à compressão: NBR 13279. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1995) Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação da retenção de água: NBR 13277. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1995) Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – determinação de densidade de massa aparente no estado endurecido. NBR 13280. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1995) Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência padrão: NBR 13276. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1995) Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação do teor de incorporado: NBR 13278. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1995) Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - determinação da resistência de aderência à tração: NBR 13528. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1987) Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco de Chapman. NBR 9776. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1987). Amostragem de resíduos – procedimento. NBR 10007. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1987) Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por imersão - índice de vazios e massa específica: NBR 9778. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1987) Resíduos sólidos. NBR 10004. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1984) Cimento portland e outros materiais em pó determinação da massa específica: NBR 6474. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1984) Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica: NBR 6508. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1983). Argamassa e concretos - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 7222. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1983) Agregado para concreto. NBR 7211. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1982) Agregado em estado solto - determinação da massa unitária: NBR 7251. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1982) Areia normal para ensaio de cimento – especificação. NBR 7214. Rio de Janeiro.

Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para a Construção Civil (ANEPAC) - <http://www.anepac.org.br/home/index.aspx>

Babo, C.A., Couto, P. (2006) Mineração e qualidade de vida - A essência do desenvolvimento sustentável. <http://www.firjan.org.br/notas/media/Mineracao.pdf>, em 05/06.

Bitar, O. Y. (1997) *Avaliação da recuperação de áreas degradadas para mineração região metropolitana de São Paulo*. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) Universidade de São Paulo - SP. 193p.

Brand, P. (2001) La Construcción Ambiental del Bienestar Urbano. Caso de Medellín, Colombia. In: *Economía, Sociedad y Territorio*. vol. III, p. 1-24.

Calaes, G.D. (2006) Programa de capacitação de gestores de empresas mineradoras de agregados para a construção civil – bases para a conciliação da produção dos agregados com o desenvolvimento urbano sustentável. <http://www.cetec.br/agregados>, em 05/06.

-
- Calmon, J.L. (1997) Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. *Simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas. Anais Salvador-BA*, p. 64-75.
- Campos, E.E., Fernandes, L.E.V.A. (2005) Controle ambiental aplicado à produção de agregados; http://www.cetec.br/agregados/plano_agregados.htm, em 05/2006.
- Carneiro, F. P., Souza, P.C.M., Monteiro, E.C.B., Barkokébas Jr, B. (2003) Identificação da atual situação ambiental dos resíduos de construção e demolição na região metropolitana do Recife. In: *IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil 2003*, São Paulo-SP.
- Carneiro, A.M.P., Cincotto, M.A. (1997) Distribuição granulométrica para argamassas. *Téchne - Revista de Tecnologia da Construção*, v.5, p.29-31, mar./abr.
- Carter, G.J. (1988) The reprocessing and re-use of slag as flux in submerged-arc welding – 1 e 2. *The Welding Institute Research Bulletin*. 1988 february: 52-55 and march/april: 99-105.
- Castilho, J. A. B. (1996) Diagnóstico de resíduos sólidos industriais em Santa Catarina: perspectivas de valorização na construção civil. In: *Workshop reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil. Anais. São Paulo*, p. 71-78.
- Cincotto, M. A. (1988) A utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. In: *Simpósio de desenvolvimento de materiais e componentes da construção civil. Anais. Florianópolis*, 1988. p. 171- 181.
- Cunha Pinto, V. (2006). *Estudo da degradação de geotêxteis tecidos*. Dissertação de Mestrado – Campos dos Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 133p.

Davis, L. (1981) *An introduction to welding fluxes for mild and low alloy steels*. The Welding Institute, Cambridge, UK, 34p. 1981.

Departamento de Recursos Minerais do Estado de Rio de Janeiro (DRM-RJ) - www.drm.rj.gov.br

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) - www.dnpm.gov.br

Dias, D.P., Paranhos, R. P. R., Barbosa, L.R. (2004) Escória de fluxo de soldagem como agregado para concreto. *Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social Brasil-NOCMAT*.

Dias, E.G.C.S. (2001) *Avaliação de impacto ambiental de projetos de mineração no Estado de São Paulo: a etapa de acompanhamento*. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – São Paulo-SP - Universidade de São Paulo. 330p.

Farias, C.E.G. (2002) *Mineração e Meio Ambiente no Brasil: Relatório preparado para o CGEE PNUD – Contrato 2002/001604*. Disponível em: www.cgEE.org.br/arquivos/estudo011_02.pdf. em 05/06

Ferreira, G.E., Silva, V.S. (2004) Mercado brasileiro de agregados minerais e o estudo do CETEM para obtenção de areia manufaturada. *IV Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción*, Tegucigalpa, Honduras.

Fiorito, A. J. S. I. (1994) *Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução*. São Paulo: Editora PINI.

Fortes, C., Araújo, W. (2004) *Arco Submerso* – Apostila de Arco submerso – ESAB BR. 176p.

Freitas, E.S. (2005) *Caracterização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para o uso na construção civil*.

Dissertação (de mestrado em engenharia Civil) – Campos do Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro-UENF, 97p.

Garlet, G. (1998) *Aproveitamento de resíduos de E.V.A. (Ethylene Vinyl Acetate) como agregado para concreto leve na construção civil*. Dissertação (de Mestrado) - Porto Alegre-RS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 146p.

Gimenes Jr.L., Ramalho J.P. (2004) *Arco Submerso*. http://www.infomet.com.br/s_arco_submerso.php.

Gonçalves, J. P. (2000) *Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos*. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 135p.

Instituto de Pesquisa Tecnológica - IPT. (2003) *Mineração e município – bases para planejamento e gestão dos recursos minerais*. São Paulo-SP, 177p.

John, V. M., Angulo, S. C., Agopyan, V. (2003) Sobre a necessidade de metodologia de pesquisa e desenvolvimento para reciclagem. *I Fórum das Universidades Públicas Paulistas - Ciência e Tecnologia em resíduos*. Lindóia - SP.

John, V. M. (2000a) *Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar* - artigo técnico. www.reciclagem.pcc.usp.br/des_sustentavel.htm em 02/06

John, V. M. (2000b) *Reciclagem de resíduos na construção civil - contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. Tese (livre docência) - São Paulo - SP; Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 113p.

John, V. M. (1999) A construção e o meio ambiente. <http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm> em 05/2006.

-
- John, V. M. (1996) Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. *Workshop sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de construção*. São Paulo. PCC-USP.
- Lelles, L.C., Silva, E., Griffith J.J., Martins, S.V. (2005) Perfil ambiental quantitativo da extração de areia em cursos d'água. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.29, n.3, p.439-444.
- Levy, S. M. (1997) *Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos*. Dissertação de mestrado - São Paulo-SP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo-USP, 146 p.
- Lima, A.G.S., Rocha, E.S.M., Ribeiro, L.D. (2000) *Recuperação de manganês, ferro eletrolítico, magnésio e escória silicatada provenientes de escórias siderúrgicas*. Monografia do curso de especialização em gerenciamento e tecnologias ambientais na indústria. Universidade Federal da Bahia – UFBA, 119p.
- Lima, F.S.N.S. (2005) *Aproveitamento de resíduos de construção civil na fabricação de argamassas*. Dissertação de Mestrado. João Pessoa – PB, Universidade Federal da Paraíba – UFPB, 107p.
- Lima, R.C., Almeida S.L.M. (2005) Areia artificial: uma alternativa para o uso em construção civil. *XIII Jornada de Iniciação Científica - Serie anais 2005*.
- Kruger, P. V. (1995) Panorama mundial do aproveitamento de resíduos na siderurgia. *Revista Metalurgia e Materiais*, p. 116-118. fev. 1995.
- Kuck, D. W., Areia artificial reduz impacto ambiental de construção civil. *Ciência Hoje on-line* <http://www2.uol.com.br/cienciahoje/chdia/n776.htm> em 31/01/03.
- Kulaif, Y. (2001) *Análise do mercado de matérias primas minerais: estudo de caso da indústria de pedras britadas do estado de São Paulo*. Tese de Doutorado. São Paulo-SP. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 144p.

-
- Machado, A. T. (2000) *Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansividade das escórias de aciaria*. Dissertação de mestrado. São Paulo -SP. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 153p.
- Machado, I. F. (1995) *Recursos minerais, política e sociedade*. São Paulo: EDGARD BLÜCHER/CNPq/PRÓ-MINÉRIO, 410 p.
- Marino, R.H. (2004) *Utilização de areia de fundição em concreto*. Universidade de São Paulo. 121p.
- Masuro, A.B., Dal Molin, D.C.C., Vilela, A.C.F. (2004) Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria elétrica. *Revista Ambiente Construído*. Porto Alegre - RS. v. 4, n. 2, p. 57-81.
- Miranda, L.F.R., Selmo, S.M.S. (2001) Desempenho de revestimentos de argamassa com entulho reciclado. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*. Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/277. São Paulo-SP. 12p.
- Miranda, L.F.R. (2000) *Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – São Paulo-SP, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo-USP, 190p.
- Modenesi P.J. (2003) *Técnica operatória da soldagem SAW*. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). <http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol04.pdf>.
- Montgomery, D. G., Wang, G. (1991) Preliminary laboratory study of steel slag for blended cement manufacture. *Material Fórum*, número 4, p 374-382.

-
- Morete, G.F., Paranhos R.P.R., Holanda J.N.F. (2006) Aproveitamento de Resíduo de Escória de Soldagem em Materiais Cerâmicos para Construção Civil. *Revista Soldagem e Inspeção*. v.11, n.3, p141-146.
- Moura, W.A. (2000) *Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Porto Alegre-RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, 232p.
- Nakakura, E.H., Cincotto M.A. (2004) Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento. *Boletim técnico da Escola Politécnica da USP*. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo-SP.
- Nakakura, E.H. (2003) *Análise e classificação das argamassas industrializadas segundo a NBR 13 281 e a MERCUR*. Dissertação de mestrado em Engenharia. São Paulo-SP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, 224p.
- Paranhos, R., Souza A. C. (1999) *Soldagem a arco submerso*. Rio de Janeiro, SENAI/RJ-CETEC de Solda. 77p
- Penttalla, V. (1997). Concrete and sustainable development. *ACI Materials Journal*. Estados Unidos, Nº 5, V.94.
- Pera, J. (1996) State of the art report – use of waste materials in construction in western europe. *In: Workshop reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil*. Anais. São Paulo, p. 1-20.
- Pereira, A.F.R., Almeida, S.L.M. (2004) Obtenção de areia artificial da pedreira Vigné. *Série dos anais do XII Jornada de Iniciação Científica - JIC 2004*.
- Pimentel, U.H.O. (2005) *Utilização de resíduos da indústria de calçados em blocos de vedação com novas geometrias – Bloco Evang*. Dissertação (de mestrado em

engenharia urbana). João Pessoa-PB. Universidade Federal da Paraíba – UFPB. 139p.

Plano Nacional de Agregados (2006). Programa de capacitação de gestores de empresas mineradoras de agregados para a construção civil – *Ministério de Minas e Energia*. http://www.cetec.br/agregados/plano_agregados.htm em 04/2006

Rabelo, P. A. (1997) Pesquisa compara o setor dos agregados do Brasil e da França. Boletim *SINDAREIA - Sindicato das indústrias de Extração de Areia do Estado de São Paulo*, São Paulo, n. 14, p. 2-8.

Reciclagem.net – O portal da reciclagem e do meio ambiente. <http://www.compam.com.br/residuo.htm> em 05/06

Reis, B.J., Batista, G.B., Dias, A. J. (2003) *Recuperação de área degradada pela extração de areia no vale de Paraíba Paulista*. CEIVAP - Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, <http://www.ceivap.org.br/downloads/Beneditoeoutros.pdf> em 05/2006.

Revista Areia e Brita (2005) - número 30 - Abril/Maio/Junho de 2005

Revista Areia e Brita (1997) - número 01 - Maio de 1997

Revista Ciência Hoje - <http://cienciahoje.uol.com.br>, acessado em 01/05

Rocha, C.A.A., Désir, J.M., Dias, D.P., Viana, C.E. (2006) Estudo da durabilidade de argamassas contendo resíduos industriais. *Conferência Brasileira sobre Materiais e Tecnologias Não-Convencionais na Construção Ecológica e Sustentável. BRASIL NOCMAT 2006* – Salvador- BA. 12p.

-
- Rocha, J.C., Cheriaf, M. (2003) Aproveitamento de resíduos na construção. *Coletânea Habitar - Utilização de Resíduos na Construção Habitacional*, v. 4. p. 72-93.
- Rochas, Minerais e Minérios – Mineropar - Minerais do Paraná SA <http://www.pr.gov.br/mineropar/rocha.html>
- Roman, H.R. (1991) *Argamassas de assentamento para alvenarias*. Florianópolis-SC, Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Civil.
- Sbrighi, C., Helene P. (2005) Um panorama do uso das escórias siderúrgicas como agregado na construção civil. *Revista Areia e Brita* - n 30 - Abril/Maio/Junho de 2005: 22-26p.
- Salles, R. O. (2006). *Estudo experimental da durabilidade de geossintéticos através de procedimentos especiais de laboratório*. Dissertação de Mestrado. Campos dos Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, RJ, 122p.
- Selmo, S.M.S., Nakakura, E.H., Miranda, L.F.R, Medeiros, M.H.F., Silva, C.O. (2002) Propriedades e especificações de argamassas industrializadas de múltiplo uso. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*. Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/310. São Paulo-SP. 27p.
- Sindipedras – Sindicato da indústria de mineração de pedra britada do Estado de São Paulo. www.sindipedras.org.br , acesso em 03/06.
- Silva, N.G. (2006) *Argamassas de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária*. Dissertação (Mestrado) – Curitiba-PR, Universidade Federal do Paraná. 164 p.
- Silva, V.S., Liborio, J.B.L., Martinez, M. E. (2005) Chapiscos de baixa relação água/cimento com e sem adição da sílica da casca de arroz: estudo da aderência

em concretos estruturais. *Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil*. Vol. 2, n. 2, p. 142-156.

Silva Filho, A. F., Moura W. A., Leite R. da S. (2002), Caracterização de escória de ferro-cromo como agregado graúdo para a produção de concreto. *Sitientibus-Revista da Universidade Estadual de Feira de Santana – Bahia*, Feira de Santana, n.26, p.95-110.

Silva, E.F., Liparizi, F. B., Vasconcelos, A. R. (2001) Estudo da viabilidade sobre a substituição de agregados naturais por agregados provenientes da reciclagem de entulho de concreto. *Seminário “Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil: Materiais Reciclados e suas Aplicações”*. São Paulo – SP.

Silva, F.J. (1994) *Utilização de escoria de cobre como agregado miúdo em peças pré moldadas em concreto*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Niterói_RJ, Universidade Federal Fluminense – UFF.

Silva, H. V. (1988) Propostas para avaliar o impacto ambiental em mineração: primeira tentativa. *Revista Ambiente*, São Paulo: CETESB, v. 2, n. 2, p. 88-90.

Souza, V. C. M., Ripper T. (1998) *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*. São Paulo: Editora PINI

Sumário Mineral Brasileiro - Edições- 1999 a 2005 - Agregados para a Construção Civil. – Anepac.

Tartuce, R., Giovannetti, E. (1990) Princípios básicos sobre concreto de cimento Portland. Co-edição: IBRACON/PINI. 107p.

Tribel - Tratamento de Resíduos Industriais de Belford Roxo S.A,
<http://www.tribel.com.br> em 05/06

Universidade de São Paulo-USP (1997) Reciclagem na construção civil, alternativa econômica para proteção ambiental - *Anais de Seminário: 1997*.

Valverde, F.M. (2001) *Balanço mineral brasileiro 2001 - Agregados para a construção civil* - Anepac.

Valverde, F.M., Sintoni, A. (1994) Perfil da mineração de matérias-primas para construção civil no Estado de São Paulo. *In: Workshop recursos minerais não-metálicos para o estado de São Paulo*. Boletim de Resumos. Sociedade Brasileira de Geologia – Núcleo São Paulo, p. 31-34.

Vazquez, E. (2001) Aplicación de nuevos materiales reciclados em la construcción civil *In: Seminário desenvolvimento sustentável e reciclagem na construção civil. São Paulo, 5-6 jun, Anais*. São Paulo: IBRACON, 2001. p.11-21.

Whitaker, W. (2001) *Técnicas de preparação de areia para uso na construção civil*. Dissertação (Mestrado) - São Paulo-SP, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 153 p.

Zordan, S. E. (1997) *A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campinas_SP, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 156p

Zordan, S. E., Paulon, V. A., A utilização do entulho como agregado para o concreto; <http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm> em 01/2006.