

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Estudo de fibra alternativa de escória de alto-forno como reforço
em matrizes cimentícias**

Mara da Rocha Bassi

Porto Alegre
2010

MARA DA ROCHA BASSI

ESTUDO DE FIBRA ALTERNATIVA DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO COMO REFORÇO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

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

Porto Alegre
2010

MARA DA ROCHA BASSI

ESTUDO DE FIBRA ALTERNATIVA DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO COMO REFORÇO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

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

Porto Alegre, 12 de novembro de 2010

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
PhD, University of Leeds
orientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

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

Prof.^a. Rejane Maria Candiota Tubino (UFRGS)
Doutora, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Pesquisadora Alexandra Passuello (UFRGS)
Doutora, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Para minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, pelo apoio e pela confiança em mim colocada.

Aos colegas mestres e doutores do Leme, Luciane, Vânia, Estela, Larissa, Alexandre e Uziel, que sempre solidários tanto auxiliaram a colega arquiteta nesta jornada.

Aos bolsistas do Leme, Rose, Pedro, Marcelo Argenton (Age), Luiz Roberto (Menega), Josiane, Édina, Marcos, pela convivência e apoio, especialmente os queridos Josué, Diego (Sorriso) e Rafael, sempre eficientes e em clima de descontração na realização dos ensaios.

À UNIFRAX, por fornecer as fibras utilizadas na pesquisa.

À CAPES, pelo auxílio financeiro à pesquisa.

RESUMO

BASSI, M.R. **Estudo de fibra alternativa de escória de alto-forno como reforço em matrizes cimentícias**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Resíduos gerados em diversas indústrias têm sido aproveitados na produção de materiais buscando reduzir o impacto ambiental. No campo das fibras, materiais alternativos vem sendo produzidos em maior quantidade e ganhando destaque na fabricação de compósitos mais adequados ambientalmente. Entre estes produtos está a fibra de escória de alto-forno, microfibras cuja matéria-prima é originária da produção do ferro-gusa, que apresenta vantagens em seu processo produtivo citando-se custo reduzido e ganho ambiental ao proporcionar a ampliação da aplicabilidade de um subproduto gerado em elevada quantidade, tem despertado o interesse no seu uso como reforço de matrizes cimentícias. Neste sentido, a presente pesquisa visa avaliar se, além do benefício ambiental proporcionado pela utilização da fibra de escória em substituição a outras fibras convencionais, a aplicação deste produto pode proporcionar também benefícios técnicos ao incrementar o desempenho de matrizes cimentícias. Para tanto o programa experimental foi dividido em quatro etapas, sendo a etapa inicial de caracterização dos materiais empregados e da fibra de escória por meio de ensaios de Fluorescência de Raios X, Difração de Raios X e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A segunda etapa foi proposta buscando avaliar a afinidade existente entre fibra e matriz cimentícia através do ensaio de *Le Chatelier*. Destinou-se a terceira parte do programa experimental ao preparo dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios e a última para avaliação dos compósitos com relação à: Trabalhabilidade; Resistência à Tração na Flexão; Resistência à Compressão; Módulo de Elasticidade Dinâmico; Retração Restringida e Resistência ao Impacto. Os resultados não confirmaram a hipótese levantada, indicando que o desempenho da adição da fibra de escória em matrizes cimentícias foi insatisfatório, sendo constatada falha na distribuição da fibra através da produção de compósitos heterogêneos, com presença de aglomeração da fibra e incorporação de ar. Mesmo com o problema na dispersão da fibra, considerou-se com potencial promissor o resultado obtido no ensaio de retração restringida, onde foi possível verificar a atuação da microfibras de escória na distribuição das tensões permitindo o retardamento da fissuração nos anéis de argamassa reforçada. Estudos adicionais buscando melhorar a dispersão da fibra também não obtiveram bons resultados. Acredita-se que para fins de reforço em matrizes cimentícias a presença de resina adicionada à fibra de escória no seu processo de fabricação compromete a dispersão do material e, conseqüentemente, seu uso neste tipo de reforço.

Palavras-chave: compósitos; fibras alternativas; fibra de escória de alto-forno.

ABSTRACT

BASSI, M.R. **Study of alternative blast furnace slag fiber as reinforcement in cementitious matrices.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Waste generated in various industries have been utilized in the production of materials seeking to reduce the environmental impact. In the field of fibers, alternative materials have been produced in greater quantity and gaining prominence in the manufacture of composites more environmentally appropriate. Among these products is of blast furnace slag fiber, microfiber whose raw material is sourced from the production of pig iron, which has advantages in its production process by citing the cost savings and environmental gains by providing expansion of the applicability of a byproduct generated in large amounts, has stimulated interest in its use as reinforcement in cementitious matrices. In this sense, this research aims to assess whether, in addition to environmental benefits provided by the use of slag fiber as a substitute for other conventional fibers, application of this product may also offer technical benefits to increase the performance of cementitious matrices. For both the experimental program was divided into four phases, the initial step of characterization of materials used and the slag fiber by tests of X-ray Fluorescence, X-ray diffraction and scanning electron microscopy (SEM). The second step was proposed by assessing the affinity between fiber and cement matrix by testing of Le Chatelier. Allocated to third part of the experimental program to prepare the bodies of the test piece used in the tests and the final assessment for the composites with respect to: Workability; Tensile strength in bending, compressive strength, dynamic modulus of elasticity; Restrained and Retraction Impact Resistance. The results did not confirm the hypothesis, indicating that the performance of slag addition of fiber in cementitious matrices was unsatisfactory, and found fault in the distribution of fiber through the production of composite heterogeneous with the presence of fiber clustering and incorporation of air. Even with the problem in dispersion of fiber, it was considered a promising potential with test result of restrained shrinkage, where it was possible to verify the performance of micro stress distribution in the slag allowing delayed cracking in mortar reinforced rings. Additional studies seeking to improve the dispersion of the fiber also did not obtain good results. It is believed that for purposes of reinforcement in cementitious matrices the presence of resin added to the slag fiber in its manufacturing process compromises the dispersal of the material and hence its use in this type of reinforcement.

Keywords: composites; alternative fibers; blast furnace slag fiber.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 CONTEXTO	20
1.2 JUSTIFICATIVA	23
1.3 HIPÓTESES	24
1.4 OBJETIVOS	25
1.5 DELIMITAÇÕES	26
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	26
2 COMPÓSITOS DE MATRIZES CIMENTÍCIAS	28
2.1 ADIÇÃO DE FIBRAS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS	28
2.2 FATORES CONDICIONANTES DO DESEMPENHO DA ADIÇÃO DE FIBRAS.....	29
2.2.1 Características das matrizes cimentícias	29
2.2.2 Características das fibras	30
2.2.3 Teor de adição	34
2.2.4 Preparo de compósitos de argamassa	36
2.3 EFEITOS DA ADIÇÃO DE FIBRAS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS	37
2.3.1 Controle da fissuração	38
2.3.2 Melhoria do comportamento frente à retração	40
2.3.3 Alterações no módulo de elasticidade	43
2.3.4 Incremento no comportamento mecânico	44
2.3.5 Aumento na resistência ao impacto	46
2.4 PROBLEMAS ASSOCIADOS À ADIÇÃO DE FIBRAS	50
2.4.1 Perda de trabalhabilidade	50

2.4.2 Falha na dispersão das fibras	51
2.4.3 Incorporação de ar	52
2.4.4 Comportamento hidrofílico das fibras	53
2.4.5 Zona de transição fibra x matriz	54
2.5 TENDÊNCIAS NA ADIÇÃO DE FIBRAS	55
3 FIBRA DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	59
3.1 CARACTERÍSTICAS DA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	59
3.1.1 Processo de geração	59
3.1.2 Tipos de escória de alto-forno	60
3.1.3 Quantidade de escória gerada e suas destinações	62
3.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA FIBRA DE ESCÓRIA	64
3.3 CARACTERÍSTICAS DA FIBRA DE ESCÓRIA RECICLADA	66
3.4 CICLO DE VIDA DA FIBRA DE ESCÓRIA	68
3.4.1 Benefícios ambientais	69
3.4.2 Possíveis impactos ambientais	70
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	72
4.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA	72
4.2 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ESTUDO	74
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS	76
4.3.1 Agregado miúdo	76
4.3.2 Cimento	76
4.3.3 Aditivo	76
4.3.4 Água de amassamento	77

4.4 FASE 1: CARACTERIZAÇÃO BÁSICA DA FIBRA	77
4.4.1 Fluorescência de Raios X	77
4.4.2 Difração de Raios X	77
4.4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	79
4.5 FASE 2: AFINIDADE FIBRA X MATRIZ CIMENTÍCIA	79
4.5.1 Ensaio de <i>Le Chatelier</i>	79
4.6 FASE 3: DEFINIÇÃO DA ARGAMASSA PADRÃO	80
4.6.1 Traço	80
4.6.2 Mistura e Moldagem	80
4.6.3 Dimensão do Agregado e Preparação da Fibra	81
4.7 FASE 4: AVALIAÇÃO DAS ARGAMASSAS	83
4.7.1 Ensaio de Trabalhabilidade	83
4.7.2 Resistência à Tração na flexão	83
4.7.3 Resistência à Compressão	84
4.7.4 Estimativa de módulo de elasticidade dinâmico	84
4.7.5 Ensaio de Retração restringida	85
4.7.6 Ensaio de resistência ao impacto – tipo queda de esfera	88
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	91
5.1 FASE 1: RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA	91
5.1.1 Fluorescência de Raios X	91
5.1.2 Difração de Raios X	92
5.1.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	95
5.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE <i>LE CHATELIER</i>	97
5.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS COMPÓSITOS	99

5.4 ANÁLISE DA INFLUENCIA DA PREPARAÇÃO DA FIBRA	104
5.5 ANÁLISE DA INFLUENCIA DA DIMENSÃO DO AGREGADO	110
5.6 RESULTADOS DE TRABALHABILIDADE	115
5.7 RESULTADOS DE RESISTENCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	116
5.8 RESULTADOS DE RESISTENCIA À COMPRESSÃO	118
5.9 RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO ...	120
5.10 RESULTADOS DO ENSAIO DE RETRAÇÃO RESTRINGIDA	121
5.11 RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO – TIPO QUEDA DE ESFERA	127
5.11.1 Ensaio de queda de esfera 1 kg	127
5.11.2 Ensaio de queda de esfera 500g	130
5.12 CONSIDERAÇÕES SOBRE A DISPERSÃO DA FIBRA	132
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	135
6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	135
6.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS	136
6.2.1 Em relação à caracterização da fibra	136
6.2.2 Em relação à caracterização do compósito	137
6.2.3 Em relação à influência dos parâmetros de produção do compósito ..	138
6.2.4 Em relação à influência das variáveis de estudo	138
6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	140
REFERÊNCIAS	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: modelo de produção linear e aberto	20
Figura 1.2: ciclo de produção fechado	21
Figura 2.1: MEV da fibra de wolastonita fraturada em uma matriz cimentícia	32
Figura 2.2: diagrama tensão x deformação elástica	32
Figura 2.3: curva de tensão x deformação de matriz sem reforço, com adição de microfibras e de fibras longas no controle da fissuração	33
Figura 2.4: curvas típicas de tensão x deformação para ausência, baixo e alto teor de fibras	35
Figura 2.5: padrão de fissuras em matrizes submetidas a esforço de tração: matriz cimentícia sem adição de fibras; compósito reforçado com fibras.....	38
Figura 2.6: abertura de fissuras em anéis de argamassas no ensaio de retração restringida	42
Figura 2.7: evolução da retração no anel restringido de concreto de referência e com adição de fibras com relação de aspecto de 200	42
Figura 2.8: influência da adição de fibra no módulo de elasticidade de argamassas	44
Figura 2.9: regiões com pouca e muita concentração de fibra	52
Figura 2.10: ilustração qualitativa sobre o potencial de formação de vazios devido: ao contato de superfícies curvas de mesmo diâmetro; superfície curva com lisa; adição de fibras flexíveis	53
Figura 3.1: representação esquemática simplificada da geração de escória de alto-forno	59
Figura 3.2: ilustração esquemática do processo de fabricação do aço	60
Figura 3.3: representação esquemática dos diferentes tipos de escórias geradas na saída do alto-forno e os respectivos usos potenciais	61
Figura 3.4: geração de resíduos siderúrgicos por tipo em 2007: (a) destinação do agregado siderúrgico; (b) principais utilizações do agregado siderúrgico.	63
Figura 3.5: aplicação da escória de alto-forno: (a) no Brasil; (b) no mundo	63
Figura 3.6: processo de fabricação da fibra de escória de alto-forno	65
Figura 3.7: fibra de escória de alto-forno	68
Figura 3.8: funções relativas dos óxidos nos materiais vítreos	68

Figura 3.9: fluxo de inventário da fibra de escória	69
Figura 4.1: delineamento da pesquisa	73
Figura 4.2: difratogramas típicos de: material com estrutura cristalina; material amorfo	78
Figura 4.3 visão do equipamento de difração de Raios X usado no trabalho	78
Figura 4.4: ensaio de <i>Le Chatelier</i> : cura a frio; cura a quente	80
Figura 4.5: etapas do processo de mistura ao longo do tempo	81
Figura 4.6: agregado miúdo: (a) sem peneiramento; (b) passante em peneira com abertura de 2,4 mm; passante em peneira com abertura de 1,2 mm	82
Figura 4.7: uso do moinhos de bolas: (a) colocação da fibra no moinho; (b) funcionamento do equipamento; (c) resultado parcial da moagem da fibra; (d) resultado final do procedimento	82
Figura 4.8: ensaio de trabalhabilidade: (a) colocação do material no cone; (b) retirada do cone; (c) movimentação da mesa; (d) medição dos diâmetros	83
Figura 4.9: ensaio de resistência à tração na flexão: (a) calibração do LVDT; (b) rompimento do corpo de prova	84
Figura 4.10: ensaio de resistência à compressão	84
Figura 4.11: ensaio de módulo de elasticidade dinâmico: (a) passagem de camada de gel sobre os transdutores; (b) ensaio sendo realizado	85
Figura 4.12: dimensões dos anéis de aço e da argamassa	86
Figura 4.13: anéis de argamassa: (a) moldagem; (b) corpos-de-prova de argamassa após a retirada do anel externo	87
Figura 4.14: instrumentação do ensaio: (a) anel de aço instrumentado com extensômetros (<i>strain gages</i>); (b) software de aquisição de dados	87
Figura 4.15: câmara climatizada	88
Figura 4.16: ilustração esquemática da estrutura para realização dos ensaios de impacto	89
Figura 4.17: corpos-de-prova utilizados no ensaio de impacto: (a) moldagem das placas de argamassa; (b) aspecto final das placas moldadas	89
Figura 4.18: ensaio de impacto: (a) placa antes da queda da esfera; (b) primeira fissura na parte inferior; (c) primeira fissura na parte superior	90
Figura 4.19: ilustração esquemática do posicionamento dos deflectômetros	90

Figura 5.1: difratograma da fibra de escória de alto-forno	93
Figura 5.2: difratograma apenas do <i>shot</i> da fibra de escória de alto-forno	93
Figura 5.3: difratograma da argamassa de referência	94
Figura 5.4: difratograma da argamassa com adição da fibra de escória de alto-forno	95
Figura 5.5: imagens da fibra de escória obtidas em lupa microscópica com ampliações de: (a) 8x; (b) 20x; (c) 50x	96
Figura 5.6: MEV da fibra de escória com ampliações de: (a) 250x; (b) 500x; (c) 1.000x; (d) 2.500x	96
Figura 5.7: <i>Le Chatelier</i> – resultados da cura a frio	97
Figura 5.8: <i>Le Chatelier</i> – resultados da cura a quente	98
Figura 5.9: MEV da pasta produzida apenas com o <i>shot</i> da fibra nas ampliações de: (a) 2.500x; (b) 5.000x	98
Figura 5.10: MEV da superfície fraturada dos compósitos com ampliações de: (a) 250x; (b) 500x; (c) 1.000x; (d) 2.500x; (e) 5.000x; (f) 10.000x	100
Figura 5.11: MEV EDS de superfície de amostra fraturada, com ampliação de 500x e espectogramas indicados nos pontos 1 e 2	101
Figura 5.12: MEV EDS de superfície de amostra fraturada, com ampliação de 500x e espectogramas indicados nos pontos 1 e 2	101
Figura 5.13: MEV EDS de superfície de amostra fraturada, com ampliação de 2.000x e espectogramas indicados nos pontos 1 e 2	102
Figura 5.14: MEV da superfície fraturada de compósito rompido aos 91 dias de idade e produzido com agregado de dimensão máxima de 2,4 mm e fibra dispersa manualmente, nas ampliações de: (a) 50x; (b) 500x; (c) 1.000x; (d) 2.500x; (e) 5.000x	103
Figura 5.15: MEV da fibra de escória após tratamento mecânico para dispersão com ampliações de: (a) 500x; (b) 1.000x	105
Figura 5.16: problemas de dispersão das fibras	106
Figura 5.17: comparação dos métodos de dispersão da fibra de escória nas seguintes condições: (a) ao natural; (b) MEV da fibra ao natural com ampliação de 1.000x; (c) dispersa manualmente; (d) MEV da fibra dispersa manualmente com ampliação de 1.000x; (e) dispersa de forma mecânica; (f) MEV da fibra dispersa de forma mecânica com ampliação de 1.000x	107
Figura 5.18: resultados de resistência à tração na flexão de compósitos produzidos com agregado 2,4 mm comparando fibra dispersa de forma manual x mecânica (fibra moída)	108

Figura 5.19: análise estatística dos resultados de resistência à tração na flexão de compósitos produzidos com agregado 2,4 mm comparando fibra dispersa de forma manual x mecânica (fibra moída)	108
Figura 5.20: resultados de resistência à compressão de compósitos produzidos com agregado 2,4 mm comparando fibra dispersa de forma manual x mecânica (fibra moída)	109
Figura 5.21: análise estatística dos resultados de resistência à compressão de compósitos produzidos com agregado 2,4 mm comparando fibra dispersa de forma manual x mecânica (fibra moída)	109
Figura 5.22: resultados de resistência à tração na flexão nos compósitos produzidos com fibra dispersa manualmente comparando agregado 4,8 mm x 2,4 mm	110
Figura 5.23: análise estatística dos resultados de resistência à tração na flexão nos compósitos produzidos com fibra dispersa manualmente comparando agregado 4,8 mm x 2,4 mm	111
Figura 5.24: resultados de resistência à compressão nos compósitos produzidos com fibra dispersa manualmente comparando agregado 4,8 mm x 2,4 mm	111
Figura 5.25: análise estatística dos resultados de resistência à compressão nos compósitos produzidos com fibra dispersa manualmente comparando agregado 4,8 mm x 2,4 mm	112
Figura 5.26: resultados de resistência à tração na flexão nos compósitos produzidos com fibra dispersa mecânica comparando agregado 1,2 mm x 2,4 mm	112
Figura 5.27: análise dos resultados de resistência à tração na flexão nos compósitos produzidos com fibra dispersa mecânica comparando agregado 1,2 mm x 2,4 mm ..	113
Figura 5.28: resultados de resistência à compressão nos compósitos produzidos com fibra dispersa mecânica comparando agregado 1,2 mm x 2,4 mm	113
Figura 5.29: análise dos resultados de resistência à compressão nos compósitos produzidos com fibra dispersa mecânica comparando agregado 1,2 mm x 2,4 mm ..	114
Figura 5.30: trabalhabilidade dos compósitos produzidos com e sem o emprego de aditivo, produzidos com fibra dispersa manualmente e agregado sem passar por peneiramento	115
Figura 5.31: ensaio de resistência à tração na flexão nos compósitos produzidos com agregado passante em peneira com abertura de 2,4 mm e fibra dispersa de forma manual	116
Figura 5.32: análise estatística dos resultados de resistência à tração na flexão nos compósitos produzidos com agregado passante em peneira com abertura de 2,4 mm e fibra dispersa de forma manual	117

Figura 5.33: curvas de tensão x deformação para resistência à tração na flexão dos compósitos com idade de 28 dias	118
Figura 5.34: ensaio de resistência à compressão nos compósitos produzidos com agregado passante em peneira com abertura de 2,4 mm e fibra dispersa de forma manual	118
Figura 5.35: análise estatística dos resultados de resistência à compressão nos compósitos produzidos com agregado passante em peneira com abertura de 2,4 mm e fibra dispersa de forma manual	119
Figura 5.36: curvas de tensão x deformação à compressão dos compósitos com idade de 28 dias	120
Figura 5.37: módulo de elasticidade dinâmico (GPa) das argamassas produzidas com agregado de dimensão máxima de 2,4 mm, aos 28 dias de idade	121
Figura 5.38: efeito da adição da fibra de escória no módulo de elasticidade e na densidade endurecida das argamassas produzidas com agregado de dimensão máxima de 2,4 mm	121
Figura 5.39: evolução das deformações do anel restringido em cada extensômetro da argamassa de referência	122
Figura 5.40: evolução das deformações do anel restringido em cada extensômetro do teor de adição 0,3% da fibra de escória	122
Figura 5.41: evolução das deformações do anel restringido em cada extensômetro do teor de adição 0,6% da fibra de escória	123
Figura 5.42: evolução das deformações do anel restringido em cada extensômetro do teor de adição 0,9% da fibra de escória	123
Figura 5.43: evolução das deformações do anel restringido em cada extensômetro do teor de adição 1,5% da fibra de escória	123
Figura 5.44: evolução das deformações do anel restringido em cada extensômetro do teor de adição 3% da fibra de escória	124
Figura 5.45: valores médios obtidos para a evolução das deformações de todos os anéis restringidos	124
Figura 5.46: microfissuras encontradas na argamassa de referência por meio de lupa microscópica com ampliação de 50x	126
Figura 5.47: microfissuras encontradas na argamassa com adição de 0,9% de fibra de escória por meio de lupa microscópica com ampliação de 50x	126
Figura 5.48: ensaio de impacto com queda de esfera com peso de 1kg	128

Figura 5.49: MEV da superfície fraturada de placa de argamassa reforçada com teor de 3% de fibra de escória, nas ampliações de: (a) 500x; (b) 1.000x; (c) 2.500x	129
Figura 5.50: ensaio de impacto com queda de esfera com peso de 500g – variando altura de queda	131
Figura 5.51: ensaio de impacto com queda de esfera com peso de 500g – altura de queda fixa	132
Figura 5.52: forno elétrico utilizado no aquecimento das fibras com temperatura de 400°C e 600°C	133
Figura 5.53: fibra de escória após aquecimento de: (a) 400°C e 600°C	133
Figura 5.54: (a) equipamento de ultrassom; (b) pequena quantidade de fibra dispersada no recipiente utilizado no ensaio	134
Figura 5.55: (a) fibra de escória na condição natural; (b) materiais resultantes da passagem pelo equipamento de ultrassom	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: propriedades de diversos tipos de fibras	31
Tabela 2.2: investigações realizadas por diferentes pesquisadores utilizando fibra de polipropileno para controle da fissuração	39
Tabela 2.3: levantamento de dimensões utilizadas no ensaio do anel	41
Tabela 2.4: levantamento de métodos de ensaio de impacto	47
Tabela 3.1: composição física da fibra de escória de alto-forno	66
Tabela 3.2: composição química da fibra de escória de alto-forno	67
Tabela 4.1: variáveis de estudo	75
Tabela 4.2: parâmetros controláveis	75
Tabela 4.3: matriz experimental dos ensaios de trabalhabilidade e mecânicos	75
Tabela 4.4: matriz experimental dos ensaios de impacto	75
Tabela 4.5: matriz experimental dos ensaios de módulo de elasticidade	75
Tabela 4.6: matriz experimental dos ensaios de retração restringida	75
Tabela 4.7: caracterização granulométrica do agregado miúdo	76
Tabela 5.1: ensaio fluorescência de Raios X da fibra de escória	92
Tabela 5.2: resultados médios dos tempos de propagação da onda ultrassônica, da densidade endurecida dos corpos-de-prova e do módulo de elasticidade dinâmico ..	123
Tabela 5.3: resultados do ensaio de resistência ao impacto – queda de esfera de 1kg....	127
Tabela 5.4: resultados do ensaio de resistência ao impacto com esfera de 500g - variando altura de queda	130
Tabela 5.5: resultados do ensaio de resistência ao impacto com esfera de 500g - altura de queda fixa	131

LISTA DE SÍMBOLOS

E: módulo de deformação dinâmico (GPa)	85
ρ : densidade do corpo de prova (kg/ m^3)	85
V: velocidade de pulso (km/s)	85
V: coeficiente de Poisson	85

1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo introdutório apresenta o tema de pesquisa, justificando sua escolha e contextualizando o estudo. São apresentados, ainda, a hipótese de pesquisa, os objetivos, as delimitações e a estrutura do trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO

O crescimento populacional, aliado ao déficit habitacional e à necessidade de provisão de infra-estrutura adequada para as nações em desenvolvimento, tem impulsionado a indústria da construção civil e, conseqüentemente, incrementado a demanda por materiais construtivos. Em virtude desta demanda crescente, as indústrias de extração ou fabricação de insumos da construção vem elevando sua produção, aumentando sua pegada ambiental, com grande consumo de energia e geração de resíduos.

Por outro lado, a consciência de que é necessário buscar alternativas de desenvolvimento sustentável para assegurar a qualidade de vida e a sobrevivência humana vem se consolidando. Buscando aplicar os preceitos de desenvolvimento sustentável à construção, nota-se uma preocupação com a adaptação dos ciclos produtivos, passando do modelo aberto para o modelo de ciclo fechado de construção.

Como explica John (2000), o modelo linear e aberto, representado na Figura 1.1, não é compatível com a situação atual de exploração dos recursos naturais e energéticos, pois acarreta uma elevada geração de resíduos, não se preocupando com o equilíbrio ambiental. Já o ciclo fechado, mostrado na Figura 1.2, se propõe a aplicar os princípios de redução de desperdícios, reuso e reciclagem para reduzir o impacto ambiental.

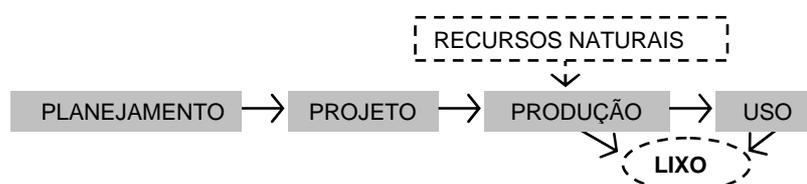


Figura 1.1 – Modelo de produção linear e aberto (adaptado de John, 2000).

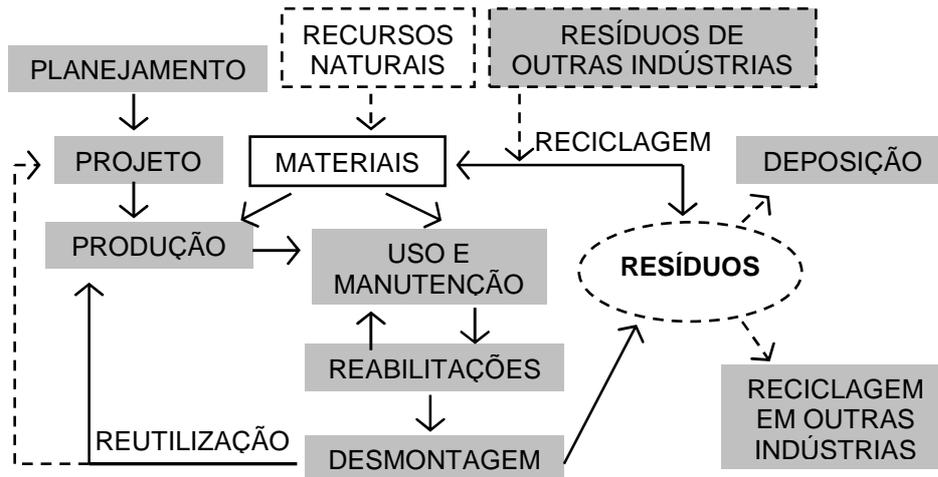


Figura 1.2 – Ciclo de produção fechado (adaptado de John, 2000).

John (2000) ressalta que, devido às inevitáveis perdas ocorridas nos processos de produção e às impurezas existentes nas matérias-primas, provavelmente o ciclo nunca chegará a ser totalmente fechado. Mas a adoção de filosofias com essa orientação pode ajudar a tornar a construção mais sustentável.

Em uma visão abrangente, os ciclos são adotados para tentar aproximar a construção civil do conceito de desenvolvimento sustentável, considerado um processo que leva a mudanças na exploração de recursos, na direção dos investimentos, na orientação do desenvolvimento tecnológico e nas mudanças institucionais, visando à harmonia e ao entrelaçamento das aspirações e necessidades humanas presentes e futuras. Este conceito não implica somente em multidisciplinaridade, mas envolve também mudanças culturais, educação ambiental e visão sistêmica (ÂNGULO et al, 2001).

A necessidade da realização de ações voltadas para o desenvolvimento sustentável é incontestável. Segundo John (2000), através do aprimoramento da tecnologia é possível reciclar diferentes resíduos e subprodutos oriundos de outras indústrias e inseri-los em substituição ao uso dos recursos naturais no desenvolvimento de materiais construtivos. O pesquisador cita alguns benefícios obtidos na reciclagem, entre eles: redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados; redução do consumo de energia durante o processo de produção; e redução da poluição ao emitir menor quantidade de gás carbônico a partir da diminuição do uso de cimento Portland.

Silva (2005) destaca que a construção civil pode ocupar um papel de destaque no processo de desenvolvimento sustentável devido ao seu elevado potencial como indústria recicladora. O mesmo considera que o setor é um dos que mais apresenta possibilidades de

aproveitamento de grandes quantidades de subprodutos industriais, pois sua cadeia produtiva abrange diferentes etapas e consome significativo volume de recursos materiais e energéticos.

Rocha e Cheriaf (2003) relatam outro fator que contribui para esta realidade, referente à composição química de muitos resíduos, predominantemente formada por silicatos, aluminatos e óxidos alcalinos, os mesmos compostos constituintes dos materiais de construção, favorecendo assim a ocorrência de compatibilidade entre eles. Segundo esses autores, os subprodutos gerados pela indústria siderúrgica apresentam composição química muito compatível com a matriz cimentícia, com destaque para escória de alto-forno, que já tem aplicação consolidada na construção civil, mas será objeto de interesse dessa pesquisa, ao ser aplicada na forma de fibras.

Observa-se que, no campo da adição de fibras a matrizes cimentícias - técnica de reforço que vem sendo cada vez mais estudada e aplicada – os procedimentos de reciclagem vem contribuindo para disponibilizar novas fibras, com características interessantes e diferenciadas, tais como as fibras de borracha de pneu, estudadas por Albuquerque (2005).

Existe um interesse em averiguar se algumas dessas fibras recicladas, de baixo custo econômico e ambiental, podem se constituir em alternativas adequadas para substituição do amianto, fibra mineral amplamente utilizada para fabricação de fibrocimento, que tem um grande desempenho técnico mas apresenta perigo à saúde. Como explica a FAPESP (2008), os fragmentos de amianto liberados na fabricação ou perfuração de peças é um material comprovadamente cancerígeno, que podem causar silicose nos pulmões. Por isso vários locais estão proibindo seu uso. No Brasil, o Estado de São Paulo foi pioneiro ao aprovar a Lei 12.684/07, que determina a proibição do uso de produtos, materiais ou artefatos que contenham quaisquer tipos de amianto ou asbesto.

Com a proibição de uso do amianto foi gerada uma demanda por fibras alternativas, capazes de substituir o mesmo na fabricação de telhas, caixas de água e várias outras peças em fibrocimento. Essa disposição vem impulsionando o desenvolvimento de pesquisas com diversos tipos de fibras naturais e sintéticas.

Dentro desse panorama, a pesquisa de fibras recicladas desperta interesse especial, pois oferece a possibilidade de abrir oportunidades para o aproveitamento de resíduos de outras indústrias, trazendo benefícios ambientais. Desta forma, foram firmadas várias parcerias entre o meio acadêmico e indústrias geradoras de resíduos, para investigar fibras alternativas derivadas de resíduos agroindustriais e siderúrgicos.

Nos últimos anos a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e uma empresa fabricante de fibras desenvolveram um projeto de pesquisa que resultou no desenvolvimento de um novo tipo de fibra reciclada, produzida a partir da escória de alto-forno. Esse novo material, que pode ser considerado uma microfibras, devido às suas dimensões reduzidas, é um produto ambientalmente correto, que não oferece riscos à saúde e é biocompatível (UNIFRAX, 2008). Essas fibras foram usadas, inicialmente, para fabricação de mantas de isolamento acústico ou proteção térmica.

Mais recentemente, desde 2007, a empresa fabricante iniciou estudos para averiguar se as fibras de escória reciclada poderiam ser usadas como substitutos do amianto para fabricação de fibrocimento a ser empregado em telhas e reservatórios de água. Essa fibra reciclada despertou o interesse do Grupo de Pesquisa LEME, que há 10 anos desenvolve estudos acerca de materiais reforçados com fibras, resultando na proposição da presente pesquisa, que tem o intuito de aprofundar a investigação sobre o material, avaliando o potencial de uso do mesmo para reforço de matrizes cimentícias.

1.2 JUSTIFICATIVA

A geração de escória de alto-forno é uma consequência inevitável do processo de fabricação do aço, sendo a mesma proveniente do processo de refino do ferro-gusa, devido à presença de impurezas. A escória é gerada em grandes quantidades e, apesar de ter algumas destinações, ainda não é completamente aproveitada. Uma parte é reciclada na própria indústria siderúrgica, outra é granulada e destinada às cimenteiras, para ser aplicada como aglomerante na produção de cimento Portland. Contudo, existe, ainda, um excesso de produção que é descartado em aterros, comprometendo o meio ambiente e resultando em perdas financeiras.

A fibra de escória de alto-forno, produzida a partir da escória, apresenta uma série de benefícios ambientais que justificam a realização de estudos para avaliação de seu potencial para reforço de matrizes cimentícias. O uso desta fibra, além de ampliar a aplicabilidade da escória, proporciona uma nova forma de reciclagem deste refugo siderúrgico, ajudando a preservar o meio ambiente.

Outro fator interessante que justifica o interesse pelo estudo da fibra reciclada de escória de alto-forno é que o seu processo de fabricação é menos impactante, pois requer muito menos energia que o de outras fibras, visto que a escória é processada para fabricação da fibra ainda no estado líquido. Este aproveitamento da energia já dispendida para produção do

ação contribui para reduzir o gasto energético e, conseqüentemente, reduz a contribuição para o aquecimento global, um dos impactos ambientais mais preocupantes atualmente.

A fibra de escória apresenta outras vantagens em comparação com outras fibras comumente adicionadas em matrizes cimentícias. A mesma é mais barata que a maioria das fibras sintéticas e mais durável que as fibras vegetais. Ghavami e Tolêdo Filho (1992), citados por Picanço e Ghavami (2008), destacam alguns aspectos negativos das fibras vegetais que não são observados na fibra de escória, entre eles: baixo módulo de elasticidade e necessidade de tratamento para evitar sofrer ataques de fungos e insetos, além da grande variabilidade de propriedades dentro de uma mesma espécie vegetal.

Diante destas questões, considera-se que se justifica o desenvolvimento de um estudo específico sobre a adição de fibras de escória reciclada em matrizes cimentícias. É fundamental avaliar o potencial de uso e as conseqüências do uso desse material. A boa técnica recomenda que todos os novos produtos tenham seu desempenho testado e avaliado, de forma a caracterizar os efeitos provocados pela sua aplicação.

Dessa forma, a presente pesquisa se propõe a estudar o comportamento de matrizes cimentícias reforçadas pela adição da fibra de escória de alto-forno. Almeja-se com esse trabalho contribuir para o avanço do conhecimento na área de aplicação do produto, bem como coletar dados que possam ajudar a subsidiar o desenvolvimento de compósitos reforçados com adição de fibras recicladas.

1.3 HIPÓTESES

O trabalho proposto tem como premissa principal que o uso da fibra de escória reciclada para reforço de matrizes cimentícias é desejável, pois propicia o aproveitamento da escória, evitando o descarte em aterros industriais, contribuindo para que se aproxime o processo a um ciclo de produção fechado.

Partindo desta premissa, foram formuladas as seguintes hipóteses de trabalho:

- a adição da fibra de escória de alto-forno, além de trazer ganhos ambientais, é viável tecnicamente, pois ocasiona melhoras no desempenho mecânico de compósitos de matrizes cimentícias equivalente ao de outras fibras, proporcionando aumento na resistência à tração;

- a adição da fibra de escória pode proporcionar um comportamento pseudo-dúctil da matriz cimentícia, aumentando sua capacidade de absorver tensões frente a esforços de retração restringida;
- sendo uma microfibrilha, a fibra de escória pode contribuir significativamente para melhorar o desempenho ao impacto de compósitos de matrizes cimentícias, proporcionando ganho de tenacidade.

1.4 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo principal avaliar o comportamento de compósitos de argamassa reforçados com a adição de fibra de escória de alto-forno, analisando as implicações originadas por este reforço, de forma a contribuir para que se verifique a viabilidade de uso desse material reciclado.

Foram estabelecidos, ainda, os seguintes objetivos específicos:

- realizar uma caracterização básica da fibra de escória de alto-forno;
- analisar a interação entre fibra e matriz cimentícia;
- estudar a influência que a adição de diferentes teores da fibra exerce na trabalhabilidade dos compósitos de argamassa;
- avaliar a influência que parâmetros controláveis como forma de dispersão da fibra e dimensão do agregado podem exercer no desempenho mecânico das argamassas reforçadas;
- verificar as modificações provocadas pela adição da fibra em diferentes teores no módulo de elasticidade dos compósitos;
- avaliar os efeitos provocados pela variação dos teores de adição da fibra no desempenho mecânico dos compósitos (resistência à tração na flexão e à compressão), na capacidade de absorver tensões provocadas por retração restringida e na resistência ao impacto.

1.5 DELIMITAÇÕES

Considerando que o envolvimento de um grande número de variáveis poderia dificultar a obtenção de conclusões estatisticamente confiáveis, e objetivando identificar os efeitos causados nas argamassas pela adição da fibra de escória com relação à trabalhabilidade, resistência mecânica, ao impacto e retração restringida, optou-se pela produção dos compósitos com traço e relação água/cimento mantidos fixos.

Com relação à fibra de escória de alto-forno, considerando que o material apresenta forma estável fixa, optou-se pela não realização de ensaios de lixiviação. Foi dada atenção especial à condição apresentada pela fibra de ser constituída por flocos, tornando necessária sua dispersão antes de empregá-la como reforço em matrizes cimentícias. Contudo, não foram estudadas adições de reagentes químicos, buscando analisar a adição da fibra *in natura*, de forma a tornar a pesquisa ambientalmente mais adequada.

Por se tratar do estudo de uma microfibras, não foram elaborados ensaios de arrancamento, sendo a aderência entre fibra e matriz verificada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Também, devido a limitações de tempo e recursos, em função da complexidade dos experimentos não foram desenvolvidos para os compósitos ensaios de durabilidade.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos. No Capítulo 1 o tema de estudo foi contextualizado, sendo apresentadas a justificativa, hipóteses e delimitações, além dos objetivos geral e específicos.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica das características dos compósitos de matrizes cimentícias, sendo identificados os principais efeitos obtidos com a adição de fibras, bem como problemas associados à técnica. Também são relatadas as características das fibras que mais exercem influência sobre o desempenho do reforço.

O Capítulo 3 contém a descrição da fibra de escória de alto-forno, no qual são relatados aspectos como: processo de fabricação, propriedades do material, além de seu ciclo de vida. O capítulo também apresenta dados referentes à escória de alto-forno, sendo informado seu processo de geração, tipo de escória, estimativa de quantidade gerada e aplicações fornecidas ao subproduto.

No Capítulo 4 é apresentado o programa experimental, dividido em: etapa inicial de caracterização dos materiais empregados, com destaque para a fibra de escória de alto-forno; etapa de análise da interação entre fibra e matriz cimentícia; etapa para confecção dos corpos-de-prova; e etapa final de realização de ensaios e avaliação dos compósitos produzidos.

O Capítulo 5 apresenta a análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios realizados no programa experimental com os compósitos de argamassa reforçados pela adição da fibra de escória de alto-forno.

Por fim, o Capítulo 6 abrange considerações finais a respeito do alcance dos objetivos estabelecidos e também sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 COMPÓSITOS DE MATRIZES CIMENTÍCIAS

Esse capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre compósitos de matrizes cimentícias, incluindo temas como os fatores que influenciam no desempenho da técnica de adição de fibras, citando características das matrizes cimentícias e das fibras, teor de adição, e condições de preparo dos compósitos. Também são relatados os principais efeitos esperados com adição de fibras. Considerou-se importante ressaltar os possíveis problemas associados à produção dos compósitos de matrizes cimentícias, que apresentam influência direta no seu desempenho, citando-se: perda de trabalhabilidade, incorporação de ar, falhas na dispersão das fibras, fratura e comportamento hidrofílico da fibra, além da zona de transição fibra x matriz. Para finalizar o capítulo buscou-se identificar as tendências de desenvolvimento nas técnicas de adição de fibras.

2.1 ADIÇÃO DE FIBRAS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

A adição de fibras se consolidou como técnica amplamente empregada para melhorar o comportamento de matrizes cimentícias que apresentam rupturas frágeis por natureza. Mehta e Monteiro (1994) destacam que, desde o tempo dos egípcios, a palha era empregada para reforçar tijolos de barro. Os autores também citam a existência de evidências que postes eram confeccionados com argila há cerca de 5.000 anos e recebiam reforço pela incorporação de fibras de asbesto.

Segundo Brandt (2008), o reforço com fibras foi desenvolvido nos tempos modernos a partir da tecnologia chamada de Hatschek, inventada para reforçar matrizes cimentícias frágeis com adição de fibras de amianto, usada na produção de telhas, canos, entre outras. O reforço de matrizes cimentícias empregando fibra de amianto foi amplamente difundido, com desempenho considerado satisfatório, fator atribuído as propriedades características do material, especialmente sua capacidade de permitir a produção de estruturas leves, esbeltas e resistentes (FIGUEIREDO, 2000).

No entanto, como o amianto é um produto comprovadamente cancerígeno, com uso proibido em muitos países, inúmeras tentativas para sua substituição, através da aplicação de fibras alternativas, principalmente as de origem vegetal, foram estudadas por diversos

pesquisadores (PICANÇO; GHAVAMI, 2008; COUTTS, 2005; RAMAKRISHNA; SUNDARARAJAN, 2005; SALES, 2006; SAVASTANO Jr.; DANTAS; AGOPYAN, 1994; SAVASTANO Jr.; SANTOS, 2008).

O problema, segundo Coutts (2005), é que as fibras vegetais constituem um importante material construtivo que pode ser aplicado em edificações de baixo custo, mas ainda existem limitações quanto à durabilidade dos compósitos produzidos.

Com o desenvolvimento tecnológico, diferentes tipos de fibras foram criados e pesquisados, ocasionando o surgimento de novos produtos que buscam atender às condições de desempenho e melhoria contínua exigidas para produção dos compósitos nos tempos atuais. O campo das fibras também foi influenciado pelas questões relativas à sustentabilidade, sendo que a necessidade de minimizar a quantidade de resíduos gerados e a preocupação com os impactos ambientais provocados nos processos produtivos tornaram-se requisitos na busca por materiais reciclados e menos poluentes.

Neste contexto, compósitos produzidos empregando fibras alternativas ambientalmente mais adequadas, entre elas as fabricadas a partir de resíduos, têm sido cada vez mais difundidas. Por exemplo, pneus e garrafas PET, materiais preocupantes em função da elevada quantidade gerada, vêm sendo reciclados para a confecção de fibras. Essas podem ser adicionadas a argamassas e concretos, representando alternativas viáveis do ponto de vista econômico e ambiental, devido à sua grande disponibilidade e possibilidade de utilização de um resíduo pós-consumo (RIZZON *et al.*, 2008).

2.2 FATORES CONDICIONANTES DO DESEMPENHO DA ADIÇÃO DE FIBRAS

Diversos pesquisadores afirmam que, para se obter o desempenho esperado com a adição de fibras devem ser considerados alguns fatores condicionantes, como as características da matriz cimentícia, das fibras adicionadas, o teor de adição, além das condições empregadas no preparo dos compósitos. A seguir são relatados os aspectos citados.

2.2.1 Características das matrizes cimentícias

Savastano Jr. (1992) descreve matrizes cimentícias como composições de aglomerantes minerais e de agregados, que dão origem a concretos, argamassas ou pastas, conforme as necessidades de uso. Essas constituem elementos com ruptura frágil, apresentando limitada resistência à tração. Mehta e Monteiro (1994) explicam que a ruptura ocorre, por exemplo,

no caso do concreto, ao ser submetido a tensões externas, verificando-se o aumento das microfissuras existentes na zona de transição entre a matriz e os agregados graúdos, ficando suscetível ao rompimento.

Outra característica considerada intrínseca às matrizes cimentícias, especialmente as argamassas, é a alta porosidade. Silva (2006) explica que tal fato se deve à estrutura interna da matriz, constituída por diferentes sólidos (cristais de hidratação e partículas de agregado) e por água, sobretudo com uma elevada relação água/cimento. A autora relata, ainda, como a porosidade afeta a resistência mecânica das argamassas, havendo na região próxima aos vazios uma elevada concentração de tensões quando o corpo está sob carga. Esta concentração de tensões, em um volume que oferece baixa resistência, favorece o aparecimento de rupturas microscópicas, que podem se transformar em fissuras prejudiciais ao desempenho mecânico do elemento.

Levando em consideração que a massa específica é inversamente proporcional à porosidade, como explica Silva (2006), argamassas mais densas tendem a restringir mais a deformação, ao contrário das argamassas menos densas que, devido à sua porosidade, contribuem para a ocorrência de pequenas deformações.

Dessa forma, características como relação água/ cimento, volume, formato e, principalmente, o tamanho dos poros, que são afetados pela adição de fibras, constituem fatores relevantes nas propriedades mecânicas dos compósitos de argamassas.

2.2.2 Características das fibras

Sabe-se que características como o tipo, a densidade específica, o módulo de elasticidade, fator de forma, teor de adição, além do grau de aderência das fibras com a matriz cimentícia, afetam o comportamento mecânico do compósito e o desempenho do componente fabricado. Bernardi (2003) considera que cada tipo de fibra contribui diferentemente com a melhoria das propriedades dos compósitos, justificando estudar cada fibra em separado, de forma a entender como se poderiam maximizar os benefícios da utilização da mesma. A Tabela 2.1 apresenta as principais propriedades para diversos tipos de fibras usados ou pesquisados atualmente.

Tabela 2.1 – Propriedades para diversos tipos de fibras (baseado em BENTUR; MINDESS, 1990)

MATERIAL	DIÂM. (μm)	DENSID. ESPEC. (g/cm^3)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (GPa)	DEFORMAÇÃO NA RUPTURA (%)	TEORES TÍPICOS VOLUME (%)
ACRÍLICO	18	1,18	14 - 19,5	0,4 – 1,0	3	X
AÇO	5 - 500	7,84	190 - 210	0,5 – 2,0	0,5 - 3,5	0,5 - 2
AMIANTO	0,02-0,4	2	10 - 200	3 - 3,5	2-3	10*
CARBONO	9	1,9	230	2	1	2-12
CELULOSE	X	1,2	10	0,3 – 0,5	X	1-5
ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	3,5	2,6	50	0,55	X*	X
FIBRA DE MADEIRA	X	1,5	71	0,9	X	X
NYLON	X	1,1	4	0,9	13 – 15	X
POLIETILENO	X	0,95	0,3	$0,7 \times 10^{-3}$	10	X
POLIPROPILENO	20-200	0,9	5 - 7,7	0,5 - 0,75	8	0,2 - 2
SISAL	10-50	1-50	X	0,8	3	1-5
VIDRO	9-15	2	70 -80	2-04	2 - 3,5	1-8
WOLASTONITA	5-100	2,9	120	X	X	11,5*
MATRIZ CIMENTÍCIA	X	2,5	10-45	$3,7 \times 10^{-3}$	0,02	0

* Compósitos produzidos através do método de Hatschek.

Cabe notar que certos tipos de fibras apresentam características que podem impor limitações à sua utilização, como salienta Gomes (2007). Por exemplo, o asbesto é cancerígeno, o vidro possui baixa resistência química; o aço apresenta problemas de corrosão e densidade elevada; o carbono é considerado frágil, não tem boa aderência e seu custo é alto; as fibras vegetais têm pequena durabilidade; e o polietileno e o polipropileno comum não são aderentes e possuem alto custo. Cada fibra, todavia, possui pontos fortes e pode ser útil em determinadas circunstâncias.

A busca pela superação destas limitações impulsionou o desenvolvimento de novas fibras. Ma et al (2005) relatam como exemplo dessa tendência o surgimento da wolastonita, fibra com elevado módulo de elasticidade. A wolastonita é um metassilicato de cálcio (CaOSiO_2) que possui uma composição típica de 48,3% de óxido de cálcio (CaO) e 51,7% de dióxido de silício (SiO_2), podendo apresentar pequenas quantidades de alumínio, ferro, magnésio, potássio e sódio. Na Figura 2.1 tem-se uma imagem desse material, que apresenta morfologia acicular, resultado da transformação metamórfica de rochas carbonáceas contendo quartzo. Silva (2004) relata que a wolastonita é utilizada principalmente em substituição do amianto na produção de cerâmica, tintas e plásticos. Também é usada em adesivos, produtos sujeitos à fricção e refratários, entre outros.

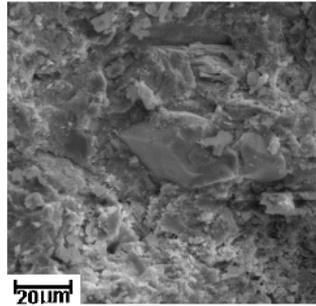


Figura 2.1 – MEV da fibra de wolastonita fraturada em uma matriz cimentícia (SILVA, 2004).

A empresa Unifrax produz no Brasil, através do processo de *spinning* (rodas giratórias), fibras cerâmicas com propriedades semelhantes às da wolastonita, fato importante, pois as reservas para extração da mesma estão cada vez mais escassas.

O módulo de elasticidade é considerado uma das características mais importante nas fibras, pois juntamente com a resistência mecânica, de acordo Figueiredo (2005), são propriedades responsáveis por definir a capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar à matriz cimentícia. Na Figura 2.2, Figueiredo (2000) representa esquematicamente o comportamento de uma matriz hipotética reforçada com dois tipos de fibras: uma de baixo módulo de elasticidade e outra de alto módulo, sendo admitido que todas apresentam um comportamento elástico perfeito. A curva de tensão por deformação da matriz está representada pela linha 0-A, enquanto as linhas 0-B e 0-C representam o trabalho elástico das fibras de alto módulo de elasticidade com alta e baixa resistência, respectivamente.

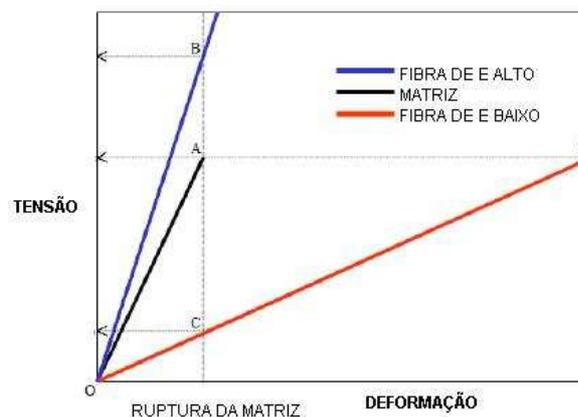


Figura 2.2 – Diagrama tensão x deformação elástica (FIGUEIREDO, 2000).

De acordo com Figueiredo (2000), o módulo de elasticidade de uma matriz cimentícia varia no tempo, especialmente nas primeiras idades. Em alguns casos, as fibras são empregadas justamente para elevar o módulo do compósito em idades baixas. É o caso do emprego de fibras em argamassas de revestimento. Entretanto, para o autor, os cimentos atuais, em

conjunto com os aditivos aceleradores de pega e redutores de água, propiciam um elevado ganho de resistência inicial, e em paralelo, um rápido incremento do módulo de elasticidade.

Outra propriedade das fibras que influencia diretamente o desempenho da adição é o fator de forma, também conhecido como relação de aspecto, definido pela relação entre o comprimento da fibra e seu diâmetro. Trata-se da geometria da fibra, sendo considerado um dos principais parâmetros para sua caracterização. Gomes (2005) ressalta que na prática, devido ao extenso campo dos diâmetros e comprimentos observados, pode se tornar difícil caracterizar ou distinguir uma fibra somente por esta relação, devendo ser considerados em conjunto outros parâmetros como módulo de elasticidade e densidade da fibra.

Para Nunes e Agopyan (1998) o aumento no fator de forma tende a representar melhora na resistência ao arrancamento da fibra ou um aumento no número de fibras que podem interceptar uma fissura ou até os dois casos simultaneamente. Sales (2006), entretanto, destaca que quando se tem uma relação de aspecto muito alta, as fibras podem se enrolar durante a mistura, resultando em uma má distribuição das mesmas no compósito.

Fibras com dimensões reduzidas têm sido muito utilizadas. Segundo Betterman, Ouyang e Shah (1995), tal fato deve-se aos efeitos proporcionados pela sua adição, que possibilitam o controle das fissuras em um nível microestrutural. Segundo os autores, para a obtenção de tal efeito, as microfibras devem apresentar um volume considerável atuando em conjunto com macrofibras, contudo, uma vez que as microfissuras se condensam em macrofissuras, as fibras longas conseguem segurar a propagação destas e melhorar a tenacidade do compósito. Na Figura 2.3 os autores demonstram que as fibras longas (comprimento em torno de 50 a 80 mm) controlam aberturas de fissuras maiores e contribuem para aumentar a resistência mecânica do compósito.

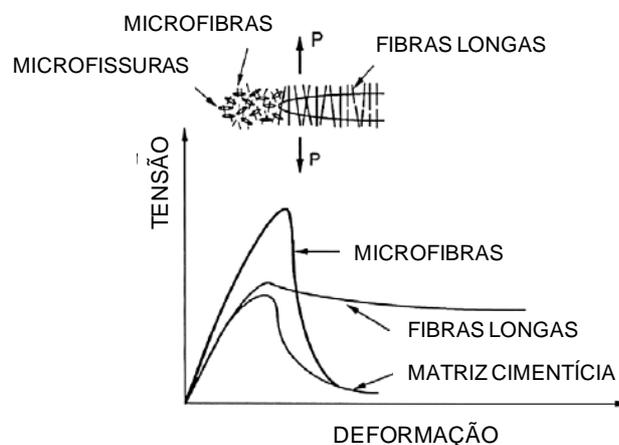


Figura 2.3 – Curva de tensão x deformação de matriz sem reforço, com adição de microfibras e de fibras longas no controle da fissuração (BETTERMAN; OUYANG; SHAH, 1995)

Figueiredo (2000) relata que no caso das microfibras, a ancoragem não é suficiente para gerar tensões de escoamento ou de ruptura nas fibras. Nesta situação, com o aumento da deformação e, conseqüentemente, da abertura da fissura, a fibra que está atuando como ponte de transferência de tensões será mais facilmente arrancada do lado que possui o menor comprimento embutido, ou seja, as fibras não estarão atuando de forma eficiente. Por tais motivos, Bernardi (2003) considera o comprimento da fibra um dos fatores mais importantes para determinar seu desempenho, afirmando que a adição de fibras muito curtas pode diminuir a eficiência do reforço, já que as mesmas não conseguem boa ancoragem nas bordas das fissuras.

Uma questão importante, consenso entre diversos autores do tema, é referente à compatibilidade dimensional que deve existir entre fibras e agregados, de modo que as fibras consigam interceptar as fissuras com maior freqüência no compósito. Figueiredo (2000) recomenda que o comprimento da fibra deva ser igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado. Para Gomes (2005), contudo, o comprimento da fibra deve ser maior que três vezes a dimensão máxima do agregado empregado no compósito. Apesar da variação existente entre as recomendações indicadas pelos autores, é sabido que a não ocorrência de compatibilidade dimensional, dependendo da finalidade da adição, tende a diminuir a possibilidade de atuação das fibras de forma eficiente. Um dos meios para que as dimensões das fibras sejam compatíveis com as dos agregados pode ser através da redução da dimensão máxima do agregado utilizado.

2.2.3 Teor de adição

A capacidade do reforço com fibras depende diretamente do teor de fibra utilizado. Teoricamente, segundo Figueiredo (2005), quanto maior for o teor, maior será o número de fibras atuando como ponte de transferência de tensão ao longo da fissura, o que aumenta o reforço pós-fissuração da matriz. Sabe-se também que a incorporação de altos teores pode causar problemas de perda de trabalhabilidade, fazendo com que a mesma seja corrigida através do emprego de aditivo. Gomes (2005) cita que o parâmetro pode ser expresso através do percentual volumétrico das fibras em relação ao volume total da matriz cimentícia, ou menos comum, em massa de fibras em relação ao volume da matriz.

Na Figura 2.4, Nunes e Agopyan (1998) ilustram como o teor de adição de fibras modifica o gráfico de tensão x deformação dos compósitos. Os autores explicam que quando são utilizados teores baixos de fibras, ocorrem principalmente mudanças no comportamento plástico e na tenacidade do compósito, expressos pelo alongamento da curva tensão x deformação, graças ao maior controle da abertura das fissuras no estágio pós-fissuração.



Figura 2.4 – Curvas típicas de tensão x deformação para ausência, baixo e alto teor de fibras (NUNES; AGOPYAN, 1998).

Figueiredo (2005) cita que o teor de adição de fibras deve ser especificado para a obtenção de melhores resultados em termos de desempenho. Por exemplo, as fibras de polipropileno, segundo Bentur e Mindess (1990), que apresentam baixo módulo de elasticidade, são empregadas em teores elevados, acima de 3% (do volume do compósito), quando o objetivo é aumentar a capacidade resistente do compósito. Já a adição desta fibra em teores reduzidos de 0,3 a 0,5%, de acordo com Sanjuan e Moragues (1997), pode favorecer o controle e a redução da fissuração por retração plástica, o aumento da capacidade de deformação, aumento da tenacidade e resistência ao impacto.

Neste sentido, Gomes (2007) divide em dois grupos principais o reforço de uma matriz cimentícia por meio da adição de fibras. Tal classificação ocorre em função do objetivo do reforço e, principalmente, do módulo de elasticidade da fibra. Teores de adição considerados baixos, da ordem de 0,3% do volume do compósito, devem ser adotados para fibras com módulo de elasticidade menor do que o da matriz, visando o controle da fissuração proveniente de fissuração hidráulica ou então melhorias no acabamento superficial das eventuais peças produzidas. Os maiores teores de adição, em torno de 2% do volume do compósito, são destinados às fibras com módulo de elasticidade maior que o da matriz, adicionados para proporcionar incrementos de resistência à tração, tenacidade e impacto.

Também Mehta e Monteiro (2008) propuseram uma classificação para os compósitos, em função da fração volumétrica adicionada de fibra, dividida em: baixa fração volumétrica (<1%); fração volumétrica moderada (entre 1% e 2%) e alta fração volumétrica (maior que 2%). Nos compósitos com pequena quantidade de fibras, as mesmas são utilizadas para reduzir fissuras por retração. Nos teores de adição considerados intermediários, a presença de fibras aumenta o módulo de ruptura, tenacidade à fratura e resistência ao impacto. E na última classificação, a elevada quantidade de fibra leva ao endurecimento por deformação

dos compósitos, sendo conhecidos como compósitos de alto desempenho reforçados com fibras.

Rodrigues (1999), citado por Silva (2004), destaca que para o uso de teores acima de 3% a mistura não deve ser feita da maneira convencional em misturadores comuns e sem o emprego de plastificantes, pois a trabalhabilidade será comprometida. Para Bentur e Mindess (1990) dependendo do tipo de fibras empregado e de sua geometria, se o compósito for produzido através de projeção por via seca ou por técnicas que envolvam pressão, o teor adicionado pode ser consideravelmente maior. Nos compósitos cimentícios reforçados por fibra de wolastonita estudados por Silva (2004), a proporção considerada ótima para resistência à tração na flexão foi de 11,5%, contudo, os compósitos foram produzidos através do método de Hatschek.

2.2.4 Preparo de compósitos de argamassa

Para Silva; Barros; John (2007) mesmo sem adição de fibras o preparo das argamassas se apresenta bastante suscetível ao método de mistura, problema que se agrava ao adicionar fibra, material que não faz parte da sua concepção tradicional. Existem vários cuidados que devem ser tomados no preparo dos compósitos, o principal está relacionado com a busca pela uniformidade da distribuição volumétrica da fibra na matriz cimentícia.

Ordem de colocação dos materiais, tipo de misturador utilizado, volume de produção e o tempo de mistura são parâmetros que influenciam na dispersão das fibras, refletindo na homogeneidade do compósito e, conseqüentemente no seu desempenho (BENTUR; MINDESS, 1990; BARTOS, 1994; OSTERBERG, 1994; FERRARIS, 2001; SILVA; BARROS; JOHN; 2007). Silva (2006) cita que a obtenção desta homogeneidade resulta no aumento da confiabilidade da adição, pois se subentende que em todo o elemento produzido haverá a mesma quantidade de fibra.

A adição de fibras exige alterações no procedimento de mistura, segundo Bentur e Mindess (1990), tais modificações são devidas às estruturas química e física das fibras. Quanto à estrutura química, deve ser considerado o fato que algumas fibras são hidrofóbicas em relação à matriz de cimento, acarretando em redução da adesão do cimento na superfície das fibras e, por conseqüência, afetando negativamente a sua dispersão na matriz. No que se refere à estrutura física, de acordo com Silva; Barros; John (2007), o processo de mistura do compósito pode ser um limitador da quantidade de material possível de ser introduzido. A introdução de fibras curtas na matriz cimentícia, utilizando misturadores convencionais, tal como betoneira e argamassadeira, faz com que o teor de fibras utilizado seja limitado.

Silva (2006), em sua pesquisa sobre o comportamento reológico e mecânico de argamassas reforçadas com adição de fibras de polipropileno, utilizou uma metodologia específica fundamentada em duas grandes necessidades consideradas primordiais: a baixa incorporação de ar e a melhor distribuição da fibra. De forma que o tempo de mistura adotado foi curto para evitar incorporar ar, porém suficiente para possibilitar uma adequada homogeneidade na distribuição das fibras, evitando a aglomeração deste material e consequente prejuízo na resistência dos compósitos.

Pesquisas recentes têm sido voltadas para verificar a influência do método de mistura utilizado na preparação dos compósitos. Silva; Barros; John (2007) investigaram aspectos como a condição de adição das fibras (secas ou úmidas), a condição de mistura (manual ou mecânica) e o tempo de mistura (em misturadores de eixo vertical ou horizontal) influenciam nas características de argamassas com adição de fibras de polipropileno. Como resultados os autores recomendam para as fibras de polipropileno sua utilização na condição seca, misturadas previamente com os outros constituintes da argamassa também secos, utilizando um misturador de eixo horizontal, uma vez que se proporcionou a melhor dispersão das fibras e homogeneidade dos compósitos.

2.3 EFEITOS DA ADIÇÃO DE FIBRAS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

O estudo em diversas literaturas, particularmente Bentur e Mindess (1990); Savastano Jr. (1992); Balaguru (1994); Figueiredo (2000); Bernardi (2003), deixou claro os benefícios que a adição de fibras em matrizes cimentícias pode proporcionar. Segundo os mesmos, um dos principais interesses na adição de fibras em matrizes cimentícias consiste na busca pelo aumento da tenacidade. A adição de fibras aumenta a tenacidade através do processo de controle da propagação das fissuras resultantes e do acréscimo das resistências à tração, como consequência, tem-se a diminuição da fissuração.

Os efeitos do reforço de fibras pode ser avaliado sob dois critérios: priorizando a resistência ou a tenacidade dos compósitos em relação à matriz. Estes aspectos dependem do comprimento da fibra, de sua orientação e são muito dependentes do grau de aderência com a matriz. Rizzon *et al.* (2008) relatam que a melhoria de algumas das propriedades das matrizes cimentícias tem sido demonstrada ao longo dos anos no meio científico, ampliando as opções de utilização de novas técnicas na indústria da construção civil. A seguir são descritos os benefícios obtidos através da adição de fibras em matrizes cimentícias.

2.3.1 Controle da fissuração

Para Bentur e Mindess (1990) a utilização de fibras proporciona a distribuição das fissuras, com espaçamento menor e abertura de fissa pequena se comparados com a matriz cimentícia sem reforço, colaborando para aumentar a ductilidade do compósito. Balaguru (1994) concluiu que mesmo em baixos teores de adição, as fibras promovem algum efeito sobre as fissuras.

Tanesi, Torneri e Figueiredo (1997) relatam que a adição de fibras possibilita um efeito de intertravamento, provocando aumento na adesão entre a fibra e a matriz, fazendo com que o aparecimento de fissuras por retração plástica, devido à rápida saída de água da superfície da matriz cimentícia, seja reduzido. Segundo Costa *et al.* (2005), tal fato é devido ao aumento da resistência à tração do compósito e o mesmo apresentar baixo módulo de elasticidade. De forma geral, Nunes (2006), cita que a influência deste controle, depende basicamente da forma das fibras, do seu módulo de elasticidade, tratamento superficial, comprimento, idade e teor adicionado.

Para Bernardi (2003) no controle da fissuração está implícita a habilidade de causar uma melhor distribuição das fissuras, provocando em certos casos o aumento na quantidade de fissuras, mas diminuindo a área de abertura total delas. Brandt (2008) cita que, graças à adição de fibras, fissuras isoladas em uma matriz cimentícia foram substituídas por um sistema de microfissuras, aceitável sob o ponto de vista de segurança e de durabilidade. O efeito da adição de fibras sobre o controle da fissuração na matriz cimentícia é ilustrado na Figura 2.5.

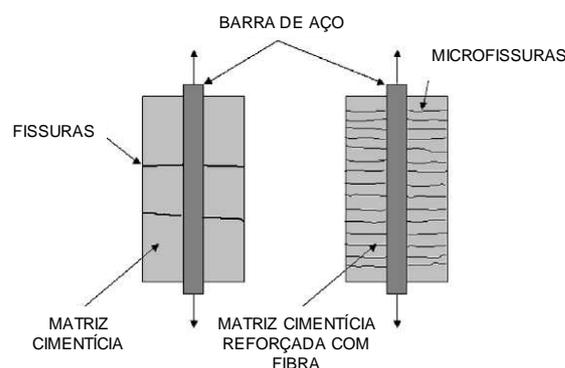


Figura 2.5 – Padrão de fissuras em matrizes submetidas a esforço de tração: (a) Matriz cimentícia sem adição de fibras; (b) Compósito reforçado com fibras (BRANDT, 2008).

Para Brandt (2008) as fibras de polipropileno com baixo módulo são normalmente empregadas em um teor baixo de adição para controle da fissuração nas primeiras idades

da matriz cimentícia. Neste período, o módulo de elasticidade da matriz é baixo, similar ao da fibra de polipropileno. A Tabela 2.2 apresenta algumas investigações realizadas por diferentes pesquisadores utilizando fibra de polipropileno em comprimentos variados para controle da fissuração.

Tabela 2.2 – Investigações realizadas por diferentes pesquisadores utilizando fibra de polipropileno para controle da fissuração (adaptado de SILVA; 2006).

PESQUISADORES	FIBRAS	DOSAGEM	INVESTIGAÇÃO	RESULTADOS
Balaguru (1994)	PP (19mm)	900 e 1800 g/m ³	Retração plástica	Mesmo em baixos teores de adição, as fibras promoveram redução na quantidade de fissuras.
El Debs <i>et al.</i> (1995)	PP (12,7mm)	0,5% e 1% (volume de argamassa)	Controle da fissuração	0,5% é um volume insuficiente para controle da fissuração.
Sanjuán e Moragues (1997)	PP (14mm)	0,1;0,2;1% (volume de argamassa)	Retração plástica	A adição da fibra reduziu a retração plástica.
Puertas <i>et al.</i> (2003)	PP (12mm, 18µm)	0,5; 1% (volume de argamassa)	Retração	Indicaram que a natureza alcalina da matriz foi mais importante no desenvolvimento da resistência à fissuração do que a presença da fibra.
Oliveira; Gleize; Roman (2003)	PP (10mm e 20µm)	0,05; 0,15; 0,3% (peso do cimento)	Retração por secagem	Nas argamassas de cimento as fibras reduziram a retração por secagem
Silva <i>et al.</i> (2003)	PP (6mm)	500 g/ m ³	Desempenho revestimento de argamassa	Resultados da adição foram considerados satisfatórios
Costa <i>et al.</i> (2005)	PP (5mm)	0,1; 0,2% (volume de argamassa)	Retração	A adição de fibras não exerceu influência na retração plástica, mas por secagem contribuiu para diminuição em quase 50% da fissuração.

Ramakrishnan; Zellers; Patnaik (2007) citam que as fibras de polipropileno podem também ser dispersas em paredes de edificações com o objetivo de, em caso de incêndio ou elevadas temperaturas, elas possam derreter e criar canais para aliviar a pressão interna e ajudar a retardar o rompimento do elemento.

Fibras confeccionadas a partir de pneus também vêm sendo estudadas como alternativas para o controle da fissuração em matrizes cimentícias. Accetti e Pinheiro (2000) adicionaram as fibras de borracha em concretos e identificaram melhorias com relação à propagação de fissuras. As fibras atuaram como obstáculos ao desenvolvimento das fissuras, interceptando as microfissuras que surgiam durante o endurecimento da pasta e impedindo sua progressão. Na mistura endurecida, elas também limitaram o comprimento e a abertura das fissuras.

Rizzon *et al.* (2008) em seu trabalho sobre a investigação das propriedades mecânicas de concreto reforçado com fibras de garrafas PET, identificaram que o emprego deste tipo de resíduo na forma de fibras e agregados é objeto de estudo recente na literatura (OCHI *et al.*, 2007; CHOI e YUAN, 2005; CHOI *et al.*, 2005). Os autores citam que a viabilidade da utilização destas fibras como adição de concretos e argamassas é mais indicada no controle de fissuração antes e durante a cura, como por exemplo, as causadas pela retração. É recomendado o aprofundamento dos estudos no sentido de se obter um fator de forma ideal, que apresente resultados mecânicos satisfatórios para os fins desejados, e possibilitar a padronização de comprimento e diâmetro de fibras.

2.3.2 Melhoria no comportamento frente à retração

A suscetibilidade a deformações causadas por retração de um compósito cimentício é uma característica que assume notável importância por estar relacionada ao seu desempenho mecânico e à sua durabilidade (SALES, 2006). A autora explica que a retração é classificada como livre ou restringida em função das condições de contorno do compósito, sendo restringida quando a matriz está endurecida, havendo impedimento à movimentação do elemento por vínculos com outros elementos adjacentes ou atrito com a superfície sobre a qual está sobreposto.

Segundo Sales (2006), a consideração da restrição depende da escala adotada para observação do fenômeno, podendo as restrições serem promovidas pelo atrito das superfícies com os moldes, pela presença de reforço ou agregados. No concreto, os agregados, por serem mais rígidos que a pasta de cimento, costumam exercer forte restrição aos movimentos provocados pela saída da água da mistura. De acordo com Swamy e Stavrides (1979), citados por Sales (2006), em compósitos cimentícios reforçados com fibras, o volume das fibras é muito menor, comparado com o volume dos agregados, e a matriz tende a ser mais rica, em comparação com o concreto sem fibras.

Basicamente, o estudo do fenômeno da retração é feito por dois métodos, retração no estado fresco, caracterizada pelo ensaio de retração plástica e retração no estado endurecido ou retração por secagem, caracterizada pelos ensaios de retração livre e restringida. Em ambos os métodos podem ser utilizados placas ou anéis para realização dos ensaios.

A utilização de métodos de avaliação da retração restringida tem aumentado nos últimos anos, principalmente por permitirem a avaliação direta da potencialidade de fissuração de um material cimentício. Corpos-de-prova em formato de placas e anéis restringidos lateralmente e pela base são comumente utilizados, com a vantagem de apresentar formato

semelhante com o de peças encontradas normalmente em serviço (SEE *et al.*, 2000). Na Tabela 2.3 apresenta-se um levantamento de dimensões de anéis utilizadas por alguns pesquisadores para avaliação da tendência à fissuração de concretos e argamassas.

Tabela 2.3 – Levantamento de dimensões utilizadas no ensaio do anel (adaptado de Peña; Helene, 2005).

Pesquisadores	Diâmetro interno (mm)	Espessura do corpo-de-prova (mm)	Altura	Espessura do anel	Característica adicional
Carlson e Reading (1940)	125	34	-	-	-
Coutinho (1958)	125	25	-	-	-
AASHTO (2000)	300	75	150	12	Anel não fica aderido à base metálica
Poston <i>et al.</i> (2001)	254	32	102	25,4	Anel fica aderido à base metálica
Grochoski <i>et al.</i> (2003)	300	40	70	3,1	Anel fica aderido à base metálica
Hossain e Weiss (2004)	300	150	75	9,5	Anel não fica aderido à base metálica
Grullon (2004)	300	40	70	3,1	Anel fica aderido à base metálica

De modo particular Sales (2006) realizou ensaios para avaliação de retração restringida em compósitos de matrizes cimentícias com adição de fibra. Entre os experimentos desenvolvidos pela autora, o considerado mais promissor foi realizado através da utilização dos chamados “anéis de Coutinho”, que consistem em corpos-de-prova no formato de anéis produzidos com compósitos em torno de outro anel rígido de aço, de forma a obter restrição à sua retração. A autora analisou os resultados dos estudos experimentais que indicaram a influência benéfica da presença de reforço com fibras curtas, distribuídas aleatoriamente na matriz cimentícia, através da redução na espessura das fissuras provocadas quando há restrição à retração. Sendo possível identificar o comportamento dos compósitos reforçados com fibras quanto à deformabilidade variável com o tempo.

Schmidt; Gleize; Gomez (2003) desenvolveram uma metodologia para avaliar a evolução da fissuração em argamassas que consistiu no método do anel. Os autores utilizaram um teor de adição de 0,5% de fibra de polipropileno para reforçar um anel de argamassa de traço de 1:3 (cimento:areia) e relação água/cimento de 0,5. O molde de aço foi construído com 14 cm de altura, diâmetro interno de 26 cm e externo de 34 cm para moldagem do anel de argamassa com 4 cm de espessura. Como resultado, constatou-se que o anel reforçado com fibra de polipropileno fissurou oito dias após o aparecimento de fissuras na argamassa de referência. A Figura 2.6 apresenta gráfico com a evolução da abertura das fissuras ao longo do tempo monitorado no ensaio de retração restringida.

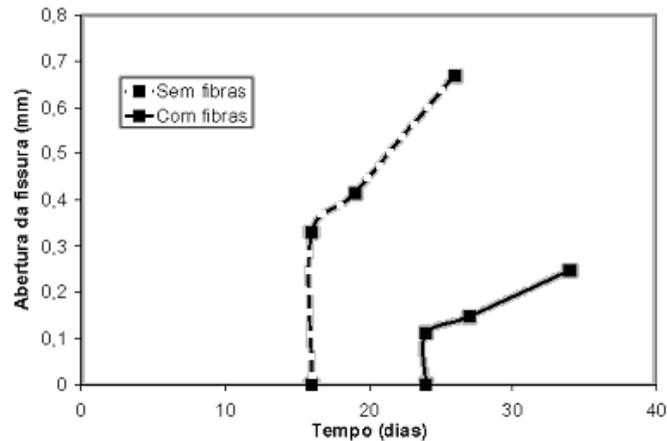


Figura 2.6 – Abertura de fissuras em anéis de argamassas no ensaio de retração restringida (SCHMIDT; GLEIZE; GOMEZ; 2003).

Schmidt; Gleize; Gomez (2003) obtiveram resultados de acordo com o identificado na literatura (GRZYBOWSKI; SHAH, 1990; MESBAH; BUYLE-BODIN, 1999), conseguindo as fibras retardar o aparecimento da primeira fissura, além de diminuir a espessura de abertura das fissuras. Passuello; Moriconi; Shah (2009) estudaram, através do ensaio do anel, a retração em concretos com adição de macro e microfibras PVA e aditivo redutor de retração. As microfibras conseguiram manter por mais tempo a mesma fissuração com uma baixa velocidade de propagação, provocando um retardo de 4 dias no aparecimento das fissuras. A Figura 2.7 apresenta o gráfico com os resultados obtidos para concretos reforçados com fibras PVA com relação de aspecto de 200 (microfibra) e 45 (macrofibra).

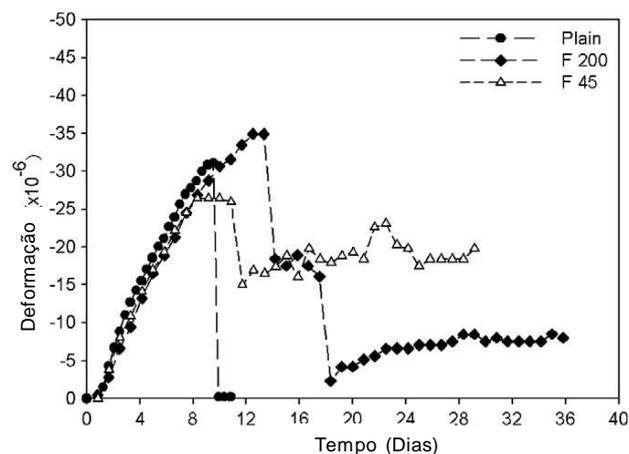


Figura 2.7 – Evolução da retração no anel restringido de concreto de referência e com adição de fibras com relação de aspecto de 200 (microfibra) e 45 (macrofibra).

De acordo com Passuello; Moriconi; Shah (2009) verificou-se modificação no comportamento pós-fissurativo que pode ter sido causado pela variação da localização dos pontos frágeis existentes na matriz cimentícia durante a realização do ensaio devido à presença da fibra e a resistência que ela provoca na propagação da fissuração.

Mesmo que a adição de fibras não tenha conseguido retardar significativamente o tempo de ocorrência da fissuração, a redução obtida para a abertura das fissuras foi extremamente eficiente, visto que esta foi reduzida em 70% no caso das macrofibras e em quase 90% nas microfibras. Além disso, os autores concluíram que a adição da microfibras provocou uma pequena alteração na retração do concreto, tal fato foi atribuído à modificação interna sofrida pelo movimento da água devido à presença das fibras.

2.3.3 Alterações no módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade pode ser considerado a propriedade mecânica da matriz cimentícia que avalia a capacidade de deformação do material no regime elástico. Sua importância está relacionada com o potencial de fissuração do elemento, representando uma medida para indicar, sob determinadas condições de solicitação, o quanto o compósito estará sujeito à fissuração.

A adição de fibras em matrizes cimentícias pode contribuir para a redução do módulo de elasticidade do compósito. Segundo Silva (2006), a propriedade está diretamente relacionada com a densidade endurecida da matriz, ou seja, quanto mais densa, mais rígida será a matriz. A porosidade da matriz cimentícia diminui a sua rigidez implicando na redução dos valores de módulo de elasticidade em relação a uma matriz mais densa.

Para Silva (2006) a determinação do módulo de elasticidade de um sólido pode ser determinada através de ensaios destrutivos ou não destrutivos, cujos parâmetros e princípios são distintos. Nos ensaios destrutivos, denominado de estáticos, o módulo de elasticidade é determinado a partir de medidas de deformações do sólido durante aplicação de cargas mecânicas. Entre os tipos de carregamento, os mais comuns são os de compressão.

Nos ensaios não destrutivos, denominados de dinâmicos, o módulo de elasticidade é determinado a partir da propagação de ondas vibratórias ou de pulsos ultra-sônicos pela estrutura interna do sólido (SILVA, 2006). A norma BS 1881: part. 203 (BSI, 1986), citada por Silva (2006), prescreve o método de ensaio utilizando pulsos ultra-sônicos empregado na pesquisa da autora. Como resultado tem-se a determinação do tempo e da velocidade com que a onda ultrassônica se propaga no interior do corpo-de-prova. O tempo é fornecido pelo aparelho e a velocidade é calculada pela relação entre a distância dos dois transdutores e o tempo.

Desta forma, quando a estrutura interna do corpo-de-prova for altamente densa, a velocidade de propagação da onda é elevada, isso porque o tempo de propagação é curto.

A existência de vazios (poros) ou fissuras na estrutura interna do corpo-de-prova provoca um impedimento à propagação da onda ultrassônica, fazendo com que o seu tempo de propagação seja elevado, e sua velocidade seja reduzida (SILVA, 2006).

Em trabalhos como os de Cortez (1999); Silva *et al.*, (2003) e Patrício; Barros (2005), citados por Silva (2006), comprovou-se que a adição de fibras em argamassas pode contribuir para reduzir o módulo de elasticidade dos compósitos. Silva (2006) produziu a Figura 2.8 com base nos dados obtidos por Patrício; Barros (2005) para demonstrar a relação existente entre teor de fibra adicionado, teor de ar incorporado e módulo de elasticidade do compósito. A porosidade na argamassa diminuiu a sua rigidez implicando na redução dos valores de módulo de elasticidade em relação a uma argamassa mais densa.

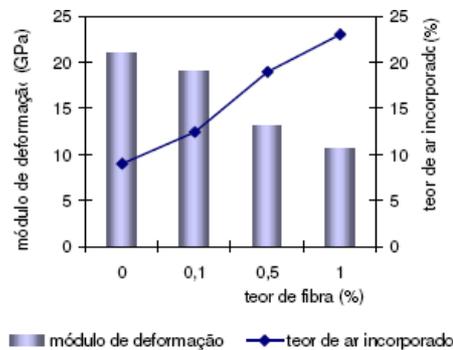


Figura 2.8 – Influência da adição de fibra no módulo de elasticidade de argamassas (SILVA, 2006)

Gomes (2005), em seu estudo sobre as propriedades de matrizes cimentícias reforçadas pela adição de fibras de poliamida, investigou a adição do copolímero Va/Ve/Va como forma de tornar compatíveis os módulos de elasticidade da fibra e da matriz cimentícia. O autor conseguiu modificar o módulo de elasticidade da matriz cimentícia (22 GPa) a partir do emprego do copolímero, tornando-o compatível com o das fibras de poliamida, que é reduzido (2 a 4 GPa).

2.3.4 Incremento no desempenho mecânico

O reforço com fibras provoca alterações no desempenho mecânico do compósito. Hannant (1978) explica que a atuação das fibras é percebida mais claramente no comportamento pós-fissuração, a matriz irá fissurar antes da resistência final da fibra ser alcançada. Segundo Silva (1990), citado por Gomes (2005), a adição de fibras pode provocar: na resistência à compressão a não alteração ou ganhos mínimos; na resistência à tração simples os ganhos são similares aos da flexão; melhoria na resistência ao impacto, uma vez que as fibras ajudam a dissipar as energias recebidas por forças dinâmicas; e aumento na resistência à fadiga. Desta forma, conforme observado por Figueiredo (2005), o objetivo da adição de fibras não é incrementar a resistência à compressão das matrizes cimentícias, no

entanto, as fibras atuando como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, sejam elas produzidas por esforços de tração ou cisalhamento como ocorre no ensaio de compressão, tendem a proporcionar ganho quanto à tenacidade na compressão.

Para Mehta e Monteiro (2008), inicialmente, as resistências à tração e à flexão poderiam aumentar substancialmente em função da introdução de fibras, o que obstruiria a propagação de microfissuras, retardando o aparecimento de fissuras de tração e aumentando a resistência à tração do material. Anos de estudos experimentais, porém, mostraram que, com o volume e tamanho das fibras que poderiam ser convenientemente incorporadas a matrizes cimentícias convencionais, os materiais reforçados com fibras não ofereciam melhoras substanciais na resistência se comparados a misturas sem fibra.

De acordo com levantamento realizado por Bernardi (2003), em geral, o aumento da resistência à tração nos compósitos com a adição de fibras normalmente não supera 20%, quando são empregados teores menores de 2%, os quais são os teores usualmente praticados. Bentur e Mindess (1990) realizaram adições de fibras em teores superiores a 1% e obtiveram aumentos significativos da capacidade de absorção de energia na tração por flexão. Para compressão, na maior parte dos casos, a resistência aumenta ligeiramente com o aumento do teor, segundo Barros (1996), citado por Bernardi (2003), verifica-se que as fibras com melhores propriedades de fixação à matriz conduzem a maiores ganho dessa resistência.

Silva (2006) também relatou resultados obtidos por diversos autores para ensaios de resistência à tração na flexão realizados em compósitos de argamassa reforçados com adição de fibra de polipropileno. De forma que foram verificadas pequenas variações na resistência, da ordem de 1 MPa, contudo, para os resultados de resistência à compressão, a variação foi mais representativa, especialmente quando a resistência da matriz cimentícia sem reforço era baixa. A autora acredita que a redução da resistência à compressão dos compósitos pode estar associada à porosidade que as fibras conferem na matriz cimentícia, em função da incorporação de ar ocasionada do contato entre fibras e agregados. Este fato indica que a porosidade presente na matriz com fibras tem efeito mais prejudicial quando o compósito é solicitado à compressão do que à tração.

Gomes (2005) identificou que na resistência à compressão axial dos compósitos produzidos com adição de fibras de poliamida e copolímero Va/Veo/Va o reforço não contribuiu de maneira significativa no desempenho. O autor atribui o fato aos problemas encontrados para dispersar a fibra nos maiores teores de adição. Já a resistência à tração na flexão foi incrementada pela adição da fibra e do copolímero, porém a incorporação de ar, causada

pela adição do copolímero, influenciou a resistência final e, principalmente, na aderência entre a fibra e a matriz e, por conseqüência, diminuindo a capacidade de reforço da fibra.

Sant`ana Filho *et al*, (2008) realizaram um estudo para verificar a viabilidade técnica de utilizar resíduo de manta cerâmica na produção de argamassas. Os autores utilizaram teores de adição de 0%, 2%, 4% e 6% em substituição do peso do cimento, com um traço de 1:2:9 (cimento:cal:areia). A resistência à compressão dos compósitos, avaliada segundo a NBR 13279 – Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão (ABNT, 2005), indicou a média de resultado superior em 14% em relação ao testemunho para o teor de 2% de adição. Os autores atribuem o melhor desempenho ao fato do resíduo de fibra cerâmica apresentar características físico-química semelhantes aos materiais pozolânicos, podendo ter ocorrido a combinação do mesmo com hidróxido de cálcio e formado silicato de cálcio hidratado, compostos mais resistentes e refinadores de poros.

Demais resíduos, como o pneu, vem sendo transformados em fibra e adicionados em matrizes cimentícias, sendo estudadas por diversos pesquisadores. Em seus trabalhos, Toutanji (1996) e Fattuhi e Clark (1996), identificaram decréscimo na resistência à compressão e à tração na flexão dos compósitos. Os autores acreditam que esta perda de resistência pode estar relacionada à ação da borracha absorver pouco o carregamento em relação aos outros componentes e ao mesmo tempo possibilitar maior deformação lateral levando à ruptura do compósito. Marques, Trigo e Akasaki (2004) analisaram as propriedades mecânicas e a microestrutura de argamassas reforçadas com adição de fibras de pneu. Os autores concluíram que o uso deste tipo de reforço é mais indicado em situações onde a resistência mecânica não é a principal característica desejada.

2.3.5 Aumento da resistência ao impacto

Materiais dúcteis apresentam maior resistência ao impacto por proporcionar uma maior dissipação de energia pelas deformações plásticas que é capaz de apresentar. A adição de fibras faz com que os compósitos apresentem ganho de tenacidade. Ramakrishna e Sundararajan (2005) citam que esta capacidade de absorver energia é o mais importante benefício proporcionado pelo reforço de fibras, quando submetido a cargas dinâmicas, estáticas ou à fadiga.

Do ponto de vista estrutural, segundo Mehta e Monteiro (2008), as fibras não aumentam a tenacidade do sistema se tiverem pouca aderência com a matriz, podendo escorregar sob carregamentos baixos e não contribuindo para diminuir a fissuração. Por outro lado, se a aderência à matriz for muito alta, muitas fibras podem se romper antes de dissipar energia,

escorregando. Nesse caso, as fibras se comportam como inclusões inativas, produzindo apenas uma melhoria periférica das propriedades mecânicas.

Mesmo existindo indicativos do bom desempenho da adição de fibras no reforço ao impacto, Mehta e Monteiro (2008) citam que faltam ensaios satisfatórios para determinar a exata magnitude do incremento na resistência ao impacto. Os vários métodos de ensaios existentes receberam diferentes classificações, como a proposta por Ramakrishna e Sundararajan (2005), que os dividiram nas seguintes categorias: ensaio de impacto do tipo queda de peso; ensaio com o pêndulo de *Charpy*; impacto através de projétil; impacto através de explosão; entre outros. A Tabela 2.4 apresenta, segundo a classificação citada, um levantamento de métodos de ensaios e fibras utilizadas para verificar resistência ao impacto de compósitos.

Tabela 2.4 – Levantamento de métodos de ensaio e tipos de fibras utilizados para verificar resistência ao impacto de compósitos (adaptada de Ramakrishna; e Sundararajan, 2005).

MÉTODOS DE ENSAIO	TIPO DE FIBRA	PESQUISADORES
Queda de peso	Aço	Nataraja; Dhamg; Gupta (1999) Balasubramaniam <i>et al.</i> (1996) Ramakrishnan <i>et al.</i> (1980) Ramakrishnan <i>et al.</i> (1981) Balaguru; Ramakrishnan (1986) Suria; Shah (1982) Koyanagi <i>et al.</i> (1983) Zech; Wittmann (1980) Glinicki; Radomski (1986) Hughes; Nourbakhsh (1986) Chauvel <i>et al.</i> (1989)
	Polipropileno	Hibbert; Hannant (1981) Alhozaimy; Soroushian; Mirza (1996)
	Vegetal	Mansur; Aziz (1982) Sridhara; Kumar; Sinare (1976) Ramaswamy; Ahuja; Krishnamoorthy (1983) Agopyan; John (1989) Savastano Jr. (1990) Mattone (1990) Filho (1990) Kankam (1974) Oliveira; Agopyan (1992)
Instrumentado	Aço	Gopalartnam VS, Shah SP.
	Polipropileno	Banthia; Mindess; Bentur (1987) Mindess; Vondran (1988) Bentur; Mindess; Skalny (1989)
Carga explosiva	Polipropileno	Robins; Calderwood (1978)
Charpy	Aço	Krenchal (1974)
		Shah; Gopalaratnam (1986)

Figueiredo (2000) destaca o método de ensaio do tipo queda de peso como o mais simples. Para o autor o ensaio é meramente comparativo, de caráter qualitativo, servindo para avaliar o ganho de desempenho que a matriz cimentícia apresenta quando da adição de fibras. O melhor desempenho está associado ao material que exigir um maior número de quedas da massa para se produzir uma primeira fissura e, subsequentemente, o colapso do material. Apesar da fácil execução, o ensaio apresenta limitações, exigindo um cuidado especial de quem o executa.

O ensaio do tipo queda de peso foi utilizado por Bernardi (2003) em sua investigação sobre o comportamento ao impacto de placas de concreto reforçadas com fibra aramida. A autora comparou a adição do material com as de outras fibras comumente utilizadas como aço, vidro, polipropileno e sisal. As placas reforçadas com fibras de aço e de aramida apresentaram melhor desempenho com relação ao incremento da resistência ao impacto, não rompendo ao ser atingida a altura máxima do ensaio (220 cm). A fibra de aramida apresentou melhor resultado para o aparecimento da primeira fissura e a de aço não conseguiu retardar o aparecimento da primeira fissura, atuando principalmente após a fissuração, aumentando significativamente a resistência ao impacto dos compósitos.

Nos compósitos reforçados com fibras de sisal, contudo, Bernardi (2003) observou uma mudança considerável no comportamento após o aparecimento da primeira fissura, com uma intensificação da magnitude dos deslocamentos verticais. A autora concluiu que a fibra de sisal não se mostrou adequada para controlar o impacto, contudo, existe a necessidade de se investigar a possibilidade de se trabalhar com maiores teores de adição desta fibra, porém, tal fato pode gerar problemas na trabalhabilidade.

Ao contrário de Bernardi (2003), Ramakrishna e Sundararajan (2005) investigaram a resistência ao impacto de placas de argamassas reforçadas com diferentes tipos de fibras vegetais, através do método de ensaio de queda de peso, obtendo resultados considerados satisfatórios. Contudo, existem diferenças entre os dois trabalhos, Bernardi (2003) analisou o comportamento ao impacto de placas de concreto, com dimensões de 30 x 30 x 6 cm, a partir da queda de esfera com aproximadamente 1 kg, sendo lançada de alturas que aumentavam progressivamente de 10 em 10 cm. Ramakrishna e Sundararajan (2005) avaliaram o desempenho de placas de argamassas, de espessura reduzida (30 x 30 x 2 cm), através da queda de esfera com peso de 500 g, lançada de uma altura fixa (20 cm).

Os resultados obtidos por Ramakrishna e Sundararajan (2005) indicaram que a adição das fibras provocou aumento na resistência ao impacto dos compósitos de argamassa, com relação à placa de referência, além de incremento na resistência última à ruptura a partir do

aumento do teor de fibra. Os autores concluíram que para uma fibra proporcionar bom desempenho no reforço ao impacto, ela deve apresentar maior ductilidade e menor susceptibilidade à fratura.

Garcez (2005) também adotou o método de ensaio do tipo queda de peso, realizado nas mesmas condições de Bernardi (2003), para observar o comportamento ao impacto de compósitos reforçados com fibras de aço, utilizando diferentes teores e fatores de forma. Com relação aos efeitos do fator de forma na resistência ao impacto dos compósitos, a autora observou que o aumento deste índice provocou um incremento tanto na energia necessária para o aparecimento da primeira fissura, quanto na necessária para a ruptura das placas de concreto. Tal fato pode ser em função do aumento do fator de forma, onde tendo sido mantido constante o comprimento das fibras, um número maior destas foi incorporado à matriz, para um mesmo teor de adição. Como existe um número maior de fibras, a probabilidade das fissuras serem interceptadas por estas é maior e, por consequência, a costura promovida pelas fibras se torna mais eficiente.

Garcez (2005) também observou que os incrementos na energia de ruptura provocados pelo aumento do teor foram maiores que os incrementos para o aparecimento da primeira fissura. Este efeito confirma a eficiência das fibras de aço no estágio pós-fissurado dos compósitos. Todos os teores de adição utilizados provocaram o aumento da energia necessária para o aparecimento da primeira fissura e para a ruptura do compósito. A presença das fibras não retardou significativamente o aparecimento da primeira fissura, principalmente para baixos teores, conforme esperado. Efeitos positivos só puderam ser observados em teores mais elevados. A autora concluiu que a resistência ao impacto foi incrementada de forma significativa com o aumento do teor de fibras e de seu fator de forma.

Gomes (2005) realizou ensaios de impacto através do método de Charpy nos compósitos produzidos com adição de fibra de poliamida e copolímero. O autor verificou que as fibras, adicionadas nos teores de 0%, 2,5% e 5% e o copolímero empregado nas quantidades de 10%, 20% e 40%, atuaram na resistência ao impacto dos compósitos, sendo o efeito mais pronunciado conforme o aumento do teor de adição. O autor atribui o comportamento ao impacto considerado à elevada resistência à tração destas fibras (em torno de 500 MPa) e sua grande tenacidade.

Também Silva (2004) utilizou o ensaio com o pêndulo de *Charpy* para avaliar a tenacidade em compósitos produzidos com fibras de sisal (25 mm) e de wolastonita, nos teores de adição 3% (em relação ao volume do corpo-de-prova) e 11,5% (em relação à massa), respectivamente. O autor obteve um incremento de 26,4% em relação à matriz sem reforço

de fibra de sisal, e de 28,8% para a matriz sem fibra de wolastonita. Silva (2004) observou um menor valor de tenacidade nos compósitos produzidos com fibra de wolastonita, fato atribuído ao pequeno fator de forma da fibra.

2.4 PROBLEMAS ASSOCIADOS À ADIÇÃO DE FIBRAS

Garcez (2005) relata que mesmo diversas pesquisas tendo produzido evidências sobre a eficiência das fibras, ainda existem dúvidas quanto à eficácia da adição de fibras na melhoria da resistência última, dada a possibilidade de incorporação de ar e a incerteza quanto à homogeneidade da dispersão, ou distribuição das fibras. Todavia, é consensual a aceitação do fato de que as fibras melhoram a ductilidade dos compósitos de base cimentícia. A seguir, são apresentados os principais problemas associados à adição de fibras nas matrizes cimentícias:

2.4.1 Perda de trabalhabilidade

A adição de fibras altera as condições de consistência da mistura e, conseqüentemente, provoca a perda de trabalhabilidade. Ceccato, Nunes e Figueiredo (1997) classificam os fatores que afetam a trabalhabilidade do compósito como intrínsecos e extrínsecos. São considerados intrínsecos o atrito interno entre as fibras e agregados, a coesão, a viscosidade, a homogeneidade, a quantidade de ar incorporada, etc. Entre os fatores extrínsecos estão os métodos e equipamentos de transporte, lançamento e adensamento, além das características do elemento a ser produzido.

Figueiredo (2005) afirma que a alteração na trabalhabilidade do compósito no estado fresco independe do material que constitui a fibra, devendo-se, principalmente, ao fator de forma da fibra. Isto ocorre porque, ao se adicionarem fibras à matriz cimentícia, também é adicionada uma grande área superficial, que demanda água de molhagem. Assim, as fibras de maior área superficial demandarão maior quantidade de água de molhagem, produzindo aumento de coesão e perda de mobilidade do compósito no estado fresco. Fibras mais longas também contribuem para a redução da perda de mobilidade da mistura por dificultar a movimentação das partículas de maiores dimensões, como é o caso dos agregados.

Ceccato, Nunes e Figueiredo (1997) afirmam a necessidade de haver controle da trabalhabilidade, além do emprego de métodos de ensaios adequados para avaliação das perdas. Os autores consideram esta propriedade a mais importante do compósito no estado fresco, modificando seu comportamento por alterar principalmente três parâmetros

reológicos do mesmo: consistência, fluidez e compatibilidade; exercendo grande influência no desempenho do compósito no estado endurecido.

2.4.2 Falha na dispersão das fibras

Para Bernardi (2003), em teoria, quanto maior o teor de fibras adicionadas, melhor será o desempenho, pois maior será o número de fibras que intercepta cada microfissura. Contudo, o problema do aumento do teor de fibra pode propiciar concentração das mesmas, a partir da diminuição de seu comprimento médio, tendendo a causar problemas de homogeneidade no compósito. Com o aumento da aglomeração de fibras, a resistência mecânica do compósito tende a sofrer incrementos cada vez menores.

Em um compósito de matriz cimentícia, quando não se obtém uma adequada dispersão das fibras adicionadas, ocorre o problema denominado por Figueiredo (2005) de aparecimento de “grumos”, que consistem em fibras aglomeradas, não dispersas na matriz. Segundo o autor, tal fato provoca não só uma redução do teor de fibra homogeneamente distribuído, como também um ponto fraco (muito poroso) no local onde cada grumo se alojar. As causas da formação de “grumos” podem ser associadas ao tempo inadequado de mistura do material, bem como energia empregada insuficiente para realizar este procedimento. Também devem ser consideradas características intrínsecas à fibra utilizada, por exemplo, presença de resina ou aglomerante que são aplicados durante o processo de fabricação do material e não são passíveis de serem removidos e, com isso, tendem a dificultar sua dispersão na matriz cimentícia.

Silva (2006) relata que falhas na dispersão da fibra podem apresentar-se de duas maneiras: regiões onde existe pouca concentração de fibras e outras com grande concentração; concentração na forma de fibra aglomerada (Figura 2.9). Ambas as situações produzirão uma redução do teor de fibra homogeneamente distribuída. A aglomeração de fibra forma pontos falhos, pois resulta em porosidade elevada; além disso, as fibras não são completamente envolvidas pela matriz, desfavorecendo o mecanismo de aderência fibra-matriz.

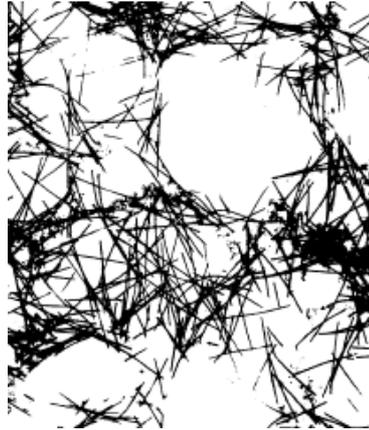


Figura 2.9 – Regiões com pouca e muita concentração de fibra (BENTUR; MINDESS, 1990).

Buscando evitar a aglomeração de fibras, torna-se necessária a adoção de métodos para contribuir na dispersão das mesmas na matriz. Contudo, deve-se tomar cuidado que, assim como nos equipamentos misturadores utilizados para o preparo dos compósitos, o sistema aplicado de dispersão pode provocar fratura na fibra, limitando sua capacidade resistente.

Outro aspecto é relativo à interação entre os materiais gerada em uma solução concentrada que, segundo Antunes (2005), o contato e o deslizamento destas partículas podem gerar atritos. Para Silva (2006) este atrito pode ser favorecido pelo entrelaçamento do agregado pelas fibras, no caso de fibras flexíveis, que possuem potencial para se dobrar e produzir tal fenômeno. Também, dependendo da resistência das fibras, este fenômeno pode acarretar em fratura da fibra, mitigando o desempenho do reforço.

2.4.3 Incorporação de ar

O bom desempenho das matrizes cimentícias reforçadas com fibras depende diretamente da obtenção de distribuição mais homogênea possível das fibras, que pode ser proporcionada pelo tempo adequado de mistura. Contudo, quanto maior for o tempo de mistura, maiores são as chances de incorporação de ar nos compósitos. Entende-se que a presença de ar incorporado nas argamassas afeta a capacidade de deformação do material, ocorrendo a formação de porosidades e, conseqüentemente, perda de resistência mecânica (SILVA, 2006).

Silva (2006) ao analisar o problema de incorporação de ar em argamassas com adição de fibras de polipropileno para avaliar sua influência no comportamento reológico e mecânico dos compósitos, realizou diversos estudos exploratórios para a produção dos corpos-de-prova. Alternando ordem de colocação dos materiais e tempo de mistura, a autora pôde identificar que os mesmos funcionam como parâmetros essenciais e singulares para a

obtenção de compósitos de matrizes cimentícias mais homogêneos e com menor porosidade. Foi constatado que o tempo de mistura deve ser curto para não incorporar muito ar, mas o suficiente para possibilitar a dispersão das fibras e a homogeneidade do produto final.

Silva (2006) observa que ao adicionar fibras na argamassa mais vazios irão surgir devido aos dois tipos de contatos que podem ocorrer: interação fibra com fibra e interação fibra com agregado. A porosidade resultante destas interações está relacionada à formação de um arranjo estrutural e pelo efeito parede, proporcionados pela assimetria, pelo tamanho e pela disposição espacial da fibra na matriz, ilustrados na Figura 2.10.

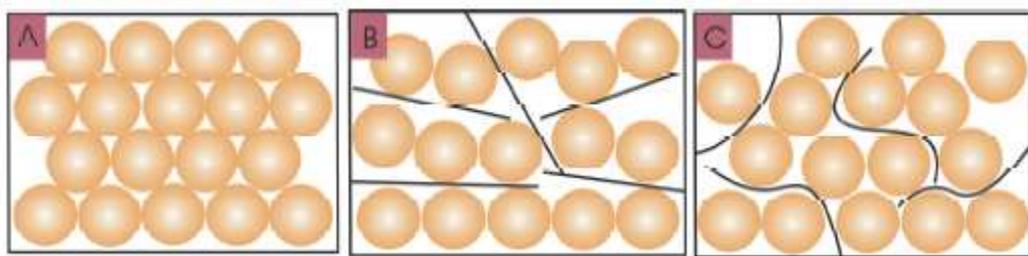


Figura 2.10 – Ilustração qualitativa sobre o potencial de formação de vazios devido: (a) Ao contato de superfícies curvas de mesmo diâmetro; (b) Superfície curva com lisa; (c) Adição de fibras flexíveis (SILVA, 2006).

Na Figura 2.10b tem-se o que ocorre ao adicionar fibra distribuída aleatoriamente no espaço como a de vidro, com módulo de elasticidade elevado (próximo a 75 GPa). Este tipo de fibra é incapaz de se dobrar e preencher os vazios. Já a Figura 2.9c ilustra a adição de uma fibra flexível, como a de polipropileno, com baixo módulo de elasticidade. Silva (2006), contudo, relata que ao mesmo tempo em que as fibras estão preenchendo os vazios entre as partículas esféricas, é favorecido o surgimento de pequenos vazios.

2.4.4 Comportamento hidrofílico das fibras

Para Silva (2006), a característica superficial das fibras é responsável pela possibilidade destas serem hidrófoba ou hidrofílica, fato que altera completamente o seu comportamento no compósito e modifica, por consequência, as características deste. As fibras vegetais, conforme estudado por Savastano Jr.; Dantas e Agopyan (1994), são consideradas hidrofílicas, apresentam capacidade de adsorverem água da matriz cimentícia, tendendo ao inchamento. Segundo Johnston (1997), estes fatos fazem com que a fibra tenha problemas de aderência com a matriz cimentícia, além de reduzir a resistência da fibra, permitindo maior deslizamento entre as fases. Por outro lado, segundo o autor, a água gerada da hidratação do cimento e adsorvida pelos poros da fibra pode produzir uma camada aguerrida na matriz, fazendo com que a aderência seja desenvolvida.

Para combater esse tipo de comportamento típico das fibras vegetais, Coutts e Warden (1990), citados por Savastano Jr.; Dantas e Agopyan (1994), sugerem que o compósito seja produzido por meio de extrusão, possibilitando reduzir a relação água/cimento. Uma vez retirada a pressão, a fibra porosa devolve à matriz parte da água por ela adsorvida, o que ajuda a manter a interface mais densa, minimizando os problemas de falta de aderência.

2.4.5 Zona de transição fibra-matriz

O comportamento de uma matriz cimentícia reforçada com fibras está intimamente ligado à interação fibra-matriz, ocorrida na zona de transição. De acordo com a teoria dos compósitos, a interface (que é a região de íntimo contato entre a fibra e a matriz) desenvolve uma função importante na transmissão da tensão entre as duas fases, no aumento da energia de fratura do compósito e no deslocamento das fissuras. A ligação interfacial pode ser química, física ou uma combinação entre elas. Ligações muito fortes entre fibras e matriz resultam em um material frágil com grande resistência, enquanto ligações fracas resultam em menores resistências e altas energias específicas. O desempenho mecânico do compósito está diretamente relacionado com as propriedades da interface fibra-matriz (COUTTS, 1988; SAVASTANO Jr., 1992).

Moraes *et al.* (2008) citam que a zona de transição como o ponto de maior fragilidade, ocorrendo nela a formação do efeito parede, que afeta propriedades como a resistência mecânica e a durabilidade dos compósitos. O efeito parede, segundo Savastano Jr (1992), consiste na formação de película de água na interface. O autor afirma que essa constatação é usada para explicar maiores porosidade e concentração de cristais de portlandita (hidróxido de cálcio) e de etringita (trissulfoaluminato de cálcio hidratado) próximos à interface, o que define a zona de transição, dotada de características diferentes do restante da matriz. Estas características, de acordo com Savastano Jr. (1992), podem apresentar-se com diferentes intensidades, estando diretamente ligadas à aderência fibra-matriz e, necessariamente, ao desempenho mecânico do compósito.

O aumento da aderência faz com que se torne maior a resistência à tração do compósito e também sua ductilidade, desde que não haja redução excessiva do comprimento crítico de ancoragem da fibra (SAVASTANO Jr., 1992). Para Sales (2006), contudo, quanto maior for a aderência, maior será a resistência mecânica, porém menor a tenacidade à fratura. Este comportamento resulta do aumento da incidência de fratura das fibras do compósito e a consequente diminuição na energia absorvida através do processo de arrancamento da fibra.

Gomes (2005) cita que tem ocorrido a busca pela melhor compreensão as características e formação da zona de transição, sua microestrutura e a influência nas propriedades macroscópicas das matrizes cimentícias reforçadas com fibras. Com o objetivo de obter melhorias na zona de transição entre fibra-matriz, que constitui o ponto mais frágil do compósito, o autor adicionou polímero à mistura.

Gomes (2005) conseguiu melhorar a aderência entre as fibras de poliamida e a matriz cimentícia por meio da adição de copolímero Va/VeoVa, havendo a formação de filme, o qual, possivelmente por meio de pontes de hidrogênio, atuou também como ponte de transferência de tensões da matriz cimentícia para as fibras de poliamida, permitindo a obtenção de ganhos em resistência à tração e à tenacidade. A adição do copolímero proporcionou a formação de uma zona de transição modificada, sendo possível, principalmente nas composições com maior teor do material, a formação de produtos de interação química entre o copolímero e íons provenientes da hidratação da matriz cimentícia como o acetato de cálcio.

2.5 TENDÊNCIAS NA ADIÇÃO DE FIBRAS

O uso de compósitos produzidos com adição de fibras está consolidado, representando uma alternativa no mercado dos materiais de construção. Balaguru (1994), em suas investigações sobre adições de fibras em matrizes cimentícias, ressalta que, embora a utilização das fibras venha ocorrendo ao longo do tempo, ainda são observadas lacunas que se conhecidas poderiam melhorar a compreensão da forma de ação para obter um melhor desempenho do compósito. De acordo com Mehta e Monteiro (2008) apenas recentemente foi possível obter concreto reforçado com fibras com melhor resistência e tenacidade.

Para Bernardi (2003), pesquisas empregando microfibras parecem indicar o contrário. Esta aparente contradição pode estar associada ao fato de que a incorporação de fibras normalmente provoca impactos sobre a trabalhabilidade. A autora relata ainda que historicamente, quando as fibras eram adicionadas à mistura, ocorria incorporação de ar, o que, associado aos problemas de moldagem e de distribuição inadequada das fibras na mistura, acabava tendo reflexos negativos sobre a resistência.

Garcez (2005) ressalta que atualmente, a partir da evolução da tecnologia dos aditivos plastificantes e superplastificantes, está sendo possível obter misturas trabalháveis, com pouca incorporação de ar e boa distribuição das fibras na mistura. Desta forma, se justificaria o fato de que o efeito final da adição de fibras, em termos de acréscimo de

resistência se tornou mais positivo. Estudos específicos são, todavia, necessários para esclarecer o assunto.

Silva (2006) também observou que fibras vêm sendo introduzidas na produção de compósitos sem um adequado desenvolvimento tecnológico, sendo o conhecimento ainda em grande parte empírico, fazendo-se necessário o domínio da tecnologia de produção desses elementos. Neste sentido, a autora buscou desenvolver procedimentos que permitissem avaliar mais precisamente as características de aplicabilidade de argamassas reforçadas com fibras, chegando-se, muito recentemente, à aplicação dos conceitos de reologia. Apesar de referências anteriores indicarem potencial melhoria nas propriedades mecânicas dos compósitos através da adição de fibras, não se dispõe de dados científicos que demonstrem o quanto e como a introdução de fibras afeta suas propriedades reológicas da matriz cimentícia, as quais, por sua vez, interferem sobremaneira nas propriedades mecânicas do material.

Outra tendência observada no estudo da adição de fibras refere-se à hibridização, com o objetivo de incrementar o desempenho dos compósitos através da aplicação de mais de um tipo de fibra com diferentes módulos de elasticidade e fatores de forma diferenciados. Segundo Brandt (2008), para concretos de alto desempenho tem sido realizado reforço com hibridismo de fibras de aço com tamanhos variados, contribuindo para diferentes propriedades mecânicas: controle de microfissuras, incremento na resistência à tração, aumento de ductibilidade, etc.

O grupo de fibras do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) vem desenvolvendo importantes pesquisas sobre este tema. Dentre os trabalhos inseridos na linha de pesquisa de adição de fibras, está, além de um estudo sobre hibridismo de fibras de aço, carbono e polipropileno, o projeto de desenvolvimento de compósitos cimentícios de alta ductilidade reforçados com fibras, conhecidos na literatura como *Engineered Cementitious Composites* ou também *Bendable Concrete*. Este tipo de compósito tem sido muito utilizado e disseminado mundialmente, especialmente pelo seu comportamento à tração, semelhantes às respostas obtidas em ensaios de materiais metálicos, que diferenciam esses compósitos de matrizes cimentícias convencionais reforçadas com fibras, sendo o grupo LEME um dos pioneiros no Brasil no estudo desses compósitos.

Também pode ser citada outra técnica especial conhecida por SIFCON (*Slurry Infiltrated Fibre Concrete*). Para Brandt (2008), o método permite a formação de um compósito resistente através da incorporação de um elevado teor de fibra de aço. As fibras são pré-

colocadas em módulos e o sistema é infiltrado pela pasta de cimento fluída. Através desta técnica é possível utilizar um teor de adição de fibra entre 8 – 12%, ou maiores, com fibras de 100 – 200 mm de comprimento. Este tipo especial de cimento é produzido com uma areia fina, micro-agregados e adições de cinza volante e sílica. A alta fluidez (baixa viscosidade) é necessária para permitir a adequada penetração no denso sistema de fibras. Destacam-se como principais características destes compósitos as elevadas resistências mecânica e ao impacto por meio de projéteis. Quando são aplicados não-tecidos de fibras aglomeradas tem-se uma adaptação da técnica denominada SIMCON (*Slurry Infiltrated Mat Concrete*). As principais aplicações são: pavimentos para cargas pesadas, brindagens anti-terroristas, paredes de bancos, etc., especialmente onde custo não é fator limitante.

Entre os sistemas de adição de fibras recentemente desenvolvidos destaca-se o FGFRCC (*functionally-graded fiber-reinforced cement composite*), assim denominado por se tratar de uma espécie de “classificação funcional” definida de acordo com os requisitos de desempenho exigidos do elemento. Shen *et al.* (2008) descrevem a técnica, que consiste na produção de compósitos com quatro camadas, sendo uma com teor de adição de 0% na zona de compressão e na de 2% na de tração, ou de acordo com a configuração exigida do elemento. Desta forma, maior quantidade de fibra estará disponível para atuar onde realmente é preciso, de maneira mais eficaz e econômica. Na fabricação das camadas homogêneas é utilizado sistema de extrusão, possibilitando manter o volume de fibras constante e disperso adequadamente.

Com relação ao avanço do conhecimento sobre a adição de fibras alternativas, no caso as fibras vegetais, Savastano Jr. e Santos (2008), afirmam que na sua utilização, se exploradas adequadamente, representam um recurso continuamente renovável, com baixo consumo de energia de fabricação, além de não oferecerem riscos à saúde como o caso das fibras minerais compostas por amianto. Neste sentido, em termos de desenvolvimento sustentável, o emprego do material se torna interessante, face sua disponibilidade. Contudo, a condição estrutural impõe ao compósito certas restrições de aplicações, sendo utilizado principalmente na confecção de pré-moldados para habitações. A tendência do desenvolvimento de pesquisas com o material aponta para a busca da durabilidade das matrizes formadas, considerado o principal empecilho na utilização do produto.

O interesse em substituir o uso do amianto vem sendo registrado. Sales (2006) descreve que esta necessidade de encontrar materiais alternativos ao emprego do produto cancerígeno surgiu como impulso às pesquisas. De acordo com a autora, entre as pesquisas desenvolvidas, compósitos reforçados com fibras sintéticas, tais como fibras de grafite, de boro ou aramida, que costumam ter bom desempenho, acabam tendo o custo

como fator proibitivo em aplicações nas quais prevalece o critério econômico, entre elas na produção de habitações de baixo custo. Além disso, em grande parte das aplicações não há exigências de alto desempenho mecânico, podendo-se aplicar materiais de menor custo, que atendam às especificações do produto final.

Sales (2006) também cita que têm sido estabelecidos critérios de desempenho para que as fibras possam atuar como substitutas do amianto. Inicialmente, buscou-se uma combinação de propriedades das fibras semelhante àquela existente no amianto: resistência mecânica, estabilidade química, estabilidade dimensional e morfologia. As tentativas de simples substituição do amianto têm tido sucesso limitado, havendo dificuldade em encontrar, em um único tipo de fibra, propriedades simultaneamente idênticas às do amianto, mostrando a necessidade de modificações na matriz para alcançar a interação adequada entre as duas fases.

Neste contexto, buscando contribuir para a solução de tais questões, também com o objetivo de agregar valor a um subproduto da indústria siderúrgica, a partir de parceria firmada entre a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), o meio acadêmico e uma empresa fabricante multinacional, fibras de escória de alto-forno foram desenvolvidas. O Capítulo 3 foi dedicado à descrição do produto, cuja aplicação como reforço em matrizes cimentícias consiste no objeto de estudo da presente pesquisa.

3 DESCRIÇÃO DA FIBRA DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

Este capítulo é destinado à apresentação de informações de interesse desse trabalho referentes à fibra de escória de alto-forno, tais como processo de fabricação, aplicações e descrição do ciclo de vida.

3.1 CARACTERÍSTICAS DA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

Nesse item serão relatados alguns aspectos básicos sobre a escória de alto-forno, material base usado para a fabricação da fibra reciclada estudada nesse trabalho, destacando: processo de geração, estimativa de quantidade gerada e aplicações possíveis.

3.1.1 Processo de geração

Velten *et al.* (2006) descrevem a escória de alto-forno como um subproduto ou resíduo da indústria siderúrgica, resultante do processo de fabricação do ferro fundido (ferro-gusa). A mesma é gerada pela eliminação de impurezas inerentes aos metais em seu estado natural. Silva (2005) descreve o processo de fabricação do ferro gusa, no qual materiais adicionados com a função de servirem de combustível são misturados a um fundente (em geral, calcário ou CaO; MgO ou CaF₂), originando um material constituído, fundamentalmente, por sílicoaluminatos de cálcio e, secundariamente, por sulfetos de cálcio e manganês, além de óxidos de ferro e manganês. A Figura 3.1 apresenta uma representação esquemática simplificada do processo que resulta na geração da escória de alto-forno.

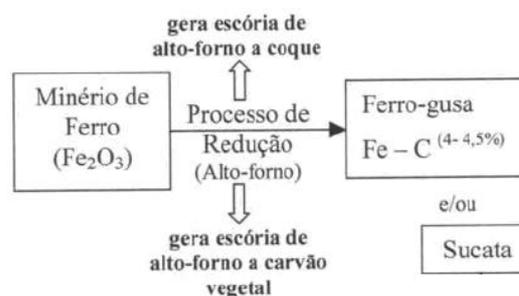


Figura 3.1 – Representação esquemática simplificada do processo de geração da escória de alto-forno. (Adaptado de CECATTO, 2003)

Segundo Silva (2005), durante o processo a escória líquida pode ser facilmente separada do metal em função da sua fusibilidade, atividade química, poder de dissolução e baixa densidade. Em cada corrida de produção, tanto a escória e o ferro-gusa líquidos são vazados, passando por calhas compostas por uma série de vertedouros, e se solidificam ao serem resfriados.

A unidade do alto-forno no qual acontece a fusão, que empresta o nome à escória gerada, é constituída por uma torre revestida por material refratário com grandes dimensões, normalmente revestida externamente com chapas de aço. A Figura 3.2 apresenta uma ilustração esquemática de uma unidade de alto-forno, indicando como se dá sua inserção no processo de fabricação do aço.

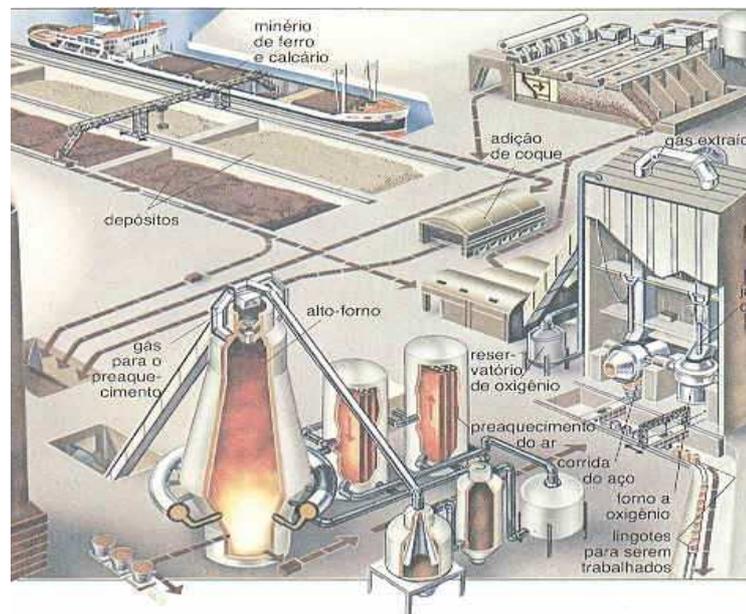


Figura 3.2 – Ilustração esquemática do processo de fabricação do aço mostrando a torre de alto-forno. (extraído de www.sucatas.com/metal).

3.1.2 Tipos de escória de alto-forno

Silva (2005) explica que, em função do processo de resfriamento utilizado, tem-se a geração de distintas escórias siderúrgicas: a escória granulada de alto-forno, a resfriada ao ar, e a escória expandida ou peletizada. Esses diferentes tipos apresentam densidade, granulometria, cristalografia e outras propriedades distintas, o que tem implicações importantes nas possibilidades de aplicação do resíduo.

A Figura 3.3 apresenta esquematicamente os diferentes tratamentos da escória na saída do alto-forno e os seus respectivos usos potenciais.

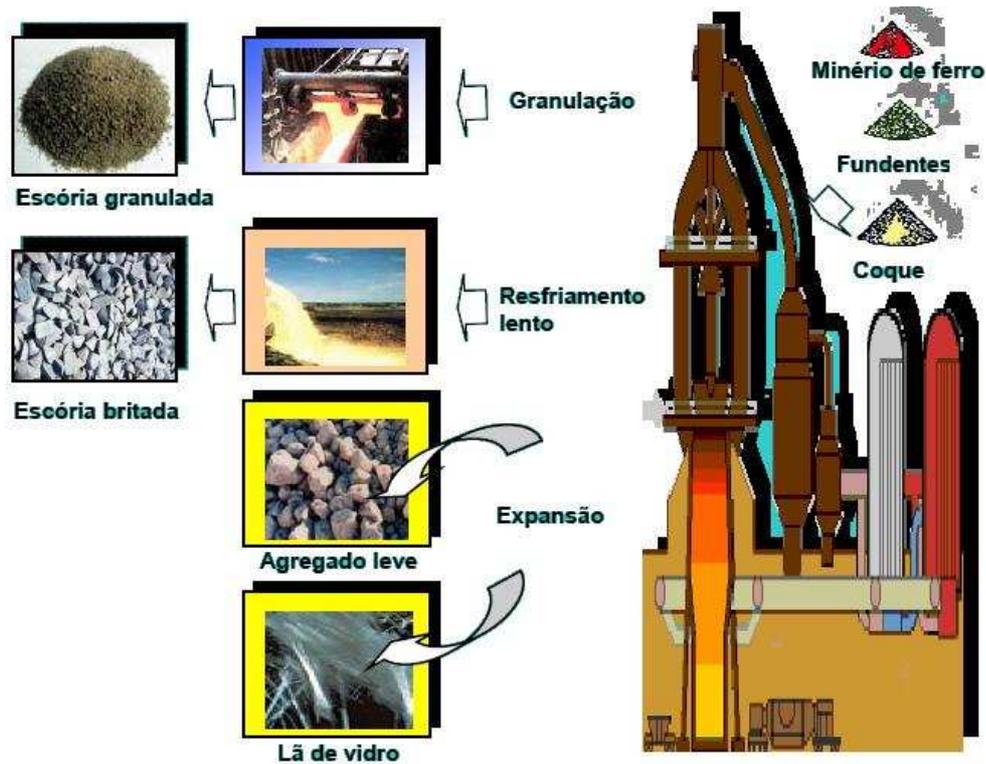


Figura 3.3 - Representação esquemática dos diferentes tipos de escórias geradas na saída do alto-forno e os respectivos usos potenciais (adaptado de ALEXANDRE; SIBILEAU, 1988; SBRIGHI; BATTAGIN, 2002; *apud* SILVA, 2005)

Como se pode deduzir da figura, uma estrutura granular e reativa é obtida quando se submete o material aquecido a um resfriamento brusco em água. Esse tipo de escória, predominantemente vítrea, possui poder aglomerante e pode ser usada como aglomerante secundário na fabricação de cimento.

Já quando o material é resfriado lentamente, através do arrefecimento lento em um poço ao ar livre, o mesmo origina um produto maciço e cristalizado, sendo considerado um material inerte que, depois de devidamente britado, pode ser utilizado como agregado.

John (1995) ressalta que a exposição ao processo de resfriamento brusco governa a microestrutura do material, com enormes implicações nas possibilidades de aplicações. O problema, porém, é que, devido a limitações operacionais, em muitas siderúrgicas, uma grande parte da escória é resfriada lentamente e se cristaliza. Assim, em um só processo, geram-se dois resíduos, com a mesma composição química, mas com potenciais de reciclagem completamente diferentes.

3.1.3 Quantidade de escória gerada e suas destinações

Silva (2005) cita que, de acordo com pesquisas realizadas em nove países responsáveis por 51% da produção mundial de aço, no ano de 1999 o total de escória produzida correspondia a 118,5 milhões de toneladas (Mt), sendo 71 Mt/ano de escória de alto-forno.

Segundo Savastano Jr. (2003), em 2002, no Brasil, de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS), o parque siderúrgico nacional produziu cerca de 27 milhões de toneladas de ferro-gusa, passando para 32 milhões de toneladas em 2003. John (1995) relata que cada tonelada de ferro-gusa produzida resulta na geração de aproximadamente 330 kg de escória de alto-forno. Dessa forma pode-se estimar que o volume de escória de alto-forno produzida no Brasil anualmente deve superar 10 milhões de toneladas.

De acordo com Silva (2005), para lidar com o grande volume produzido, as cinco maiores usinas siderúrgicas brasileiras (USIMINAS, CST, AÇOMINAS, COSIPA E CSN) optaram, por questões econômicas e ambientais, em granular praticamente toda a escória de alto-forno gerada. Essa preferência das empresas se baseia no fato de que a escória granulada, quando finamente moída a uma granulometria adequada, com a adição de ativadores ou em combinação com a cal liberada pela hidratação do clínquer, tem a capacidade de formar produtos cristalinos muito semelhantes aos obtidos na hidratação do cimento Portland. Por isso a escória apresenta um grande potencial de aplicação na indústria da construção civil, como material aglomerante secundário.

Essa tendência pode ser claramente verificada no Relatório de Sustentabilidade do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS, 2008), que apresenta diversas informações a respeito do consumo de matérias-primas aplicadas no processo de produção do aço, além de descrever as quantidades de resíduos e subprodutos gerados. A Figura 3.4 apresenta gráficos com indicação da geração de resíduos em 2007 e suas principais aplicações, sendo possível verificar a predominância de uso do resíduo para fabricação de cimento ou diretamente como agregado.

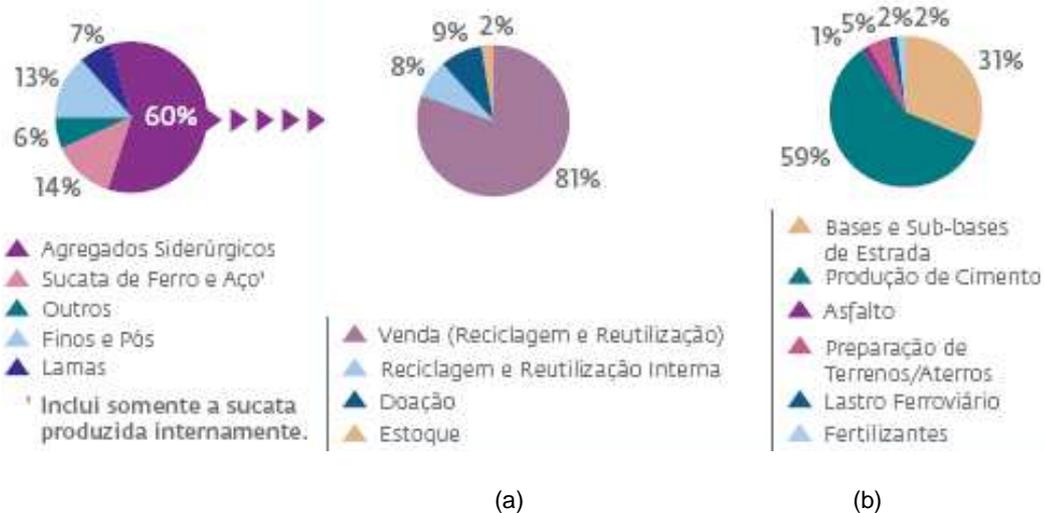


Figura 3.4 – Geração de resíduos siderúrgicos por tipo em 2007: (a) Destinação do agregado siderúrgico; (b) Principais utilizações do agregado siderúrgico (IBS, 2008).

John (2000) afirma que, em vários outros países, o destino da escória é muito mais diversificado, sendo parte granulada e parte resfriada ao ar e somente em uma fração pequena é realizado o processo de expansão ou peletização. A Figura 3.5 explicita essa questão, ao comparar as aplicações da escória de alto-forno no Brasil e no mundo. Na mesma se pode observar que praticamente toda a escória gerada no Brasil tem como destino a incorporação ao cimento. Já no mundo somente metade da escória tem essa destinação, sendo uma parcela importante usada como agregado.

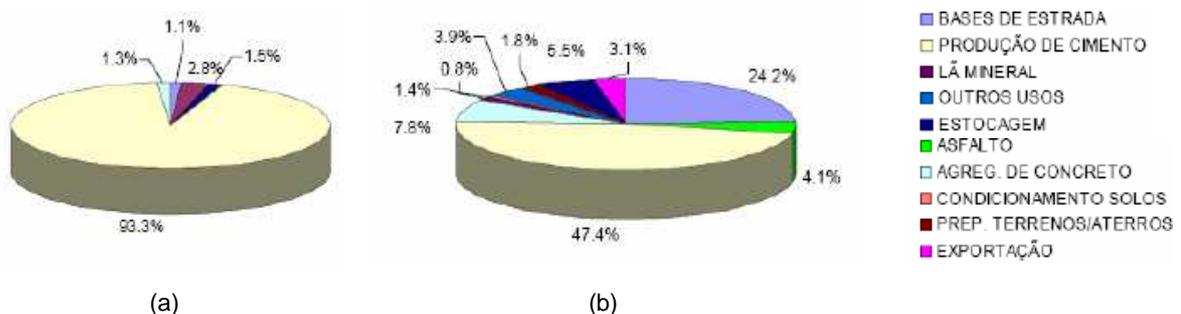


Figura 3.5 – Aplicação da escória de alto-forno: (a) no Brasil; (b) no mundo (adaptado de YUAN, 2003).

O uso como agregado graúdo já está consagrado em algumas situações, desde que não se trabalhe com escória reativa. Silva (2005) destaca, todavia, que a utilização da escória granulada como agregado miúdo apresenta certas desvantagens, em relação ao uso de areia natural, tais como um teor insuficiente de finos; a forma angulosa dos grãos; sua friabilidade; a densidade e granulometria variável; todos eles fatores desfavoráveis à trabalhabilidade e homogeneidade do concreto.

Outra possibilidade de aplicação importante consiste na utilização da escória em elevados teores para confecção de concretos de alto desempenho, em misturas binárias ou ternárias, resultando, principalmente, em alta resistência, maior trabalhabilidade, elevada durabilidade e extensão da vida útil. Essas propriedades justificam a potencial utilização dessas mesclas na construção de estruturas e plataformas em alto mar e em pontes e outras estruturas inseridas em ambientes agressivos ou climas severos de gelo-degelo.

Na pesquisa realizada por Silva (2005), considerando a redução crescente das reservas de argila, matéria-prima essencial para a fabricação de tijolos cerâmicos, componente utilizado em grande escala nas atividades da construção civil, se buscou analisar a possibilidade de aplicação de escória granulada de alto-forno com cal e areia para produção de tijolos prensados, avaliando o ciclo de vida do material. A autora justifica a realização do estudo destacando que são crescentes os estoques de escórias siderúrgicas nas usinas, evidenciando a necessidade de exploração de novas tecnologias para aplicação e aproveitamento desses subprodutos.

A fabricação de fibras recicladas se posiciona nesse quadro como uma nova alternativa de destinação para o material. Como se observa na Figura 3.5, em 2007 cerca de 2.8% do total de escória foi usado na fabricação de lã mineral. Se o uso de fibras recicladas para reforço de matrizes cimentícias for viável, pode-se expandir esse tipo de destinação, agregando valor ao resíduo e oferecendo uma fibra alternativa de baixo custo ambiental e econômico.

3.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA FIBRA DE ESCÓRIA

A fibra de escória de alto-forno surgiu no Brasil a partir de uma parceria firmada entre a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), o meio acadêmico e uma empresa fabricante multinacional. A iniciativa decorreu do interesse de produzir uma fibra alternativa para substituir o amianto, notoriamente conhecido por ser um produto cancerígeno, cujo uso já foi proibido em muitos países. Em paralelo, existia um interesse pelo desenvolvimento de novas aplicações para a escória de alto-forno, material produzido em larga escala no país e que, como discutido no item 3.1, apresenta baixo valor agregado, sendo encaminhado quase que exclusivamente às indústrias cimenteiras para utilização como aglomerante na produção do cimento.

A produção da fibra se inicia com a retirada da escória na forma líquida do alto-forno, sendo a mesma submetida a um processo de resfriamento brusco. Este ocorre através da emissão de ar comprimido em alta pressão contra o fluxo do subproduto siderúrgico, o que permite transformar o líquido em filamentos, como mostrado na Figura 3.6.

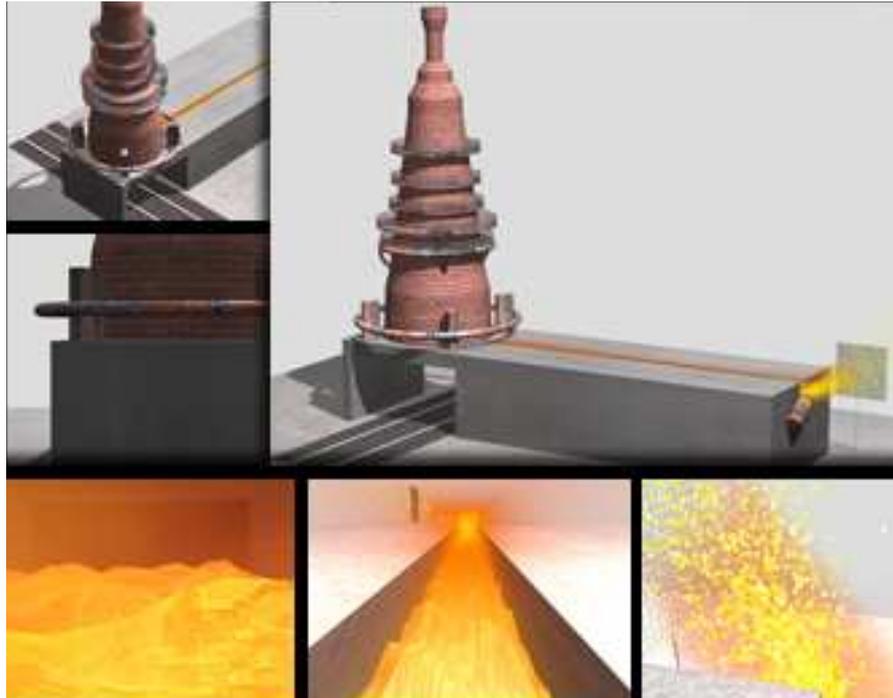


Figura 3.6 – Representação do processo de fabricação da fibra de escória de alto-forno (extraído de www.cmdmc.com.br).

Segundo a empresa Unifrax (2008), o procedimento para obtenção dos flocos de fibra pode ocorrer tanto por meio do processo de sopro (*Blown*) quanto do estiramento em rodas giratórias (*Spinning*).

Conforme relata Alves (2008), os filamentos de fibra gerados são posteriormente lançados em uma câmara coletora, na qual são pulverizados com aglutinante, de forma a se aglomerarem, para obtenção dos flocos de fibra, facilitando o transporte do produto. Embora isso gere alguns problemas de dispersão, essa foi a forma de utilização da fibra no presente trabalho, pois se desejava trabalhar com as fibras sem necessidade de reprocessamento. A Figura 3.7 apresenta uma imagem do produto final obtido.



Figura 3.7 – Fibra de escória de alto-forno: Fiberfrax (UNIFRAX, 2008).

A análise do processo de fabricação da fibra de escória evidencia o ganho ambiental obtido ao se aproveitar um material que poderia ser descartado em aterros industriais, produzido com baixo consumo energético, o que faz com que o custo final do produto seja reduzido. A matéria-prima, a escória, é retirada do alto-forno e processada ainda no estado líquido, não demandando um gasto energético elevado para fabricação da fibra.

3.3 CARACTERÍSTICAS DA FIBRA DE ESCÓRIA RECICLADA

Segundo o fabricante, a fibra de escória reciclada apresenta uma composição química estável. A mesma é considerada resistente aos meios alcalinos, possuindo boa resistência ao ataque da maioria dos ácidos e agentes corrosivos. Além disto, não sofre alterações em suas propriedades quando exposta à água ou vapor de água. Apesar dessas informações, no programa experimental será avaliada se existe a tendência da fibra de escória de alto-forno absorver água, o que pode prejudicar a aderência.

As Tabelas 3.1 e 3.2 contêm, respectivamente, a composição física e química da fibra de escória.

Tabela 3.1 – Composição física da fibra de escória de alto-forno: Fiberfrax (UNIFRAX, 2008) .

COR	branca à bege
RESISTÊNCIA À TEMPERATURA EM USO CONTÍNUO	700°C
TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA	732°C
TEMPERATURA DE DEVITRIFICAÇÃO	850°C
TEMPERATURA DE FUSÃO	1500°C
DIÂMETRO MÉDIO	3,5 µm
COMPRIMENTO DAS FIBRAS	50 µm a 30 mm
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	550 MPa
MÓDULO DE ELASTICIDADE	50 GPa
DUREZA (escala Mohs)	6
ABSORÇÃO DE ÁGUA	zero
DENSIDADE ESPECÍFICA	2600 kg/m ³
DENSIDADE APARENTE	90 a 350 kg/m ³

Tabela 3.2 – Composição química da fibra de escória de alto-forno: Fiberfrax (UNIFRAX, 2008).

SiO ₂	34,55 %
Al ₂ O ₃	13,2 %
TiO ₂	0,48 %
CaO	41,8 %
MgO	5,74 %
Fe ₂ O ₃	0,3 %
K ₂ O	0,39 %
Na ₂ O	0,74 %
P ₂ O ₅	0,09 %
MnO ₂	0,11 %

Verifica-se, analisando os dados da tabela 3.1, que, dadas as reduzidas dimensões da fibra de escória reciclada, a mesma poderia ser considerada uma microfibrila. De acordo com estudos anteriores do grupo LEME, isso indica que essa fibra pode ter atuação mais marcante na prevenção da microfissuração, ou seja, atuar antes da coalescência das microfissuras. Dessa forma, a mesma tende a se mostrar mais eficiente no controle da fissuração devida à retração do que no incremento da capacidade de carga.

Em relação à composição química, Alves (2008), em seu trabalho de dissertação, que avaliou o processo de reciclagem da escória de aciaria visando a produção de lã mineral, discute os efeitos dos óxidos nas características do produto vítreo formado. A Figura 3.9 apresenta uma imagem resumida com as funções relativas de cada tipo de óxido nos materiais vítreos. A fibra de escória, com base nesse diagrama, tende a apresentar boa durabilidade e viscosidade, com potencial de devitrificação, baixa expansão e densidade.

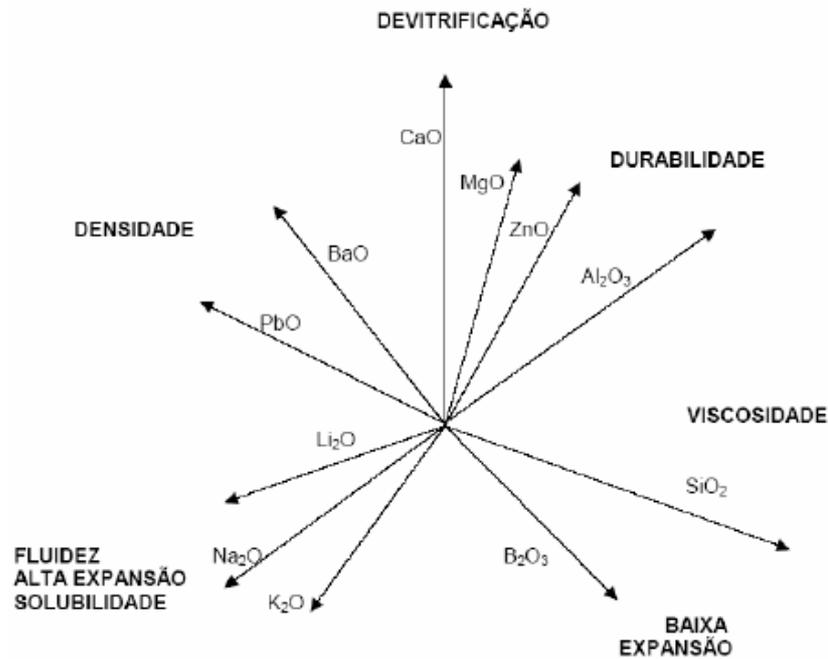


Figura 3.8 – Funções relativas dos óxidos nos materiais vítreos (AKERMAN, 2000; *apud* ALVES, 2008).

3.4 CICLO DE VIDA DA FIBRA DE ESCÓRIA

Para complementar a descrição da fibra de escória de alto-forno, fornecendo os subsídios teóricos para o estudo proposto, considera-se importante tecer algumas observações sobre o ciclo de vida e aplicações do material, visando à consideração dos impactos ambientais de sua aplicação como elemento de reforço de matrizes cimentícias.

A Figura 3.9 apresenta um fluxo de inventário da fibra de escória, com identificação dos principais *inputs* e *outputs* do processo, desenvolvido pela autora a partir das informações acerca do processo de fabricação da fibra descritas nos itens anteriores deste capítulo. Verifica-se que o processo de fabricação do ferro gusa é altamente impactante sob o ponto de vista ambiental, pois consome uma grande quantidade de insumos minerais e de energia, e gera uma grande quantidade de resíduos. O aproveitamento da escória líquida, todavia, reduz a pegada ecológica do processo de fabricação do gusa e torna a fabricação da fibra de escória um processo ambientalmente amigável.

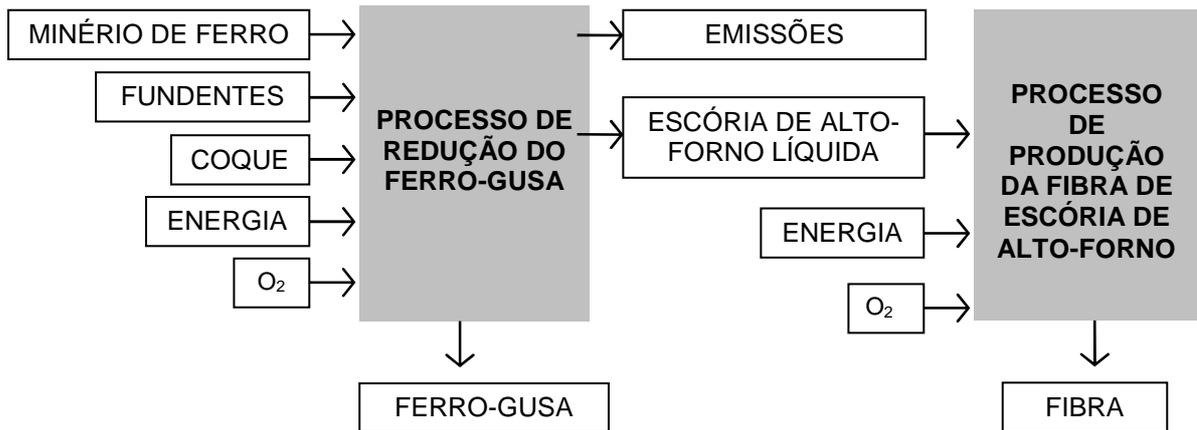


Figura 3.9 – Fluxo de inventário da fibra de escória.

Com base em revisão da literatura e tomando os preceitos da técnica de Análise de Ciclo de Vida (ACV) dos materiais, foram identificados tanto os benefícios quanto os impactos ambientais negativos desencadeados pela produção da fibra, os quais são descritos a seguir.

3.4.1 Benefícios ambientais

A produção da fibra oferece uma destinação final nobre para a escória de alto-forno, agregando valor ao subproduto siderúrgico. Segundo John (2000), devido à quantidade crescente de escória gerada e à capacidade de produção limitada das indústrias cimenteiras para absorver todo o produto, uma parte do material acaba sendo encaminhada a aterros industriais, ocasionando custos ambientais consideráveis.

Dessa forma, o aproveitamento da escória para produção da fibra representa um benefício ambiental, pois propicia a redução da quantidade de escória enviada para aterro. Este tipo de benefício foi destacado por Pinto (1999) como um aspecto positivo da reciclagem dos resíduos gerados na própria indústria da construção civil, havendo a possibilidade, a partir da minimização do volume de resíduos encaminhados a aterros, de reduzir número e dimensões de áreas destinadas a estes locais.

A utilização da fibra de escória de alto-forno contribui, ainda, para tornar mais fechado o ciclo de produção do aço, pois os resíduos gerados são transformados em subprodutos e aplicados como matéria-prima em outra cadeia produtiva, colaborando para a realização do desenvolvimento sustentável. Isso representa uma oportunidade de tornar o processo produtivo da indústria siderúrgica menos impactante ambientalmente.

Outro ponto positivo consiste na baixa demanda energética associada ao processo de produção da fibra, como já discutido. O impacto ambiental que mais preocupa os ambientalistas atualmente é o aquecimento global. A utilização da escória já fundida permite aproveitar com inteligência a energia consumida no processo de produção do aço.

Em resumo, ao comparar o processo de fabricação da fibra de escória com os de outras fibras sintéticas produzidas com diferentes materiais, podem ser destacados diferentes benefícios ambientais, entre eles:

- a fibra de escória é proveniente de um resíduo, não sendo consumidos recursos naturais não renováveis para a produção do insumo;
- a fabricação da fibra de escória contribui para o fechamento de um ciclo produtivo na indústria siderúrgica;
- o custo energético é baixo.
- a aplicação da fibra em substituição ao amianto para confecção de telhas e caixas de água pode evitar a utilização de um material cancerígeno cujo uso tende a ser oficialmente proibido em todo o país.

3.4.2 Possíveis impactos ambientais

John e Ângulo (2003) citam que o impacto causado pela reciclagem e reutilização de resíduos deve ser considerado. O mesmo pode ser entendido como o valor inferior ao somatório dos impactos ambientais causados pela gestão atual do resíduo em comparação com a do produto tradicional. Esse estudo dos impactos deve ser feito em termos de berço ao túmulo, entendido como a análise do ciclo de vida (ACV) dos materiais.

Neste contexto, os autores ressaltam a importância de avaliar o ciclo de vida destes materiais para haver o planejamento da reciclagem. Segundo os referidos autores, uma questão importante ao longo prazo consiste no risco do produto reciclado contaminar progressivamente o meio ambiente, fato que muitas vezes não é considerado na ACV.

O risco de contaminação do meio ambiente ao longo do tempo é presente, visto que não pode ser eliminada a possibilidade de que um dia os elementos químicos componentes da fibra reajam com o meio em que se encontrem. Também deve ser considerada a etapa final de uso do material compósito com adição da fibra de escória. Como ainda não foi desenvolvida tecnologia para a reciclagem de compósitos, que possibilite a adequada separação dos materiais integrantes (fibra e matriz cimentícia), é provável que os mesmos sejam encaminhados a aterros.

Com relação ao pequeno volume de resíduos gerados no processo de fabricação da fibra de escória de alto-forno, os mesmos podem ser classificados, de acordo com Alves (2008), como Classe II-A (não perigoso e não inerte), conforme a NBR 10004: *Resíduos Sólidos – Classificação* (ABNT, 2004). A opção para destinar estes resíduos são os aterros industriais classe II.

Já as embalagens usadas para armazenar as fibras de escória são constituídas principalmente de sacos plásticos e caixas de papelão e podem ser destinados, sem restrições, para a reciclagem.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo mostrou que a fibra de escória reciclada de alto-forno é uma fibra alternativa com grande potencial econômico e ambiental, além de características de durabilidade e afinidade com as matrizes cimentícias, que justificam o estudo de seu potencial para geração de compósitos de cimento Portland.

Segundo seu fabricante, o material é altamente versátil e apresenta potencial para ser aplicado na fabricação de diversos materiais da construção civil, na indústria de autopeças, em lacres e revestimentos de fricção, em bandas de rodagem de pneus. Além disso, possui propriedades para atuar como material isolante térmico, acústico e de prevenção ao fogo (UNIFRAX, 2008).

Os estudos já realizados (ALVES, 2008) indicam que é viável substituir total ou parcialmente fibras poliméricas (polipropileno, poliamida, poliéster e outras) e também fibras de aço e carbono, para produção de pisos, telhas, caixas d'água, tubulações (especialmente para transporte de esgoto) e fabricação de forros minerais incombustíveis.

Faz-se necessária, todavia, a continuidade dos trabalhos, bem como o desenvolvimento de novas pesquisas, de forma a confirmar esse potencial e caracterizar os compósitos gerados, de forma a acumular dados sobre o comportamento das matrizes cimentícias reforçadas com fibras de escória de alto-forno. Essa foi a motivação para montagem do programa experimental descrito no capítulo 4.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Conforme discutido no Capítulo 1, a presente pesquisa objetiva avaliar o comportamento de compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibra de escória de alto-forno, de forma a identificar suas potencialidades de uso. Neste capítulo será apresentada a estratégia de pesquisa adotada para possibilitar a consecução dos objetivos propostos, sendo descritas as etapas desenvolvidas no programa experimental e os ensaios realizados.

4.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

A revisão bibliográfica realizada no início do trabalho serviu para ampliar o conhecimento da autora sobre os assuntos considerados relevantes para a elaboração do trabalho, fornecendo a base teórica que possibilitou a determinação das variáveis de estudo, dos parâmetros controláveis, além do planejamento dos experimentos a serem desenvolvidos. A partir disso, a estratégia de pesquisa foi estruturada.

O programa experimental foi desenvolvido em quatro etapas, conforme ilustrado na Figura 4.1. A etapa 1 destinou-se à caracterização dos materiais empregados. Nesta etapa, por se tratar do estudo de um produto novo e cuja aplicação em matrizes cimentícias ainda não foi completamente estudada, considerou-se que seria interessante efetuar uma caracterização da fibra de escória, química e microestrutural, através de ensaios de Fluorescência de Raios X, Difração de Raios X e microscopia eletrônica.

Na etapa 2, a partir da constatação efetuada no ensaio de Fluorescência, realizado na etapa anterior, de que a fibra de escória apresenta elevada quantidade dos óxidos de cálcio e magnésio em sua composição, optou-se pela verificação da interação entre fibra e matriz cimentícia e potencial de expansão, pelo ensaio de *Le Chatelier*.

A etapa 3 foi destinada ao preparo das argamassas. Para tanto, inicialmente foram realizados estudos preliminares variando parâmetros de mistura dos corpos-de-prova, tais como tempo e sequência de adição dos materiais, buscando definir condições consideradas satisfatórias para a produção dos compósitos.

fibras sobre a trabalhabilidade dos compósitos. Depois, foram feitos os ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, além de verificado o módulo de elasticidade dos compósitos com diferentes teores de adição de fibra. Paralelo a isso, foram realizados os ensaios de retração restringida e de impacto do tipo queda de esfera que utilizaram apenas três teores de adição de fibra, classificados em: mínimo (0,3%), intermediário (0,9%) e máximo (3%).

Foram moldados corpos-de-prova prismáticos (4x4x16 cm) para os ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, anéis (espessura de 1 cm, altura de 4,5 cm e diâmetro de 8,4 cm) para o ensaio de retração e placas (30x30x2 cm) para serem utilizadas no ensaio de resistência ao impacto.

Nesse Capítulo se faz uma revisão dos procedimentos e técnicas experimentais adotadas. Já no Capítulo 5 se apresentam e se discutem os resultados obtidos nos ensaios realizados. As análises dos efeitos provocados pela adição da fibra no desempenho mecânico dos compósitos foram avaliadas por meio do uso da ferramenta de análise estatística ANOVA.

4.2 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ESTUDO

Com base na revisão bibliográfica e objetivando identificar os efeitos provocados pela adição da fibra de escória em matrizes cimentícias, foram selecionadas como variáveis de estudo a idade e o teor de adição de fibra, sendo mantido constante o traço (relação 1:3 de cimento:areia) adotado para produção dos compósitos e fixada a relação água/aglomerante de 0.5.

Os demais fatores: dimensão do agregado miúdo e método de dispersão da fibra foram considerados como parâmetros controláveis, sendo avaliada a influência que sua variação traz à trabalhabilidade e resistência mecânica dos compósitos através de estudos exploratórios realizados no início do programa experimental.

A Tabela 4.1 apresenta as variáveis de estudo e a Tabela 4.2 os parâmetros controláveis adotados na fase principal de ensaios. Foram adotados teores de fibra variando entre 0% e 3%. A maior parte dos teores estudados, todavia, ficou abaixo de 1,5%, pois acima desse valor os impactos da adição de fibras sobre a trabalhabilidade tendem a ser muito acentuados. Por isso são raros os compósitos fabricados com tecnologia comum de mistura e teores de fibra superiores a 2%.

Tabela 4.1 – Variáveis de estudo.

DESCRIÇÃO	NÍVEIS	NÚMERO
IDADE (DIAS)	7 - 14 - 28 - 91	4
TEOR DE ADIÇÃO DE FIBRA (%)	0% - 0,3% - 0,6% - 0,9% - 1,5% - 3%	6

Tabela 4.2 – Parâmetros controláveis.

DESCRIÇÃO	NÍVEIS	NÚMERO
DIMENSÃO DO AGREGADO	SEM PENEIRAR - PEN. 2,4 mm - PEN. 1,2 mm	3
DISPERSÃO DA FIBRA	MANUAL – MECÂNICA (MOAGEM)	2

As Tabelas 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6, apresentam as matrizes experimentais adotadas para a realização dos ensaios de resistência mecânica, de impacto por queda de esfera, de retração restringida e de módulo de elasticidade, respectivamente.

Tabela 4.3 – Matriz experimental para os ensaios de resistência mecânica.

TEOR FIBRAS/ IDADE	0	0,30%	0,60%	0,90%	1,50%	3%	CORPOS-DE- PROVA
7	3	3	3	3	3	3	18
14	3	3	3	3	3	3	18
28	3	3	3	3	3	3	18
91	3	3	3	3	3	3	18
						TOTAL	72 CPS

Tabela 4.4 – Matriz experimental para o ensaio de impacto – queda de esfera.

TEOR FIBRAS/ IDADE	0	0,30%	0,90%	3%	TOTAL CPS
28	3	3	3	3	12

Tabela 4.5 – Matriz experimental para o ensaio de módulo de elasticidade.

TEOR FIBRAS/ IDADE	0	0,30%	0,60%	0,90%	1,50%	3%	TOTAL CPS
28	3	3	3	3	3	3	18

Tabela 4.6 – Matriz experimental para o ensaio de retração restringida.

TEOR FIBRAS	0	0,3%	0,6%	0,90%	1,50%	3%	TOTAL ANÉIS
ANÉIS	1	1	1	1	1	1	6

Optou-se por realizar os ensaios de módulo de elasticidade e de impacto somente aos 28 dias, pois o objetivo não era obter a evolução dos resultados ao longo do tempo, mas sim caracterizar a variação dos valores obtidos em função do teor de fibra empregado, em uma

determinada idade. Já para verificar a retração restringida dos compósitos foi efetuado um monitoramento dos anéis durante 14 dias, possibilitando a identificação do comportamento dos mesmos frente à fissuração. Dada à complexidade deste tipo de ensaio foi adotado somente um corpo-de-prova por teor.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

Neste item se apresenta a caracterização dos materiais empregados nos experimentos.

4.3.1 Agregado miúdo

Foi utilizada areia quartzosa retirada do Rio Jacuí, sendo que, nos ensaios desenvolvidos para avaliar os efeitos das variáveis de estudo, selecionou-se os percentuais passantes nas peneiras com abertura de 2,4 mm ou 1,2 mm, de forma a controlar o tamanho máximo do agregado miúdo utilizado. A Tabela 4.7 apresenta a caracterização granulométrica do agregado, elaborada de acordo com a norma NBR NM248: *Agregados – Determinação da composição granulométrica* (ABNT, 2003).

Tabela 4.7 – Caracterização granulométrica do agregado miúdo.

ABERTURA NOMINAL (mm)	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	< 0,15
% MÉDIA RETIDA	0	5	8	18	45	23	1
% MÉDIA RETIDA ACUMULADA	0	5	13	31	76	99	100
MÓDULO DE FINURA	2,24						
MASSA ESPECÍFICA (g/ cm³)	2,46						

4.3.2 Cimento

Foi utilizado como aglomerante um cimento Portland tipo CP-V ARI. Todo o cimento usado no programa experimental foi proveniente de um mesmo lote de fabricação.

4.3.3 Aditivo

Para correção da trabalhabilidade após a adição das fibras foi aplicado um aditivo do tipo plastificante. O mesmo foi aplicado na quantidade suficiente para que fosse mantido um índice de consistência de 255 ± 10 mm, conforme recomendado pela norma NBR 13276: *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência* (ABNT, 2005). Esse índice é considerado pela norma NBR 13279 – *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão* (ABNT, 2005) como um requisito necessário para possibilitar a moldagem dos corpos-de-prova

prismáticos a serem utilizados nos ensaios de resistência à tração na flexão e compressão. O mesmo foi adotado como referência também para a produção das placas usadas nos ensaios de impacto por queda de esfera.

4.3.4 Água de amassamento

Foi empregada água proveniente da rede de abastecimento local.

4.4 FASE 1: CARACTERIZAÇÃO BÁSICA DA FIBRA

Para fins de comparação com os valores fornecidos pelo fabricante, foi realizado um ensaio de Fluorescência de Raios X para determinação dos elementos químicos constituintes da fibra. Adicionalmente, buscou-se investigar qual a composição química da fibra através de ensaios de Difração de Raios X e de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

4.4.1 Fluorescência de Raios X

Para o ensaio de fluorescência uma amostra de fibra foi cominuída em moinho de bolas até gerar um pó passante na peneira #200 (0,075 mm). A amostra foi examinada num equipamento da marca SHIMADZU, modelo XRF-1800, calibrado para detecção de óxidos, pertencente ao Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS.

4.4.2 Difração de Raios X

A técnica de difração de Raios X permite a identificação das fases cristalinas que compõem os materiais e a obtenção de importantes informações sobre suas características cristalográficas. A análise envolve a incidência de um feixe de raios X monocromático na amostra em estudo, na qual sucessivos planos atômicos das diversas células unitárias que compõem a estrutura cristalina das fases presentes na amostra produzem um efeito de difração dos raios X em várias direções. As direções apresentadas nos picos dos diagramas de difração, contudo, são devidas a interações produzidas pelas células unitárias, surgindo um feixe difratado de raios X nas direções em que os efeitos de células vizinhas entre si provocam uma interferência construtiva completa.

No presente trabalho o ensaio foi realizado para averiguar se a fibra apresenta estrutura amorfa, como indicado pelo fabricante. Nesse caso, o material deve fornecer um difratograma semelhante ao esboçado na Figura 4.2(b). Mas os primeiros exames visuais indicaram que a fibra usada nos ensaios apresentava certa quantidade de shot, resíduo de escória que no processo de fabricação da fibra não foi processado. Esse material apresenta

a mesma composição química da fibra de escória, mas, segundo informações do fabricante, pode ter estrutura cristalina, o que faria com que aparecessem picos no difratograma, como mostrado na Figura 4.2(a).

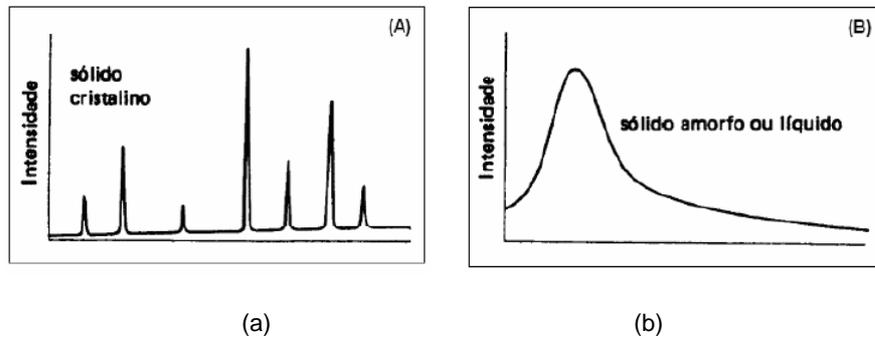


Figura 4.2 – Difratogramas típicos de: (a) Material com estrutura cristalina e (b) Material amorfo. (adaptado de ALVES, 2008).

Os ensaios de difratometria foram realizados em amostras de fibras cominuídas; em amostras de shot; em amostras de matriz cimentícia sem fibras e em amostras dos compósitos com fibras após endurecimento. No caso do shot, o material para preparação da amostra foi obtida do resíduo acumulado no fundo da embalagem da fibra, sendo o shot separado da fibra por meio de peneiramento.

O preparo das várias amostras envolveu a moagem para obtenção de amostras de pó passantes na peneira #200 (0,075 mm). Essas eram compactadas em moldes especiais e submetidas à incidência dos feixes de raios x, num equipamento modelo X'Pert MPD, fabricado pela Philips Analytical, mostrado na figura 4.3.



Figura 4.3 – Visão do equipamento de difração de Raios X usado no trabalho.

4.4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O equipamento utilizado nos ensaios desse trabalho foi um Microscópio Eletrônico de Varredura da marca Jeol, modelo JSM 6060. Foram feitas análises tanto dos compósitos quanto da fibra isolada, de forma a obter dados sobre a espessura e aparência superficial das mesmas.

Durante a análise de microscopia foram efetuadas algumas determinações de composição química via espectrografia de raios X por energia dispersiva (EDS). Tal ferramenta permite a análise química elementar em um ponto ou em uma área da amostra em termos qualitativos, semi-quantitativos e quantitativos.

No presente trabalho, a associação do MEV e do EDS permitiu caracterizar algumas seções dos compósitos de argamassa produzidos com adição da fibra de escória e analisar a interação entre fibra-matriz cimentícia, de forma a avaliar aderência e a forma de ruptura do compósito e da fibra.

4.5 FASE 2: AFINIDADE FIBRA X MATRIZ CIMENTÍCIA

A etapa 2 do programa experimental consistiu na análise da interação entre matriz cimentícia e a fibra de escória, através da realização do ensaio de Le Chatelier. Conforme Figueiredo (2000), a falta de afinidade entre a fibra e a matriz pode acarretar em uma durabilidade insatisfatória do compósito. O autor cita como exemplo o que ocorre com a utilização de fibras de vidro em matrizes cimentícias, onde se tem a natural deterioração da fibra por parte dos álcalis do cimento, demandando a utilização de uma fibra especial, resistente a álcalis. A idéia era verificar se a exposição das fibras à matriz cimentícia podia originar um comportamento expansivo que poderia provocar o fissuramento da matriz. Para tanto se utilizou o ensaio de Le Chatelier, descrito a seguir.

4.5.1 Ensaio de Le Chatelier

O ensaio foi realizado segundo procedimentos dispostos na norma NBR 11582: *Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier* (ABNT, 1991), que prevê a confecção de pastas com 500g de cimento e água suficiente para a moldagem de seis corpos-de-prova envoltos pelas agulhas de Le Chatelier. Adotou-se como teor para adição da fibra nas pastas o valor de 10% da massa do cimento. Na confecção da pasta, foi utilizado o cimento CP-V ARI e água potável em quantidade necessária para obtenção de consistência normal, sendo os corpos-de-prova mantidos imersos em água por $(20 \pm 4$

horas). Foram confeccionadas três pastas de cimento: referência, sem adição da fibra; com adição da fibra de escória e com adição apenas do shot da fibra.

Conforme orientações da norma, buscando identificar a influência que o MgO pode exercer na pasta de cimento, três das agulhas foram curadas a frio, sendo deixadas imersas em água à temperatura ambiente por 6 dias consecutivos, de modo que as extremidades das hastes permanecessem fora da água. As outras três agulhas foram ensaiadas em cura à quente para verificar o efeito da presença de CaO. As agulhas foram aquecidas por quase 5 horas, havendo medição dos afastamentos das hastes de hora em hora. A Figura 4.4 apresenta imagens dos procedimentos de cura a frio e a quente, que fazem parte dos procedimentos do ensaio de Le Chatelier.



Figura 4.4 – Ensaio de Le Chatelier: (a) Cura a frio e (b) Cura a quente.

4.6 FASE 3: DEFINIÇÃO DA ARGAMASSA PADRÃO

Na fase 3 do trabalho foram definidos os traços e procedimentos de confecção das argamassas padrão.

4.6.1 Traço

Optou-se pelo uso do traço clássico de 1:3 (cimento:areia) e relação água/cimento de 0,50, o que tende a gerar uma argamassa com boas características de resistência e trabalhabilidade. Considerou-se importante fixar esses parâmetros, pois os mesmos são muito influentes e poderiam dificultar a visualização dos efeitos devidos somente à adição dos diferentes teores de fibras à matriz cimentícia.

4.6.2 Mistura e Moldagem

As etapas de mistura e moldagem dos corpos-de-prova têm uma importância fundamental, pois afetam a dispersão das fibras e a homogeneidade da matriz, fatores que interferem fortemente nas propriedades mecânicas do compósito. Conforme explica Silva (2006), a

adição de fibra não deve prejudicar as propriedades reológicas das argamassas, sendo necessário assegurar boa trabalhabilidade e adequada interação fibra x matriz.

Para estabelecer quais os procedimentos de preparo adequados foram realizados diversos estudos preliminares, nos quais se variou o método e tempo de mistura, a seqüência de adição dos materiais e a técnica para dispersão da fibra, buscando evitar a formação de “grumos”, definidos por Figueiredo (2000) como aglomerações de fibra que constituem pontos frágeis no compósito, prejudicando seu desempenho mecânico.

Após os ensaios preliminares decidiu-se que o preparo da mistura seria realizado em argamassadeira de eixo vertical, tomando como base o procedimento recomendado pela NBR 13276: *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência-padrão* (ABNT, 2005). A Figura 4.5 apresenta uma ilustração do procedimento adotado para execução da mistura.

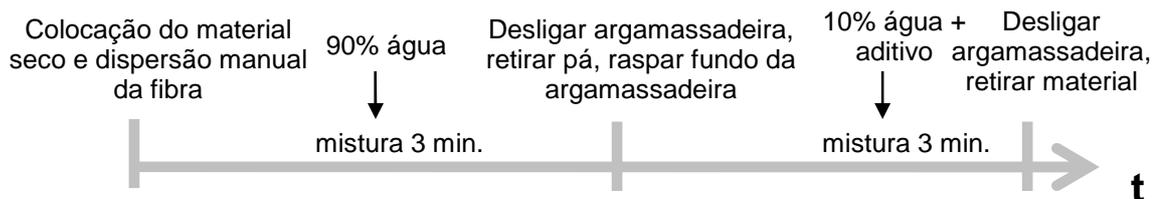


Figura 4.5 – Etapas do processo de mistura ao longo do tempo.

A opção pela colocação da fibra e do agregado no início do processo de mistura ocorreu em função da revisão da literatura e do resultado dos testes preliminares realizados. Silva, Barros e John (2007), em estudo sobre a influência do método de mistura na produção de argamassas com fibras, observaram redução da aglomeração de fibra quando os materiais eram adicionados no seu estado natural (condição seca), havendo maior tendência à formação de grumos quando os mesmos eram molhados. Os autores atribuem a melhora da mistura com os materiais no estado seco devido ao atrito gerado entre os constituintes, capaz de dispersar as fibras inicialmente aglomeradas. O atrito se evidencia quando a água não está presente na mistura, pois a água acaba por lubrificar os grãos sólidos, o que evita o contato entre eles e, conseqüentemente, não contribui para a dispersão dos aglomerados iniciais de fibras. Essa tendência foi notada no presente trabalho. A parada aos 3 minutos permite que o material do fundo do recipiente seja incorporado à mistura.

4.6.3 Dimensão do Agregado e Preparação da Fibra

Silva (2006) enfatiza que, ao se adicionar fibras, estudos exploratórios devem ser realizados para que se defina o conjunto de parâmetros de produção que permite que o potencial da

técnica de adição seja otimizado. Dessa forma, buscando neutralizar a influência que certos parâmetros não controlados na presente pesquisa poderiam exercer nas propriedades dos compósitos, foram moldados corpos-de-prova preliminares para avaliar a influência dos mesmos e determinar a combinação mais satisfatória a ser adotada para produção dos compósitos de argamassa a serem ensaiados na fase principal do programa experimental.

Um dos parâmetros analisados foi a dimensão máxima do agregado. Para tanto foram produzidos compósitos de argamassa utilizando a areia disponível e usando somente as frações passantes nas peneiras de 2,4 mm e de 1,2 mm. A Figura 4.6 apresenta imagens do agregado miúdo nas três condições analisadas. Os corpos-de-prova gerados foram submetidos a ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão. Os resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 5.



(a) (b) (c)
 Figura 4.6 – Agregado miúdo: (a) Sem peneiramento (b) Passante em peneira com abertura de 2,4 mm; (c) Passante em peneira com abertura de 1,2 mm.

Também foi avaliado o método de dispersão utilizado para preparar a fibra de escória a ser adicionada na matriz cimentícia. Foram testados diferentes procedimentos, incluindo a dispersão de forma manual das fibras e uma mecânica, através do uso de moinho de bolas, que ajudou a separar as fibras, mas diminuiu seu tamanho médio. A Figura 4.7 ilustra o procedimento de moagem da fibra realizado com auxílio do moinho de bolas disponível no laboratório LEME.



(a) (b) (c) (d)
 Figura 4.7 – Uso do moinho de bolas: (a) Colocação fibra no moinho; (b) Funcionamento do equipamento; (c) Resultado parcial da moagem da fibra; (d) Resultado final do procedimento.

4.7 FASE 4: AVALIAÇÃO DAS ARGAMASSAS

A última etapa do programa experimental consiste na realização de ensaios para avaliar os efeitos provocados pela variação dos parâmetros controláveis e variáveis de estudos dos compósitos de argamassa reforçados. De forma a analisar quantitativamente o desempenho dos compósitos, foram desenvolvidos os seguintes ensaios: trabalhabilidade, resistência à tração na flexão, resistência à compressão, retração restringida, módulo de elasticidade e resistência ao impacto do tipo queda de esfera.

4.7.1 Ensaio de Trabalhabilidade

A trabalhabilidade foi avaliada de acordo com o método proposto na norma NBR 13276 – *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência-padrão* (ABNT, 2005). Após a mistura colocou-se o material na mesa de consistência, sendo aplicados 30 golpes em 30 segundos. Foram então tomadas medidas dos diâmetros, para obtenção dos valores dos índices de consistência. A Figura 4.8 apresenta imagens do ensaio sendo realizado.



Figura 4.8 – Etapas do ensaio de trabalhabilidade.

4.7.2 Ensaio de resistência à tração na flexão

O ensaio mecânico de resistência à tração na flexão foi realizado segundo orientações previstas na norma NBR 13279 – *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão* (ABNT, 2005). Foram moldados 3 corpos-de-prova prismáticos (4 x 4 x 16 cm) para cada idade e teor de adição de fibra. Os mesmos foram mantidos cobertos com lona por 24 horas, sendo depois desmoldados e encaminhados à câmara úmida, onde permaneceram até a idade de ensaio. Os mesmos foram ensaiados à tração na flexão, através da aplicação de carga pontual e centrada no eixo dos corpos-de-prova, nas idades de 7, 14, 28 e 91 dias. A prensa utilizada no ensaio foi uma prensa hidráulica computadorizada marca SHIMADZU, com capacidade de 200tf, dotada de controle de carregamento. Durante o ensaio, um LVDT foi utilizado para controle dos deslocamentos e obtenção das curvas de tensão x deformação. A Figura 4.9 contém imagens do ensaio sendo desenvolvido.

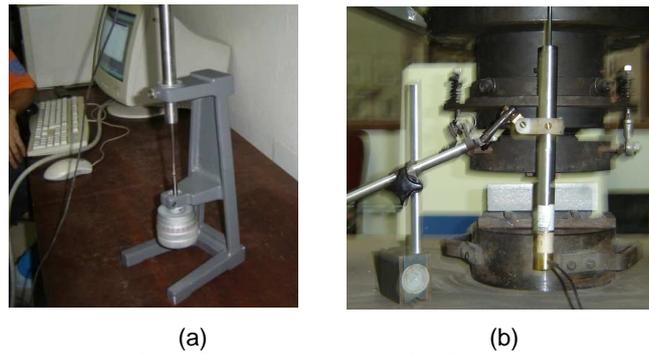


Figura 4.9 – Ensaio de resistência à tração na flexão: (a) Calibração do LVDT; (b) Aplicação da carga.

A realização dos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão seguiu a recomendação de Guimarães e Figueiredo (2003), sendo os corpos-de-prova posicionados com a face arrasada paralela à direção da carga aplicada. Esta medida busca evitar que os valores de carga sejam adulterados devido a uma possível concentração de fibra no fundo do corpo-de-prova, proporcionada pelo tipo de moldagem adotada.

4.7.3 Ensaio de resistência à compressão

As metades resultantes dos corpos-de-prova rompidos à tração na flexão foram utilizadas no ensaio mecânico de resistência à compressão, realizado segundo a NBR 13279: *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão* (ABNT, 2005). A Figura 4.10 ilustra o ensaio sendo realizado, que também fez uso de LVDT para controle dos deslocamentos e obtenção das curvas de tensão x deformação.



Figura 4.10 – Ensaio de resistência à compressão.

4.7.4 Estimativa do módulo de elasticidade dinâmico

O procedimento de ensaio para determinação das estimativas de módulo de elasticidade dinâmico em argamassas foi o mesmo usado em várias pesquisas recentes do Consórcio Setorial para Inovação em Tecnologia de Revestimentos de Argamassas – CONSITRA (JOHN, 2005), ao qual o trabalho desenvolvido por Silva (2006) está vinculado.

Para realização do ensaio foi utilizado um aparelho de ultrassom da marca James Instruments. Os corpos-de-prova utilizados para este ensaio foram retirados aos 28 dias da câmara úmida, sendo pesados, medidos e submetidos ao ultrassom. A Figura 4.11 apresenta imagens do ensaio sendo desenvolvido.



Figura 4.11 – Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico: (a) Passagem de camada de gel sobre os transdutores; (b) Ensaio sendo realizado.

A análise do resultado do ensaio é feito em função da determinação do tempo e da velocidade com que o pulso ultrassônico se propaga no interior do corpo-de-prova. Para cálculo do módulo de deformação dinâmico, foi adotada a equação 4.1:

$$E = \frac{\rho V^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde:

E = módulo de deformação dinâmico (GPa);

ρ = densidade do corpo-de-prova (kg/m^3);

V = velocidade de pulso (km/s);

ν = coeficiente de Poisson (0,2 para argamassa).

4.7.5 Ensaio de Retração restringida

Para averiguar a capacidade das fibras de atuar no controle da fissuração devido à retração em baixa idade realizou-se um ensaio de retração restringida utilizando o “anel de Coutinho”, procedimento já aplicado com sucesso em muitas pesquisas e com base na norma ASTM C1581 (2004). O problema foi a definição do tamanho do anel. O ensaio do anel tem sido executado com corpos-de-prova de dimensões muito distintas, o que dificulta a comparação entre os resultados disponíveis na literatura. Em geral, pode-se considerar que, quanto menor for a espessura do anel de aço, maior será a deformação do mesmo, e, portanto, menor o grau de restrição, o que se traduz em tensões menores.

O procedimento proposto pela AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) para esse tipo de ensaio sugere a adoção de um anel com diâmetro interno de 300 mm e deve se constituir em um consenso para análise de concreto. Mas como as provisões de norma para argamassas ainda não foram consolidadas, no presente estudo a escolha das dimensões dos anéis de aço e do compósito foi baseada nos procedimentos usados na pesquisa de Sales (2006), que utilizaram o método de ensaio do anel para medir a retração restringida em argamassas reforçadas com polpa de bambu. Os mesmos defendem a idéia de que a espessura do anel de argamassa deve ser determinada em função da aplicação que terá o material. Dessa forma, para os corpos-de-prova de argamassa desse trabalho, decidiu-se adotar um anel com a configuração mostrada na Figura 4.12.

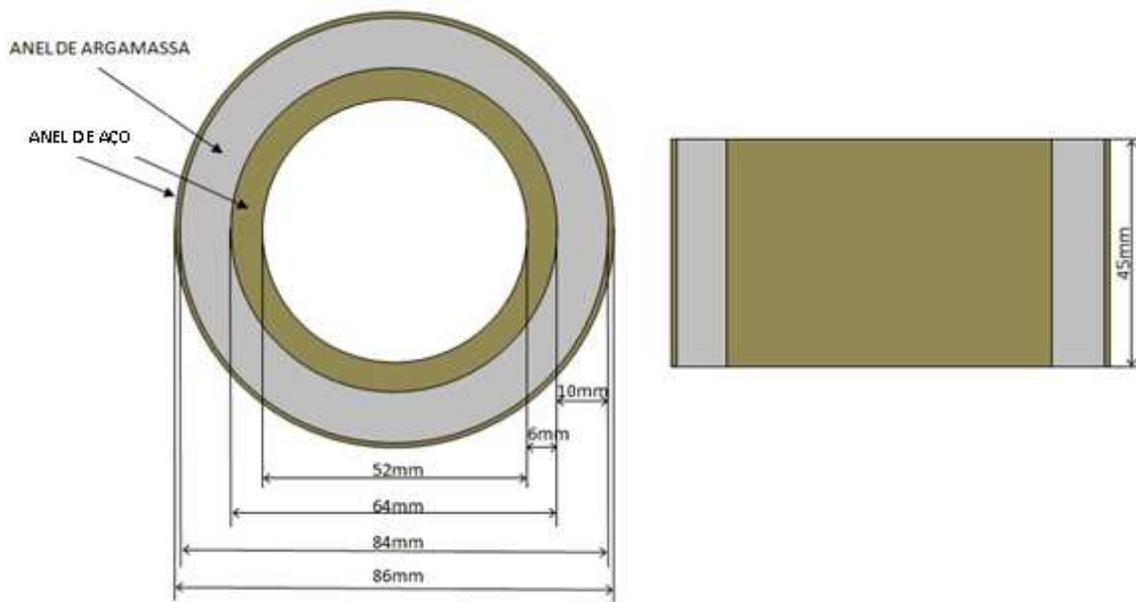


Figura 4.12 – Dimensões dos anéis de aço e da argamassa.

O anel interno serve para promover a restrição à retração do anel formado pelos compósitos. O surgimento de fissuras ocorre devido à tensão tangencial de tração e a tensão radial, ambas variáveis ao longo da espessura do anel.

De acordo com a norma ASTM C1581 (2004), devem ser utilizados extensômetros para a avaliação das deformações sofridas pelo anel de aço. Seguindo nessa linha, foram utilizados anéis metálicos instrumentados com extensômetros elétricos para avaliar as deformações causadas pela retração no compósito e analisar a eventual melhoria na resistência à fissuração dos compósitos com adição de fibras de escória de alto-forno.

Como se pode ver na Figura 4.13(a), três extensômetros foram aplicados no anel metálico interno, igualmente espaçados em 120°. Os mesmos foram posicionados horizontalmente na linha central que determina a metade da altura do anel. A aquisição de dados dos extensômetros foi efetuada com auxílio de um equipamento SYSTEM 5000 da Vishay Instruments, que pode ser visto na Figura 4.13(b). Foi empregado um canal para cada extensômetro, sendo obtidas leituras individuais que possibilitaram a verificação do comportamento em cada um dos pontos instrumentados.

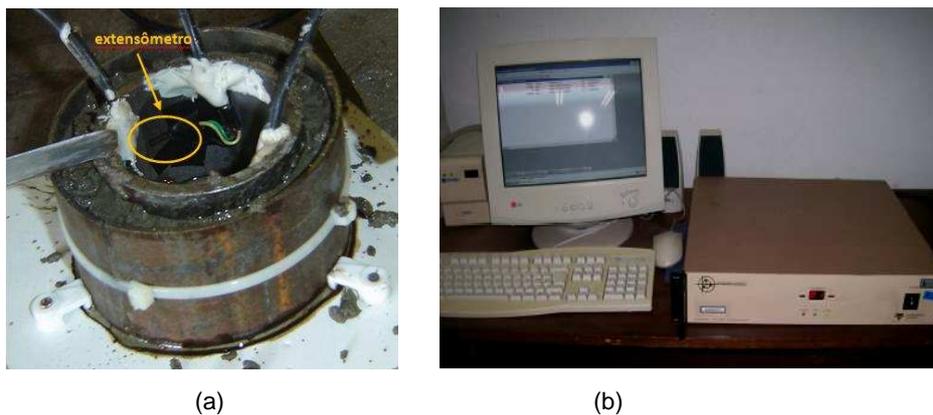


Figura 4.13 – Instrumentação ensaio: (a) Anel de aço instrumentado com extensômetros (*strain gages*); (b) Software de aquisição de dados.

A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada colocando e compactando a argamassa entre os dois anéis, conforme mostrado na Figura 4.14 (a). Após 24 horas era retirado o anel externo, deixando a argamassa exposta como se pode constatar na Figura 4.13(b). Apesar da recomendação da norma ASTM C1581 (2004) para vedar a face superior dos anéis de argamassa com material selante, contudo, em função da dimensão reduzida das mesmas, optou-se por não fazer este procedimento.



Figura 4.14 – Anéis de argamassa: (a) Moldagem; (b) Corpos-de-prova de argamassa após a retirada do anel externo.

Durante a realização dos ensaios os corpos-de-prova tinham que ser mantidos numa câmara climatizada especial, mostrada na Figura 4.14, que gera um ambiente com temperatura e umidade controladas ($T=24^{\circ}\text{C}$ e $UR=50\%$). Para padronizar, decidiu-se deixar

todos os corpos-de-prova 14 dias na câmara. Ao longo deste período, as medidas de deformações foram realizadas diariamente até que as mesmas se estabilizassem.



Figura 4.15 – Câmara climatizada.

Através da observação das fissuras desenvolvidas e do tempo necessário para sua formação, pode-se avaliar a tendência à fissuração do material, que é função tanto da sua retração plástica, quanto da eficiência do reforço das fibras inseridas na mistura ainda no estado fresco.

Dada a limitação de espaço na câmara e de tempo para realização do trabalho, só foi possível efetuar um ensaio para cada teor de adição de fibra (0%, 0,3%, 0,6%, 0,9%, 1,5% e 3%). Todos os compósitos foram produzidos com agregado passante em peneira com abertura de 2,4 mm e fibra dispersa de forma manual.

4.7.6 Ensaio de resistência ao impacto – tipo queda de esfera

Sendo a presente pesquisa desenvolvida no âmbito do Grupo de Pesquisa LEME, que já tem um grande acúmulo de dados acerca de compósitos reforçados com fibras, procurou-se delinear o programa experimental de forma a que fosse possível coletar dados comparáveis aos obtidos em outras pesquisas do grupo. Isto influenciou, por exemplo, a definição dos teores de fibra a incorporar, que foram similares aos usados por Bernardi (2003).

Buscando promover esta conectividade, decidiu-se incorporar ao programa o ensaio de resistência ao impacto por queda de esfera, já empregado por Bernardi (2003) e Garcez (2005). Esse método de ensaio empregado foi concebido com base no procedimento recomendado pelo anexo Q da norma NBR 13818 *Placas Cerâmicas para revestimento – especificação e métodos de ensaio* (ABNT, 1997) e analisa a energia necessária para provocar a 1ª fissura e a energia total necessária para que a fissura se propague por toda a altura do corpo-de-prova. A presença das fibras tende a aumentar consideravelmente essa energia, sendo esse um teste interessante justamente porque se mostra bastante sensível à presença e teor de fibras.

Em virtude da diferença entre os materiais analisados nos vários estudos (concreto e argamassa), foram necessárias algumas adaptações no método. Decidiu-se adaptar o procedimento de ensaio tomando como base o proposto por Ramakrishna e Sundararajan (2005), que desenvolveram um programa experimental muito similar ao da presente pesquisa, com fibras naturais. Dessa forma decidiu-se adotar placas com espessura de 20 mm, o que atende com folga a especificação de que a menor dimensão do corpo-de-prova deve ser três vezes superior ao diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado (2,4 mm).

As demais dimensões da placa foram as mesmas utilizadas por Bernardi (2003) e Garcez (2005), o que permitiu usar o mesmo equipamento de ensaio, mostrado esquematicamente na Figura 4.16. O mesmo permite que se derrubem bolas de aço de 500g ou 1000g de várias alturas. As energias de cada impacto vão sendo somadas. Dois extensômetros posicionados sobre as placas monitoram os deslocamentos acumulados das mesmas.

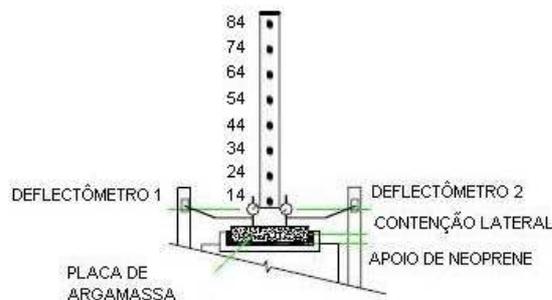


Figura 4.16 – Ilustração esquemática do ensaio de impacto tipo queda de esfera (baseado em GARCEZ, 2005).

A Figura 4.17 apresenta imagens da moldagem das placas de argamassa. Foram moldadas três placas de argamassa com dimensões de 30x30x2cm para cada teor de adição de fibra estudado (0%, 0,3%, 0,9% e 3%).

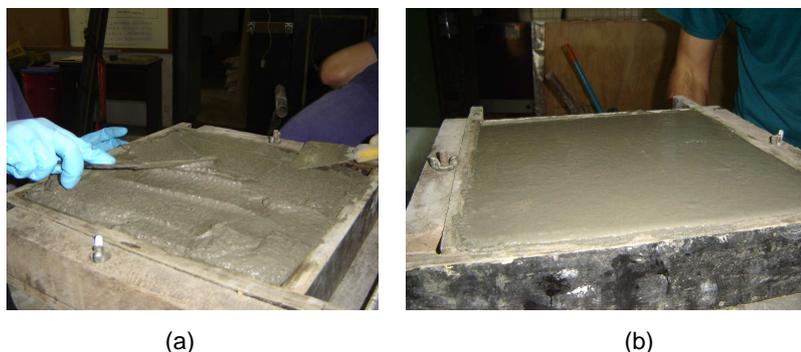


Figura 4.17 – Corpos-de-prova utilizados no ensaio de impacto: (a) Moldagem das placas de argamassa; (b) Aspecto final das placas moldadas.

Os corpos-de-prova foram desmoldados após 24 horas, permanecendo em câmara úmida por 28 dias. Na idade do ensaio, as placas foram retiradas, deixadas para secar por 6 horas

e posicionadas no equipamento de ensaio, para serem submetidas aos impactos repetidos com a esfera de aço de 500g.

Para fins de comparação o ensaio seguiu, em linhas gerais, o procedimento adotado por Ramakrishna e Sundararajan (2005), que analisaram o desempenho ao impacto de placas de argamassa reforçadas com fibras naturais (sisal e, juta, entre outras), em teores de 0,5%; 1,0%; 1,5% e 2,5%, e comprimentos de 20, 30 e 40mm. As placas foram moldadas com relação água/ cimento de 0,47, sendo curadas por 28 dias.

O ensaio realizado por Ramakrishna e Sundararajan (2005) foi realizado através de quedas repetitivas de uma altura de 20 cm. Dada a configuração do equipamento disponível, na presente pesquisa o ensaio foi realizado com a esfera sendo lançada de uma altura constante de 24 cm. Nesse sentido o ensaio diferiu do método usado por Bernardi (2003) e Garcez (2005), que envolvia quedas de alturas cada vez maiores, a partir de 14 cm até 210 cm, pois são necessárias energias maiores para romper concretos.

A figura 4.18 apresenta imagens do ensaio de impacto sendo realizado. A Figura 4.19 apresenta uma ilustração esquemática do posicionamento dos 2 defletômetros utilizados para verificação dos deslocamentos acumulados nas placas.



Figura 4.18 – Ensaio de impacto: (a) Placa antes da queda da esfera; (b) Primeira fissura na parte inferior; (c) Primeira fissura na parte superior.

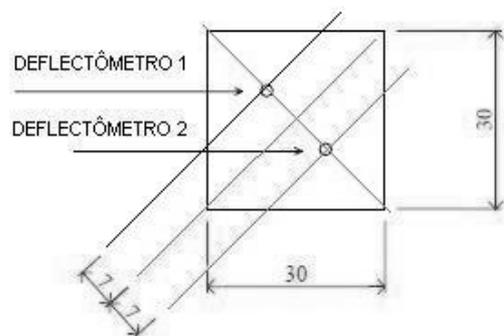


Figura 4.19 – Ilustração esquemática do posicionamento dos defletômetros (baseado em GARCEZ, 2005).

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados com os compósitos de argamassa reforçados com adição da fibra de escória de alto-forno, que avaliaram os efeitos das variáveis de estudo e dos parâmetros controláveis nas variáveis de resposta. Inicialmente são apresentados os resultados dos ensaios de Fluorescência de Raios X, Difração de Raios X e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), além da resposta do ensaio de Le Chatelier, que avaliou a interação entre fibra e matriz cimentícia. No item seguinte são caracterizados microestruturalmente os compósitos produzidos com adição da fibra de escória. Também são analisadas como as variações dos parâmetros controláveis (diâmetro máximo do agregado e preparação da fibra) influenciaram o comportamento mecânico dos compósitos. Por fim, são apresentados e discutidos os efeitos das variáveis de estudo nos resultados obtidos, em termos de resistência mecânica, módulo de elasticidade dinâmico, retração restringida e resistência ao impacto, sendo avaliada a significância estatística através de análise de variância (ANOVA), com auxílio do software *Statistic*.

5.1 FASE 1: RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA

Nesse item são apresentados os resultados dos ensaios realizados visando caracterizar a fibra de escória usada na presente pesquisa.

5.1.1 Fluorescência de Raios X

A Tabela 5.1 apresenta o resultado obtido no ensaio de Fluorescência de Raios X. Uma análise dos mesmos indica a presença de uma quantidade relativamente elevada de óxidos de magnésio (MgO) e de cálcio (CaO), similar à indicada pelo fabricante (vide Tabela 3.2).

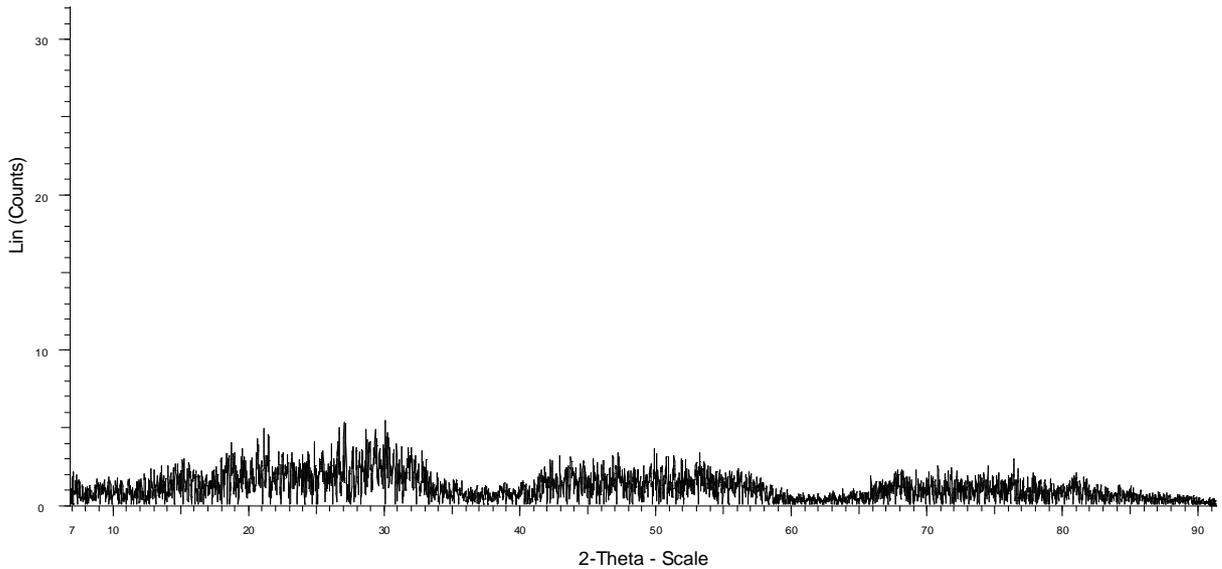
Tabela 5.1 – Ensaio de Fluorescência de Raios X da fibra de escória.

ANÁLISE	RESULTADO (%)	PROC-CALC	LINHA	Net INT.	BG INT.
CaO	46,5	Quant.-FP	CaKa	1.243	3,614
SiO ₂	33,8	Quant.-FP	SiKa	301,195	1,305
Al ₂ O ₃	12,0	Quant.-FP	AlKa	138,105	7,73
MgO	2,2	Quant.-FP	MgKa	6,617	0,735
MnO	1,1	Quant.-FP	MnKa	19,924	0,721
SO ₃	1,1	Quant.-FP	S Ka	14,466	0,413
Fe ₂ O ₃	1	Quant.-FP	FeKa	23,677	0,97
TiO ₂	0,7	Quant.-FP	TiKa	2,828	0,192
K ₂ O	0,4	Quant.-FP	K Ka	18,128	1,427
SrO	0,3	Quant.-FP	SrKa	39,855	9,868
BaO	0,1	Quant.-FP	BaLa	0,332	0,179
ZrO ₂	0	Quant.-FP	ZrKa	10,416	12,608
Cl	0	Quant.-FP	ClKa	0,745	0,816
Y ₂ O ₃	0	Quant.-FP	Y Ka	3,016	11,231
P ₂ O ₅	0	Quant.-FP	P Ka	0,313	0,271

Shouson (1980), citado por Teixeira (2000), analisando reações expansivas em escórias, concluiu que a estabilidade do material pode ser associada à proporção MgO / (FeO + MnO) e à composição química. O mesmo considera que as composições instáveis se caracterizam por apresentar uma razão maior ou igual a 1, enquanto composições estáveis tendem a apresentar valores menores que 1. A fórmula considera a premissa de que o MgO pode formar solução sólida com o FeO e o MnO. Fazendo o cálculo para a fibra de escória analisada tem-se: $2,2 / (1 + 1,1) = 1,04$, resultado que indica uma composição marginalmente instável. Tal suposição, contudo, só pode ser confirmada depois de analisados outros fatores, como a estrutura química da fibra, de forma a verificar se os elementos químicos estariam disponíveis para reagir. Para averiguar se recomenda realizar ensaios para avaliar diretamente a existência de afinidade entre a fibra e a matriz cimentícia.

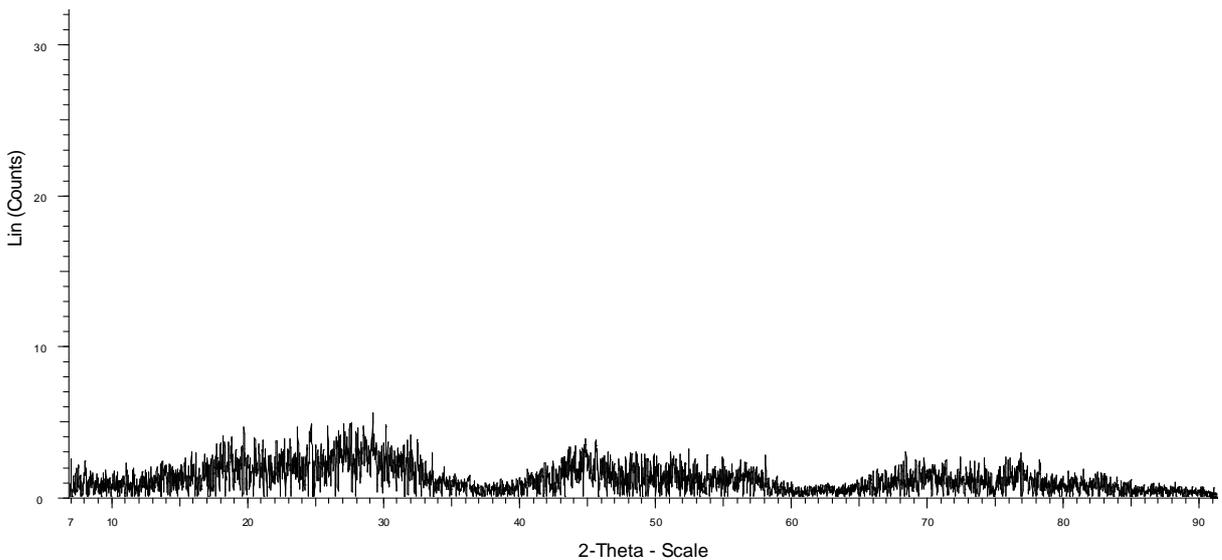
5.1.2 Difração de Raios X

Para identificar se os elementos químicos constituintes da fibra apresentam estrutura amorfa ou cristalina, realizou-se uma análise por difração de Raios X. As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos para amostras da fibra de escória de alto-forno e do shot da fibra. No ensaio verificou-se que a fibra de escória e o seu shot não tiveram picos cristalinos, sendo a estrutura predominantemente amorfa. Tal fato era esperado para a fibra, pois a mesma apresenta potencial para isolamento térmico, sendo este oriundo de sua estrutura amorfa, que devido à maior irregularidade do arranjo dos retículos, consegue retardar a propagação das ondas vibracionais, reduzindo a capacidade de transportar calor (SANT`ANA FILHO *et al*, 2008). Foi interessante notar que o shot também se mostrou amorfo e, portanto, potencialmente reativo.



 FibraEscoriaAF – File: FibraEscoriaAF_01m.raw – Type: 2Th alone – Start: 6.820* - End: 91.410* - Step time: 300. s – Temp.: 25°C (Room) – Time Started: 0 s – 2 – Theta: 6.820* - Theta: 12.075* - Chi: 1
 Operations: Background 2.000,0.001 / Import

Figura 5.1 – Difratoograma da fibra de escória de alto-forno.

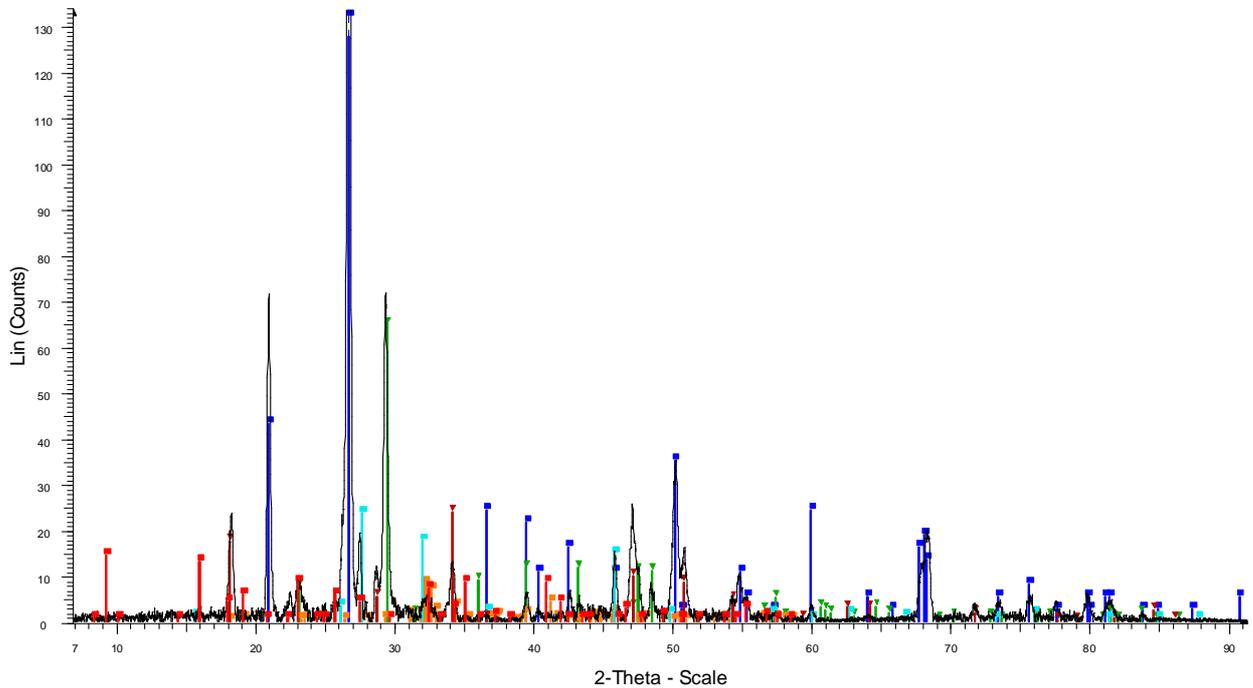


 SHOTFibraEscoriaAF – File: SHOTFibraEscoriaAF_01m.raw – Type: 2Th alone – Start: 6.820* - End: 91.410* - Step time: 0.010* – Temp.: 25°C (Room) – Time Started: 0 s – 2 – Theta: 6.820* - Theta: 12.075* - Chi: 1
 Operations: Background 2.000,0.001 / Import

Figura 5.2 – Difratoograma apenas do shot da fibra de escória de alto-forno.

Foram realizados, ainda, ensaios de difração em amostras da argamassa de referência e da argamassa com adição da fibra de escória. Os resultados são ilustrados, respectivamente, nas Figuras 5.3 e 5.4. Os difratogramas demonstram que as amostras apresentam praticamente os mesmos picos cristalinos, contudo, no difratograma do composto, não foi verificada a presença de compostos com alumínio, indicando que este elemento químico,

presente em quantidade na fibra, pode ter reagido com a matriz, gerando silico-aluminatos, pois não se identifica o pico de etringita.



Testemunho – File: Testemunho_01m.raw – Type: 2Th alone – Start: 6.820* - End: 91.410* - Step: 0.010* - Step time: 300. s
 – Temp.: 25°C (Room) – Time Started: 0 s – 2 – Thet a: 6.820* - Theta: 12.075* - Chi: 1.47*
 Operations: Background 1.000,0.001 / Import

00-046-1045(*) – Quartz, syn – SiO₂ – Y: 100.00% - d x by: 1. – WL: 1.54056 – Hexagonal – a 4.91344 – c 5.40524 – alpha 90.000 – beta 90.000 – gamma 120.000 – Primitive – P3221 (154) – 3 – 113.010 – I/c

00-005-0586(*) – Calcite, syn – CaCo₃ – Y: 24.00% - d x by: 1. – WL: 1.54056 – Rhombo.H.axes – a 4.98900 – b 4.98900 – c 17.06200 - alpha 90.000 – beta 90.000 – gamma 120.000 – Primitive – R-3c (167) – 6 – 367.78

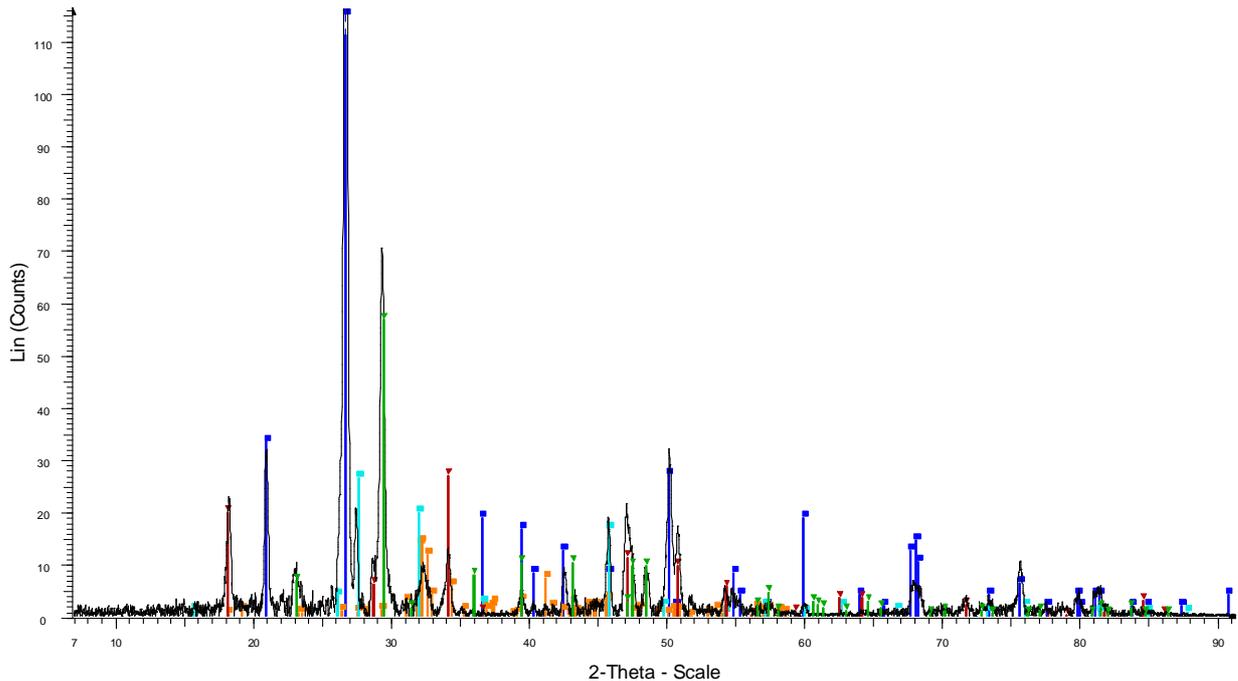
00-033-0302(*) – Larnite, syn – Ca₂SiO₄ – Y: 3,15% - d x by: 1. – WL: 1.54056 – Monoclinic – a 9,31000 – b 6,75650 – c 5,50590 - alpha 90.000 – beta 94,460 – gamma 90.000 – Primitive – P21/n(14) – 4 – 345,289 – F30 =

00-001-0720(D) – Calcium Silicate – CaSiO₃ – Y: 8.72% - d x by: 1. – WL: 1.54056

00-004-0733(I) – Portlandita, syn – Ca(OH)₂ – Y: 8.33% - d x by: 1. – WL: 1.54056 – Hexagonal – a 3.59300 – c 4.90900 – alpha 90.000 – beta 90.000 – gamma 120.000 – Primitive – P-3m1 (164) – 1 – 54.8830

00-013-0350(D) – Etringita – Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)12.26H₂O – Y:5.38% - d x by: 1. – WL: 1.54056 - Hexagonal – a 22,32000 – b 22.32000 – c 21.33000 – alpha 90.000 – beta 90.000 – gamma 120.000 – Primitive – P63/m

Figura 5.3 – Difratograma da argamassa de referência.



MatrizCimentFibraEscAF – File: MatrizCimentFibraEscAF_01m.raw – Type: 2Th alone – Start: 6.820* - End: 91.410* - Step: 0.010* - Step time: 300. s – Temp.: 25°C (Room) – Time Started: 0 s – 2 – Theta: 6.820*
Operations: Background 1.000,0.001 / Import

00-046-1045(*) – Quartz, syn – SiO₂ – Y: 92.45% - d x by: 1. – WL: 1.54056 – Hexagonal – a 4.91344 – c 5.40524 – alpha 90.000 – beta 90.000 – gamma 120.000 – Primitive – P3221 (154) – 3 – 113.010 – I/c

00-005-0586(*) – Calcite, syn – CaCO₃ – Y: 25.09% - d x by: 1. – WL: 1.54056 – Rhombo.H.axes – a 4.98900 – b 4.98900 – c 17.06200 - alpha 90.000 – beta 90.000 – gamma 120.000 – Primitive – R-3c (167) – 6 – 367.78

00-033-0302(*) – Larnite, syn – Ca₂SiO₄ – Y: 6,27% - d x by: 1. – WL: 1.54056 – Monoclinic – a 9.31000 – b 6.75650 – c 5.50590 - alpha 90.000 – beta 94.460 – gamma 90.000 – Primitive – P21/n(14) – 4 – 345.289 – F30 =

00-001-0720(D) – Calcium Silicate – CaSiO₃ – Y: 11.74% - d x by: 1. – WL: 1.54056

00-004-0733(I) – Portlandita, syn – Ca(OH)₂ – Y: 11.90% - d x by: 1. – WL: 1.54056 – Hexagonal – a 3.59300 – c 4.90900 – alpha 90.000 – beta 90.000 – gamma 120.000 – Primitive – P-3m1 (164) – 1 – 54.883

Figura 5.4 – Difratoograma da argamassa com adição da fibra de escória de alto-forno.

5.1.3 Microscopia Ótica e Eletrônica de Varredura (MEV)

Inicialmente, para fins de análise das características microestruturais, foram realizadas análises visuais da fibra, sem qualquer tipo de tratamento, com auxílio de uma lupa microscópica, sendo adquiridas imagens com ampliações de 8, 20 e 50 vezes.

A Figura 5.5 apresenta as imagens obtidas, nas quais é possível observar a presença do shot, o resíduo que não assumiu a forma de fibra, mostrado na forma de pontos escuros.

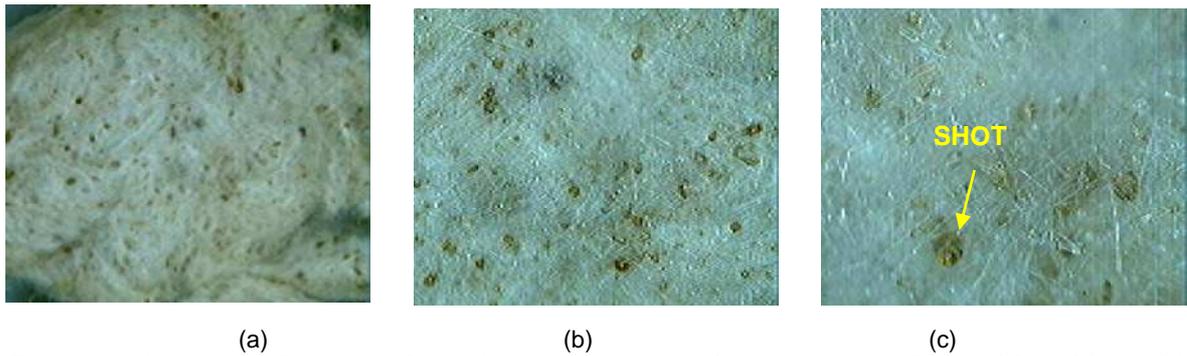


Figura 5.5 – Imagens da fibra de escória obtidas em lupa microscópica com ampliações de: (a) 8x; (b) 20x; (c) 50x.

Também foram feitas imagens da fibra em maiores ampliações, utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), onde se pode verificar a variação existente no diâmetro e no comprimento das fibras. De acordo com Sigmund *et al.* (2006) e Shoup (1991), citados por Alves *et al.* (2006), essas variações são decorrentes do processo de produção da fibra, onde a escória fundida é forçada a passar por pequenos orifícios, sem maior domínio sobre o fluxo, acarretando na falta de controle do diâmetro das fibras.

Na Figura 5.6 são apresentadas imagens com ampliações de 250, 500, 1.000 e 2.500 vezes, que permitem observar a variação de diâmetro e comprimento das fibras e a presença do shot.

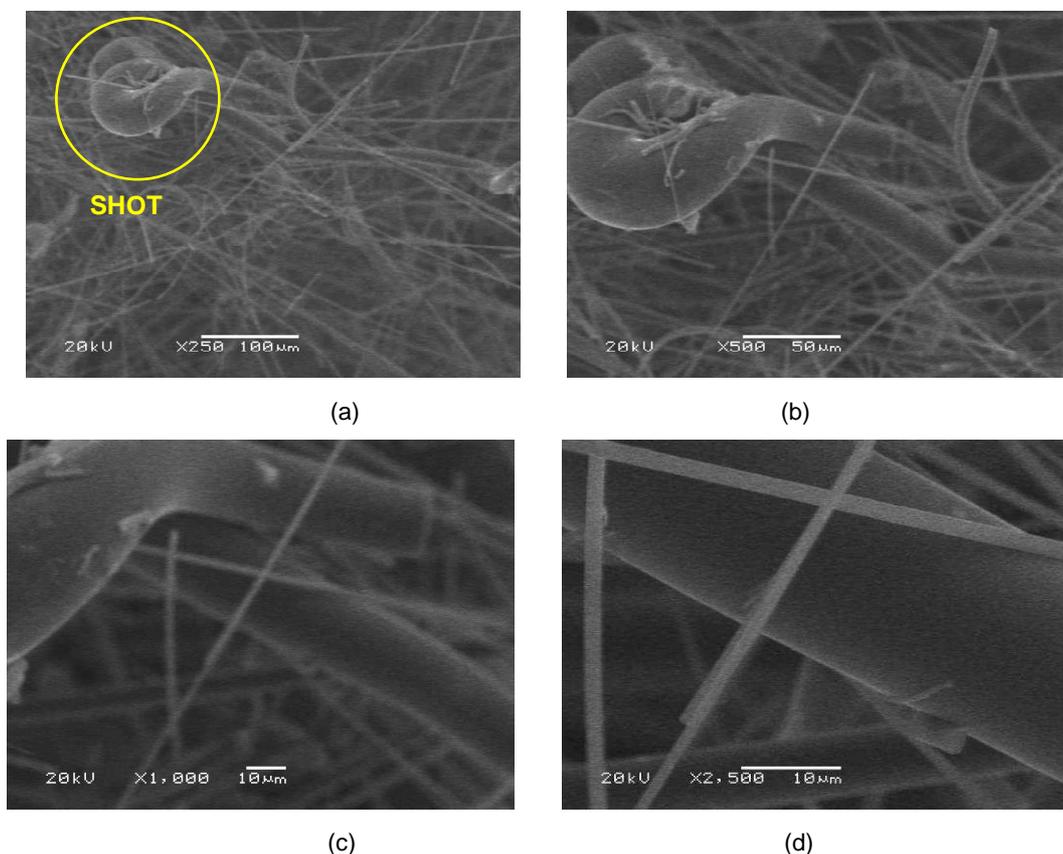


Figura 5.6 – MEV da fibra de escória com ampliações de: (a) 250x; (b) 500x; (c) 1.000x; (d) 2.500x.

As imagens obtidas com auxílio de MEV confirmaram o descrito por Krenchel (1974), que a maior parte dos tipos de fibras minerais, como a de escória de alto-forno, apresentam comprimento relativamente curto, variando entre 1 a 10 mm, com diâmetro médio de 5 μm . O autor destaca ainda o fato destas fibras usualmente apresentarem um formato emaranhado, não sendo fácil provocar sua dispersão na matriz.

5.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE LE CHATELIER

A Figura 5.7 apresenta os valores das médias das três determinações de abertura das agulhas de Le Chatelier nos corpos-de-prova submetidos à cura a frio, de acordo com a norma utilizada. Para melhor precisão as medidas foram realizadas com o uso de paquímetro digital.

Analisando os dados constata-se que a variação da abertura das extremidades das hastes das agulhas das pastas com fibras ou shot não é superior à registrada para a pasta de referência (4,5%), podendo-se concluir que a presença do MgO nas fibras não causa reação expansiva.

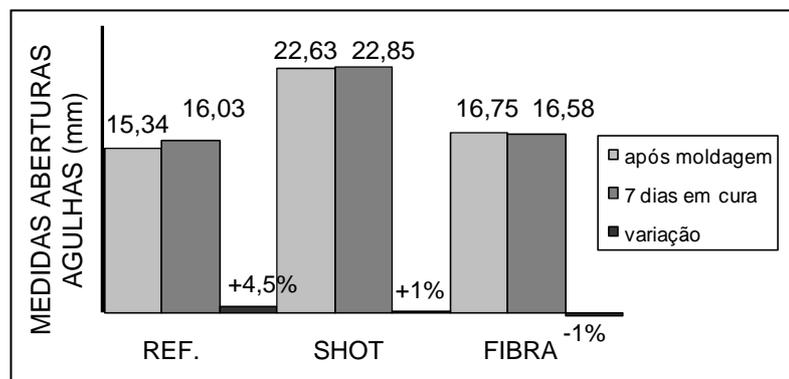


Figura 5.7 – Le Chatelier - resultados da cura a frio.

Já na Figura 5.8 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com a cura à quente. A análise dos mesmos indica que não existe diferença sensível na variação da abertura das hastes entre a pasta de referência (0,8%) e a pasta com fibras (0,6%). Mas as pastas confeccionadas com o shot mostraram uma clara tendência de expansão, alcançando maiores aberturas das hastes das agulhas (4%) do que as demais pastas. Esse comportamento pode não resultar numa reação expansiva danosa em concretos ou argamassas, dada a pequena quantidade de shot e a restrição representada pelos agregados, mas é um aspecto que deve ser mais bem estudado antes que esse tipo de

material seja utilizado em larga escala. Até que se tenham mais estudos recomenda-se que o material seja peneirado, quando possível, para redução da quantidade de shot.

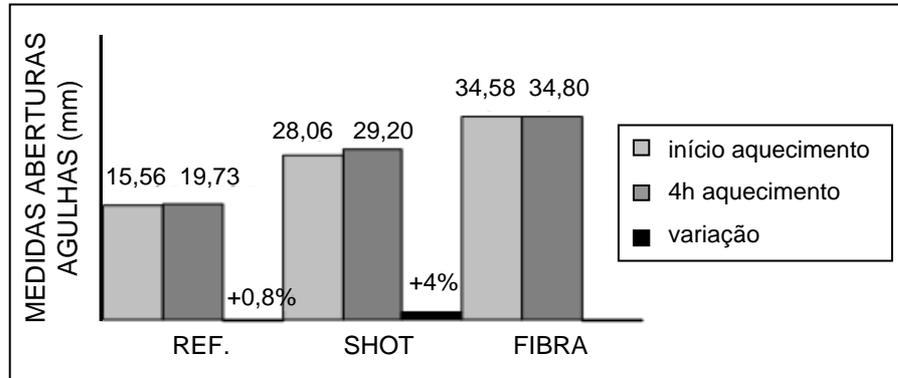


Figura 5.8 – Le Chatelier - resultados da cura a quente.

Buscando obter subsídios para entender o que pode ter provocado a maior expansibilidade da pasta confeccionada apenas com o shot da fibra, recorreu-se à análise microestrutural. Foi selecionada uma amostra do material e encaminhada para observação no MEV, sendo obtidas imagens que indicaram a formação de etringita na forma de agulhas na interface shot-matriz.

A formação dos cristais de etringita, mostrada na Figura 5.9, em imagens obtidas nas ampliações de 2.500 e 5.000 vezes, provavelmente foi responsável pela maior abertura das extremidades das hastes da pasta. Diante disto se acredita que o shot tenha teores elevados de compostos de alumina, enxofre e cálcio, que favorecem a geração dos sulfoaluminatos.

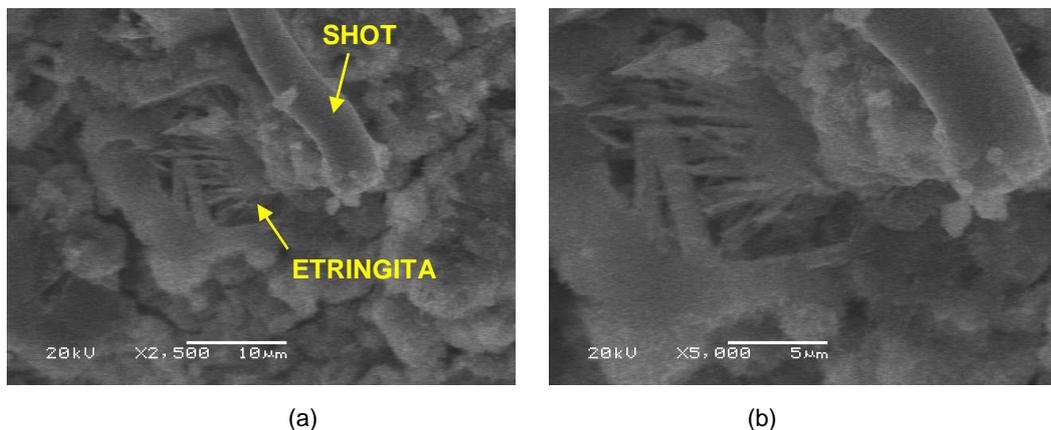


Figura 5.9 – MEV da pasta produzida apenas com o shot da fibra nas ampliações de: (a) 2.500x; (b) 5.000x.

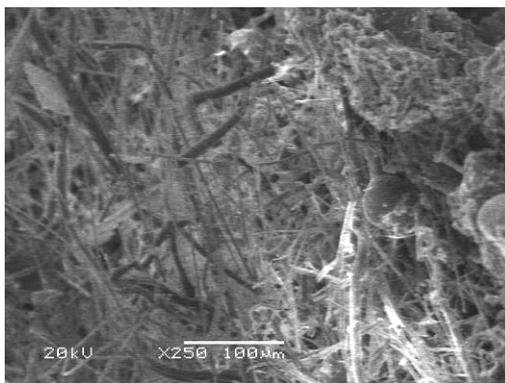
5.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS COMPÓSITOS

Para a caracterização dos compósitos de argamassa foi verificada a distribuição das fibras na matriz cimentícia, através da observação por MEV de amostras fraturadas do material. Cabe salientar que, como enfatizado por Savastano Jr et al (1994), fibras constituídas por silício e magnésio, como a fibra de amianto, não se destacam no interior da matriz. Essa constatação é aplicável às fibras de escória, pois sua constituição e natureza química dificultam sua visualização nas micrografias.

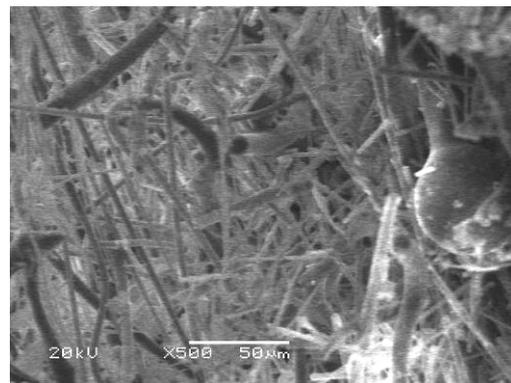
A Figura 5.10 contém imagens da superfície de fratura de uma amostra retirada após o ensaio de resistência à tração na flexão. A mesma é oriunda de uma argamassa produzida com agregado de 2,4mm e fibra de escória dispersa manualmente.

Observa-se nas imagens a presença de fibras distribuídas de forma aleatória e desordenada no espaço. As mesmas tendem a permanecer aglomeradas em alguns pontos, formando grumos e prejudicando a dispersão na matriz. Algumas parecem ter sido fraturadas durante o processo de mistura. Ou seja, confirmam-se os comportamentos apontados por Krenchel (1974), com relação às microfibras minerais, que se mostram frágeis e apresentam a tendência de se aglomerarem, sendo de difícil dispersão.

Cabe salientar que, durante o processo de mistura usado nessa pesquisa, as fibras e os agregados eram adicionados primeiro, antes da adição de água, com o intuito de aproveitar a capacidade inerente de friccionamento da mistura seca para promover a dispersão das fibras. No entanto, as imagens indicam que esse atrito pode ter causado a fratura das fibras.



(a)



(b)

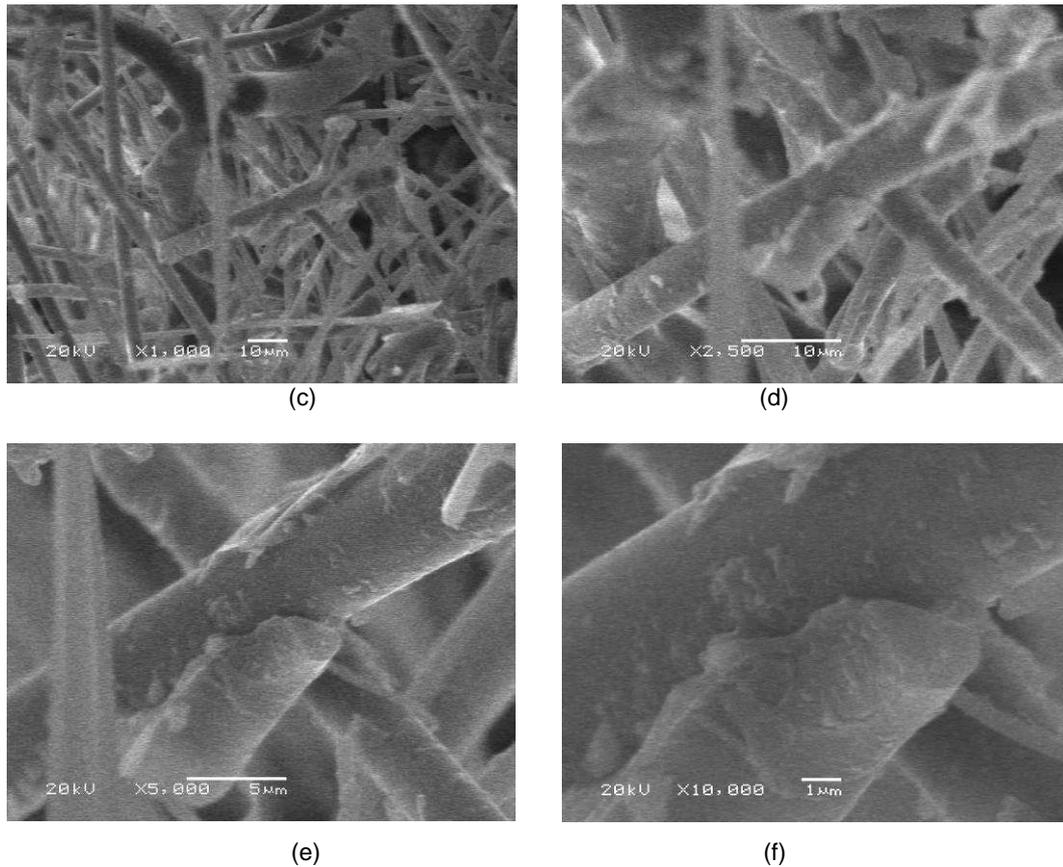


Figura 5.10 – MEV de superfície fraturada dos compósitos com ampliações de: (a) 250x; (b) 500x; (c) 1.000x; (d) 2.500x; (e) 5.000x; (f) 10.000x.

Para a avaliação da constituição dos elementos gerados nos compósitos foi utilizada a técnica de espectrografia de raios X por dispersão de Energias (EDS), que permite efetuar uma análise química elementar em um ponto ou área da amostra. As Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 mostram imagens de superfícies fraturadas de amostras coletadas após os ensaios mecânicos de resistência à tração na flexão e compressão. A análise de pontos das fibras mostrada na Figura 5.11 indica que as mesmas são constituídas primariamente de sílica e cálcio, sendo observada uma certa quantidade de magnésio no ponto 1.

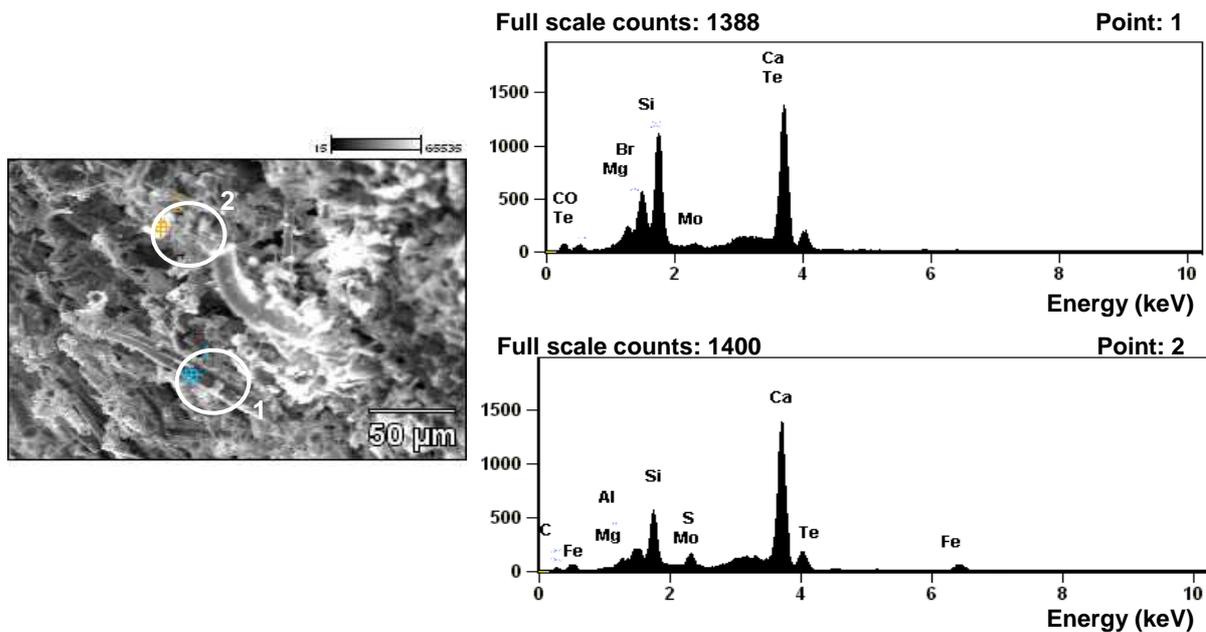


Figura 5.11 – MEV EDS de superfície de amostra fraturada, com ampliação de 500x e espectrogramas indicados nos pontos 1 e 2.

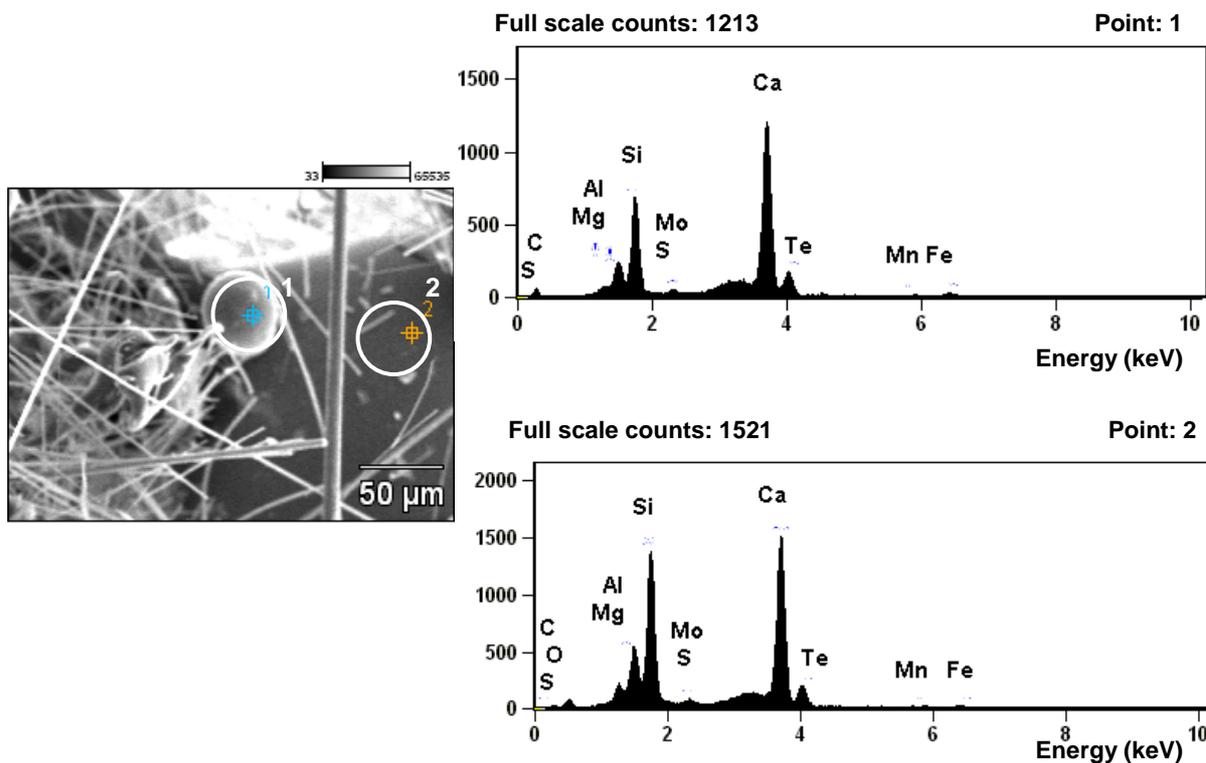


Figura 5.12 – MEV EDS de superfície de amostra fraturada, com ampliação de 500x e espectrogramas indicados nos pontos 1 e 2.

No ponto 1 da Figura 5.12 tem-se uma leitura EDS de um fragmento de shot. O resultado confirma que o mesmo é composto basicamente de alumina, sílica e cálcio, componentes que explicam a formação de etringita observada no ensaio de Le Chatelier.

Como a fibra, o shot se mostra impregnado pelo aglomerante utilizado no processo de fabricação, à base de silicatos (SANT`ANA FILHO *et al*, 2008).

Constatou-se, ainda, a formação de hidróxido de cálcio (CH) na interface fibra-matriz, como indicaram os coeficientes de massa atômica aplicados ao espectrograma do ponto 2 da Figura 5.13.

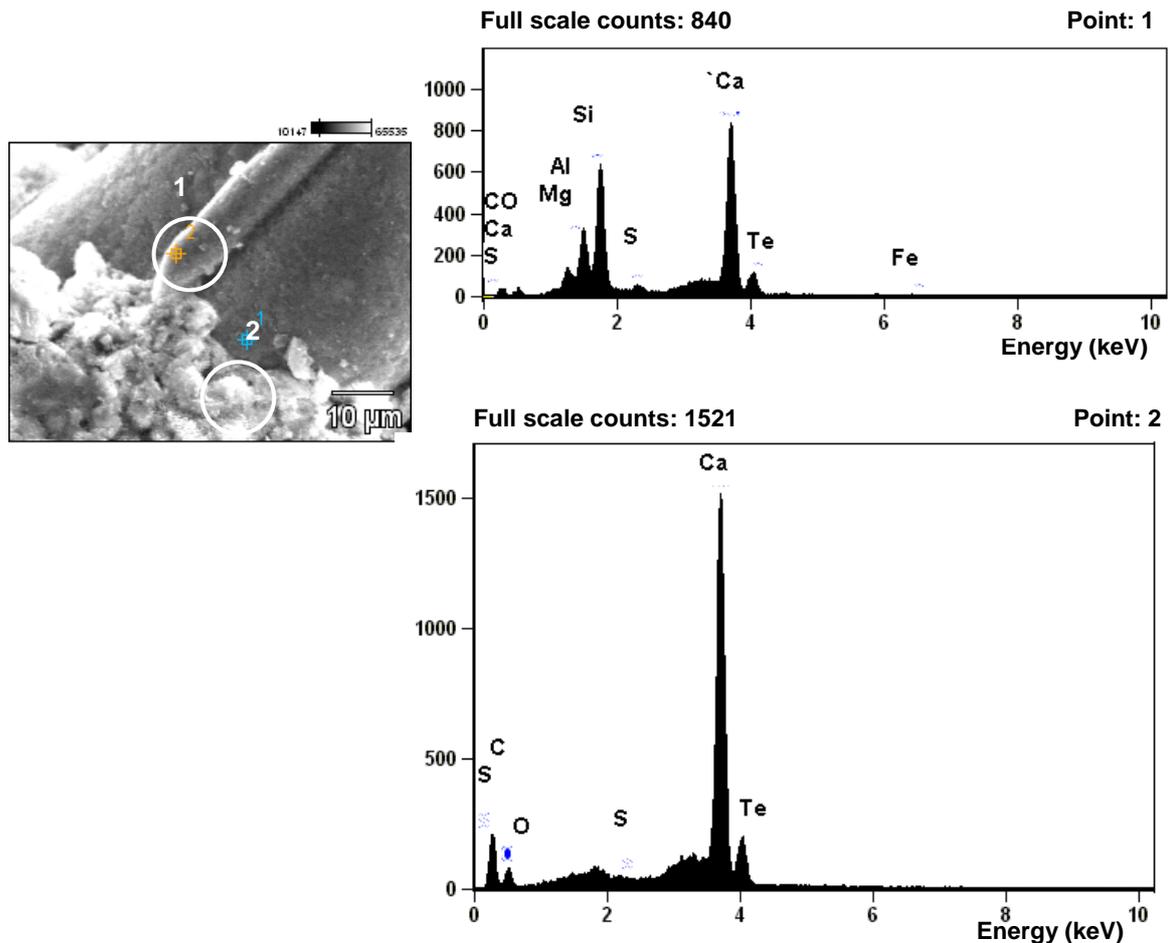


Figura 5.13 – MEV EDS de superfície de amostra fraturada, com ampliação de 2000x e espectrogramas indicados nos pontos 1 e 2.

A formação de cristais na interface fibra-matriz indica que a interação fibra-matriz vai ser pequena, o que compromete a aderência da fibra. Esse fenômeno é agravado pela formação de grumos ou aglomerações de fibra, que prejudicam a disposição das fibras na matriz. A reduzida aderência fibra-matriz pôde ser verificada visualmente analisando as imagens das superfícies de ruptura obtidas de amostras retiradas depois dos ensaios de tração na flexão dos compósitos. A Figura 5.14 apresenta imagens da superfície rompida do compósito onde pode se visualizar que vários filamentos de fibras foram arrancados da matriz.

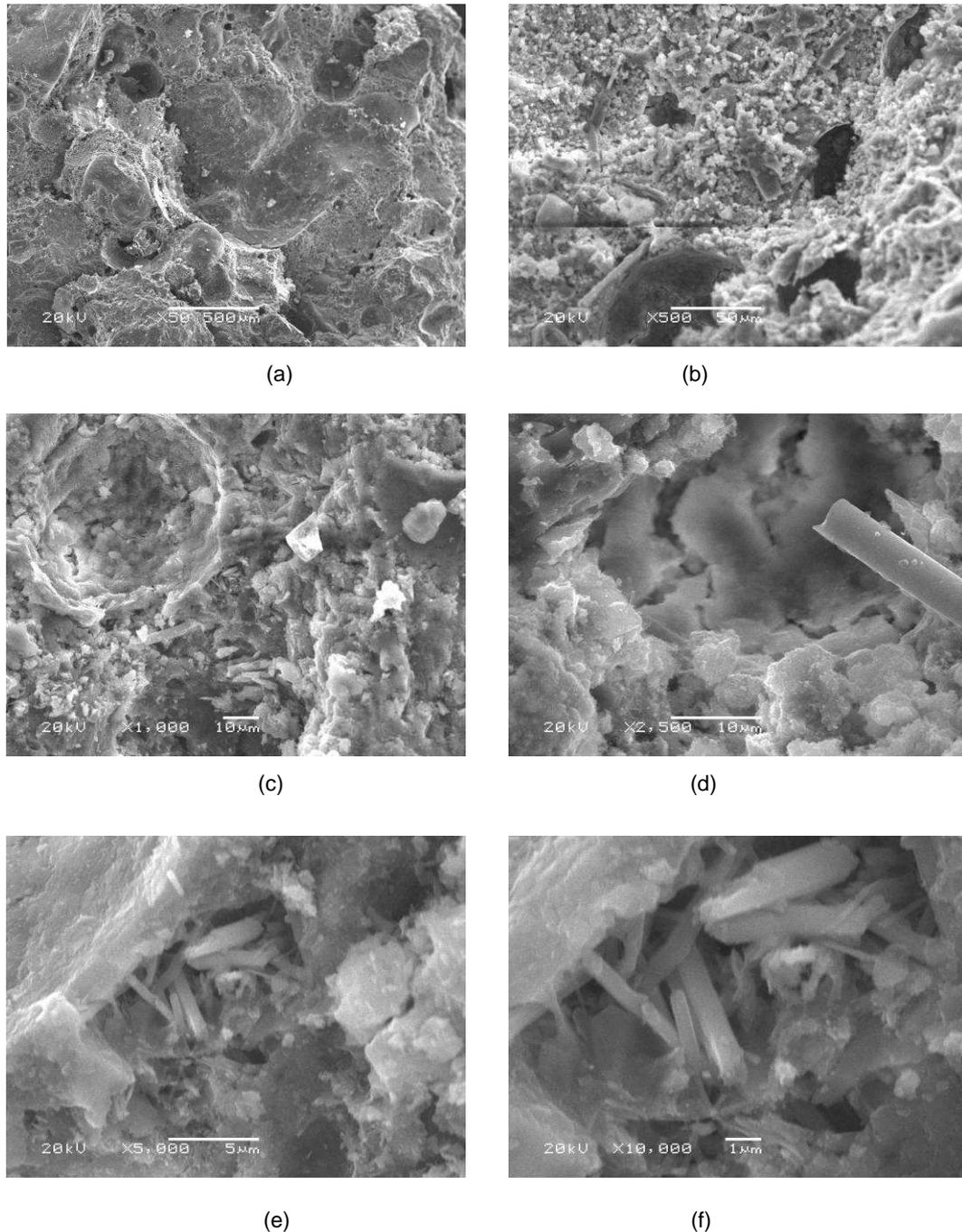


Figura 5.14 – MEV da superfície fraturada de compósito rompido aos 91 dias de idade e produzido com agregado de dimensão máxima de 2,4 mm e fibra dispersa manualmente, nas ampliações de: (a) 500x; (b) 500x; (c) 1.000x; (d) 2.500; (e) 2.500x; (f) 5.000x.

Somente em alguns pontos foi possível identificar a presença de fibras fraturadas, rompidas por esgotamento da sua capacidade de carga. Como registrado na literatura, esse comportamento não surpreende, pois como a fibra de escória é uma microfibras, e seu pequeno comprimento faz com que a capacidade de ancoragem da fibra na matriz cimentícia seja limitada, dificultando sua aderência.

Outra questão que compromete a aderência consiste no fato de que a fibra de escória não apresenta estrutura fibrilada, ao contrário da fibra de amianto. Savastano Jr. (1992), em sua pesquisa sobre a zona de transição entre fibras e matrizes cimentícias e suas implicações nas propriedades mecânicas dos compósitos, identificou que o bom desempenho da fibra de amianto, mesmo quando adicionada em pequenos teores, se deve em grande parte ao fato da sua estrutura superficial ser fibrilada, proporcionando aumento da aderência com a matriz.

Cabe salientar que, apesar do seu pequeno comprimento, as microfibras podem trabalhar adequadamente se estiverem bem dispersas e tiverem uma zona de transição pouco porosa e com pequena espessura. Esse é o caso, por exemplo, da fibra de amianto, que forma uma zona de transição densa e compacta, resultando num excelente desempenho mecânico dos compósitos.

No caso dos compósitos de argamassa com adição da fibra de escória, porém, foram identificadas regiões com grande porosidade no entorno das fibras aglomeradas, implicando em efeitos negativos na aderência e resistência mecânica. Acredita-se que tal fato possa estar associado à tendência da fibra de escória de adsorver parte da água de amassamento, aumentando a relação água-cimento no seu entorno e induzindo a zona de transição a ser mais porosa. Dessa forma, o comportamento dos compósitos de argamassa reforçados com fibra de escória acaba se tornando similar aos dos compósitos produzidos com fibras vegetais, onde, de acordo com Savastano Jr. (1992), o comportamento hidrofílico da fibra induz uma elevada porosidade da zona de transição.

Também deve ser levado em conta que a ocorrência de vazios no interior de grumos ou aglomerados dificulta a precipitação de compostos e reduz a densidade, prejudicando a aderência e a resistência do compósito.

Em geral, pode-se concluir que os ensaios de caracterização microestrutural realizados indicam que a aderência entre a matriz cimentícia e as fibras de escória de alto-forno normalmente é pequena e que a dispersão das fibras não é homogênea. Isso motivou o estudo de um método alternativo de dispersão de fibras, discutido a seguir.

5.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DA FIBRA

Como descrito por Ozyurt *et al.* (2004), muitos compósitos de argamassa reforçados com fibras tendem a apresentar problemas de falta de homogeneidade, pois uma parte da fibra permanece aglomerada e o restante se dispersa irregularmente na matriz, formando

grumos, como indicado na Figura 5.15. De acordo com esses autores, o grau de orientação das fibras é considerado um dos parâmetros mais críticos para controle do desempenho mecânico do compósito.

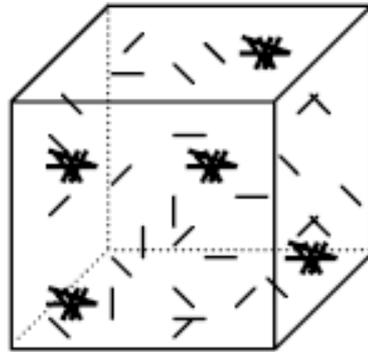


Figura 5.15 – Problemas de dispersão das fibras (adaptado de OZYURT *et al.*, 2004).

Dessa forma pode-se concluir que os problemas de dispersão das fibras encontrados nesse estudo podem ter forte influência nos resultados de resistência mecânica do compósito. Buscando melhorar a disposição das fibras e evitar a formação de grumos se estudou a possibilidade de moer a fibra para facilitar a sua dispersão.

A avaliação dos resultados do processamento da fibra na sua dispersão foi feita através do uso de MEV e de análise tátil visual, objetivando verificar alterações na estrutura da fibra e avaliar as dimensões e textura obtidas após a moagem. Também foram realizados ensaios mecânicos para observar como a variação na forma de preparação da fibra afetava a resistência dos compósitos.

Para avaliar a fibra dispersa após o processamento mecânico de passagem em moinho de bolas, identificando suas dimensões finais, foram realizadas imagens no MEV (Figura 5.16). A análise das imagens permitiu verificar que muitas fibras foram fraturadas durante o procedimento de moagem, havendo redução de suas dimensões, mas que se manteve a grande variação de fatores de forma, diâmetros e comprimentos. Essa elevada variabilidade de dimensões tornou difícil efetuar uma determinação confiável da redução média nas dimensões da fibra após o processo de moagem. Mas nota-se claramente uma tendência de diminuição do comprimento médio das fibras.

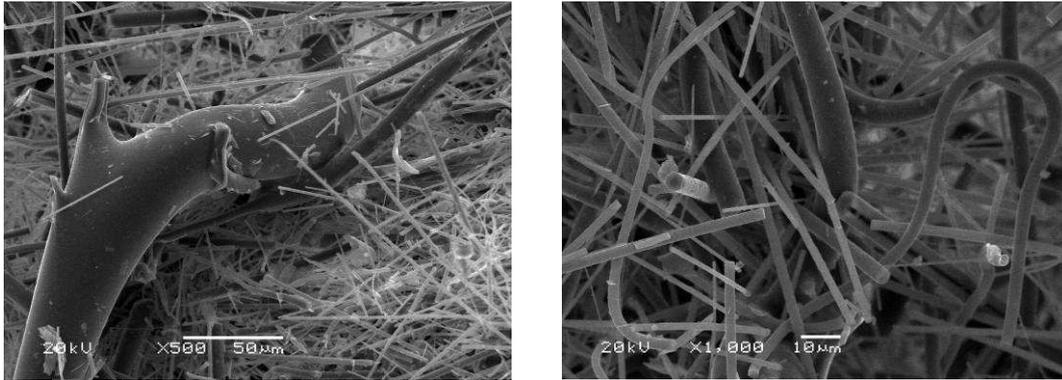
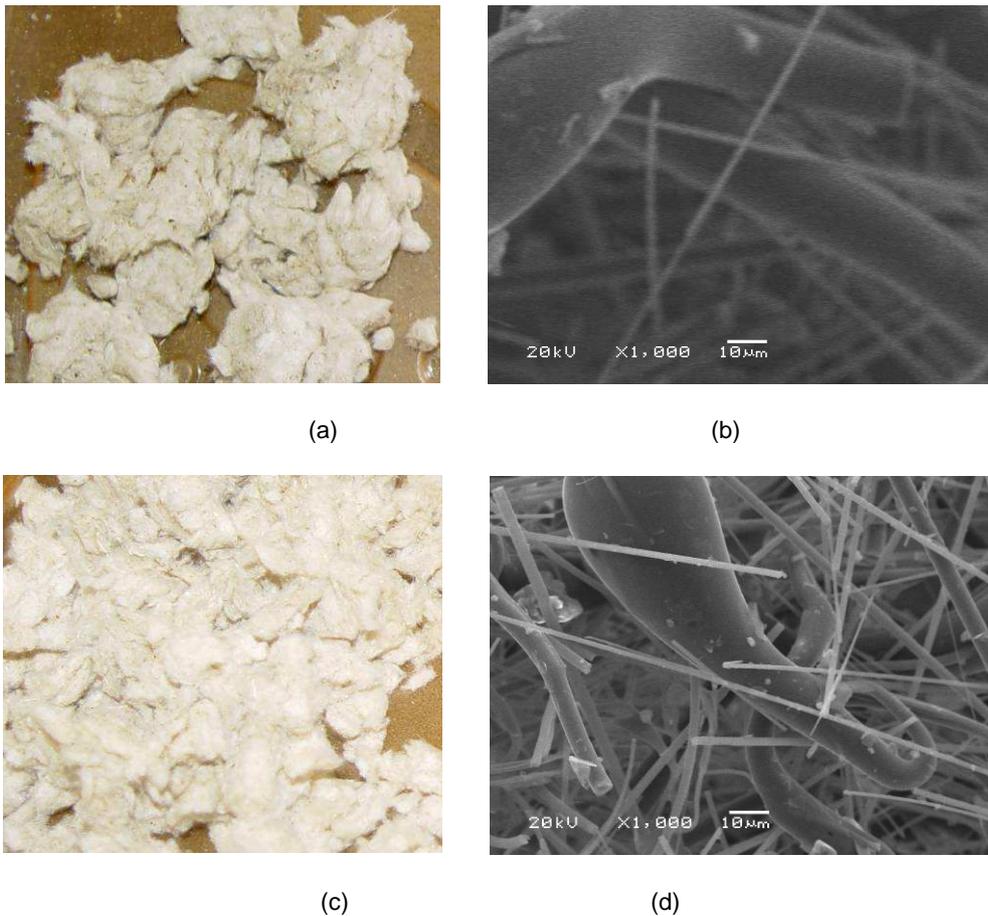
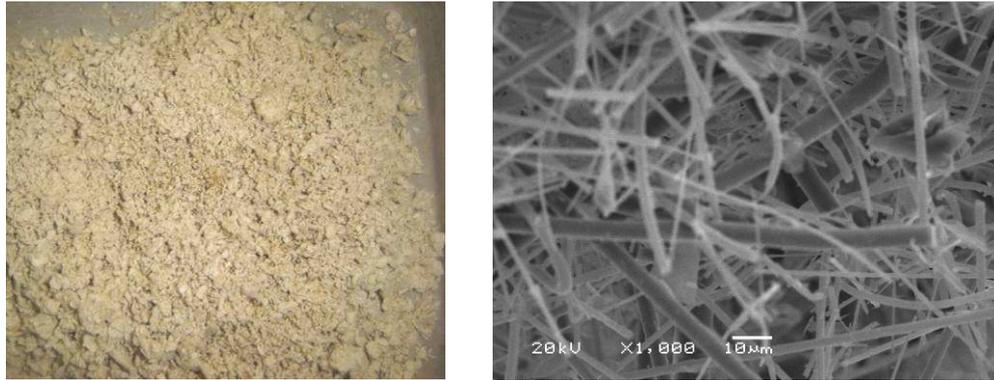


Figura 5.16 – MEV da fibra de escória após tratamento mecânico para dispersão com ampliações de: (a) 500x e (b) 1.000x.

Para realizar uma comparação visual dos efeitos que os processos de dispersão adotados provocaram no fator de forma das fibras, foram feitas as imagens mostradas na Figura 5.17. Essas imagens mostram a fibra na condição natural; dispersada manualmente; e após moagem, em ampliações de 1.000 vezes.





(e)

(f)

Figura 5.17 – Comparação dos métodos de dispersão da fibra de escória nas seguintes condições: (a) ao natural; (b) MEV da fibra ao natural com ampliação de 1.000x; (c) dispersa manualmente; (d) MEV da fibra dispersa manualmente com ampliação de 1.000x; (e) dispersa de forma mecânica; (f) MEV da fibra dispersa de forma mecânica com ampliação de 1.000x.

As imagens mostram que, quando a fibra é submetida aos procedimentos adotados para facilitar a dispersão, tanto manualmente quanto de forma mecânica, as fibras com menor diâmetro tendem a se quebrar, o que propicia uma redução no fator de forma (l/d).

Para Silva (2006), quanto maior o fator de forma mais afastada a forma da fibra fica do formato esférico (fator de forma = 1), e o preenchimento dos vazios entre as fibras fica mais difícil. No caso da fibra de escória, em função do comprimento variado, o valor do fator de forma inicial era muito abrangente, variando entre 14,28 e 8.571,42. Tal condição, aliada ao aspecto agravante da aglomeração da fibra, prejudicou o preenchimento dos vazios na matriz por parte da fibra.

A partir da análise das imagens se observa que a moagem provocou a quebra de muitas fibras, confirmando o descrito por Krenchel (1974). Esse autor relata que fibras minerais não toleram bem métodos mecânicos de pré-tratamento e mistura. Enquanto fibras vegetais podem ser separadas através do atrito entre elas mesmas ou em meio aquoso durante o processo de mistura, as fibras minerais mostram um comportamento completamente distinto, se agrupando em nós cada vez mais firmes, formando um emaranhado de fibra.

Para avaliar o efeito dos tratamentos da fibra no compósito foram realizados ensaios mecânicos de resistência à tração na flexão e compressão nos compósitos, com adição do teor mínimo (0,3%) e máximo de fibra (3%) e agregado com dimensão máxima de 2,4 mm. A Figura 5.18 apresenta os resultados de tração na flexão. Os mesmos indicam que a moagem da fibra prejudica a resistência à tração na flexão para o menor teor de adição (0,3%), mas é benéfica no maior teor (3%). Ou seja, a melhor dispersão é favorável desde que se tenha uma quantidade de fibras adequada para reforçar a matriz. A redução dos grumos parece ser mais importante que a redução do fator de forma da fibra.

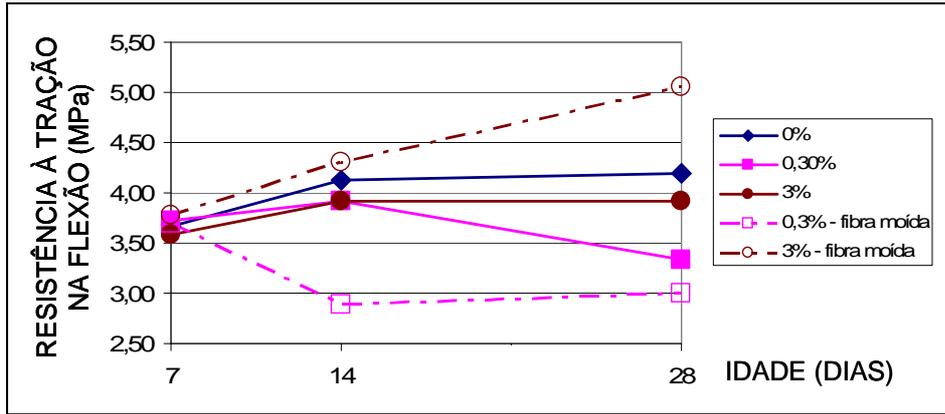


Figura 5.18 – Resultados de resistência à tração na flexão de compósitos produzidos com agregado 2,4 mm comparando fibra dispersa de forma manual x mecânica (fibra moída).

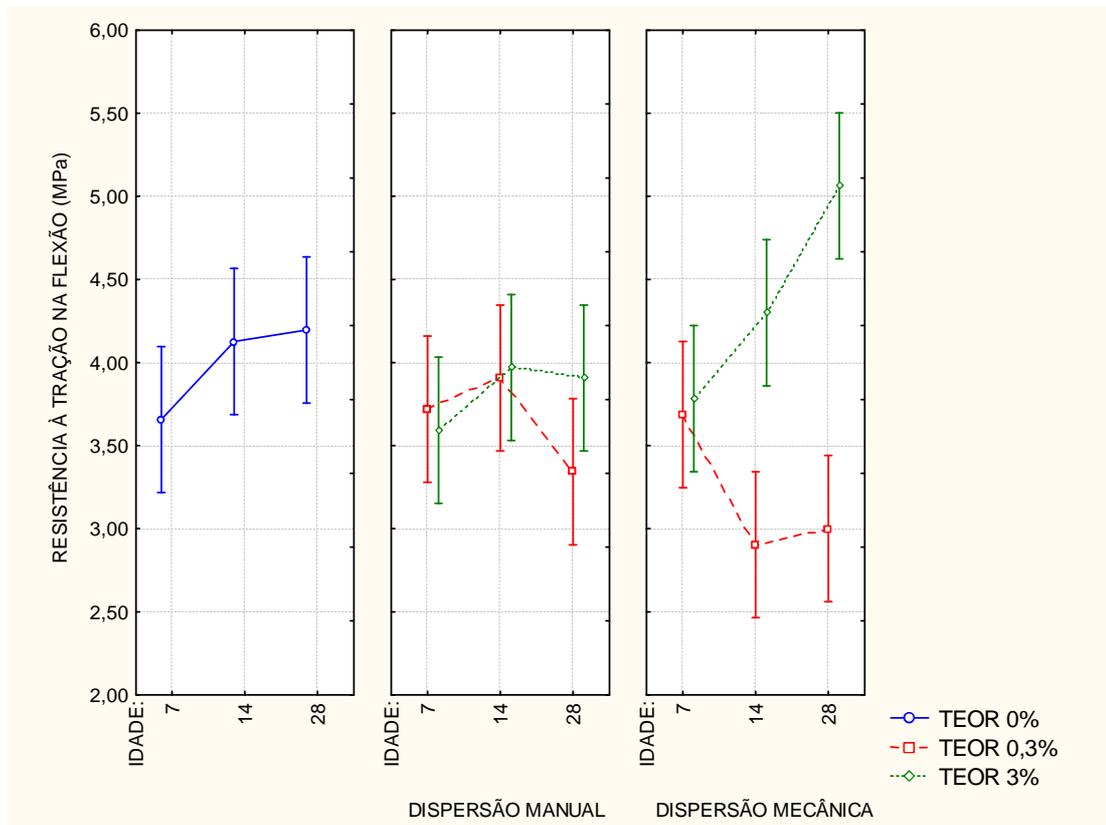


Figura 5.19 – Análise estatística dos resultados de resistência à tração na flexão de compósitos produzidos com agregado 2,4 mm comparando fibra dispersa de forma manual x mecânica (fibra moída).

A análise pela ANOVA, mostrada na Figura 5.19, confirma que esse é um efeito significativo.

As Figuras 5.20 e 5.21 apresentam, respectivamente, os resultados de resistência à compressão dos compósitos produzidos com agregado de dimensão máxima de 2,4 mm e sua análise estatística através do uso do software Statistic. Analisando as mesmas pode-se concluir que o método de dispersão mecânico da fibra afetou mais significativamente a resistência à compressão dos compósitos, provocando redução no menor teor de adição e

aumento no maior. É interessante notar que o uso de fibras em grande quantidade afetou de maneira negativa a resistência.

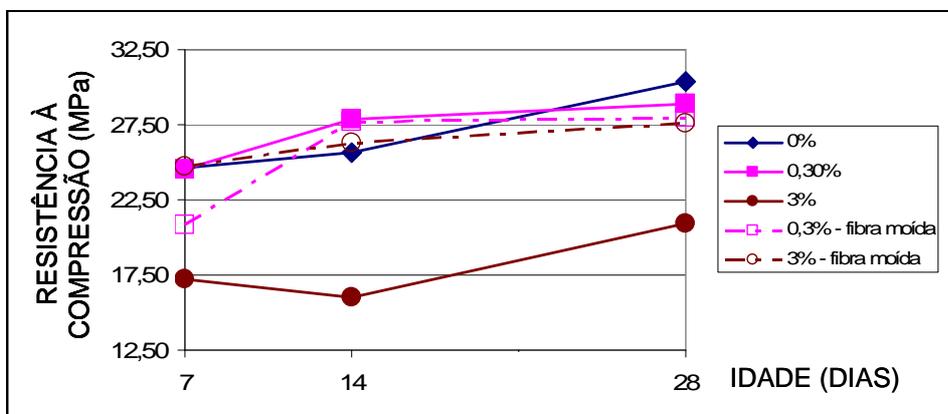


Figura 5.20 – Resultados de resistência à compressão de compósitos produzidos com agregado 2,4 mm comparando fibra dispersa de forma manual x mecânica (fibra moída).

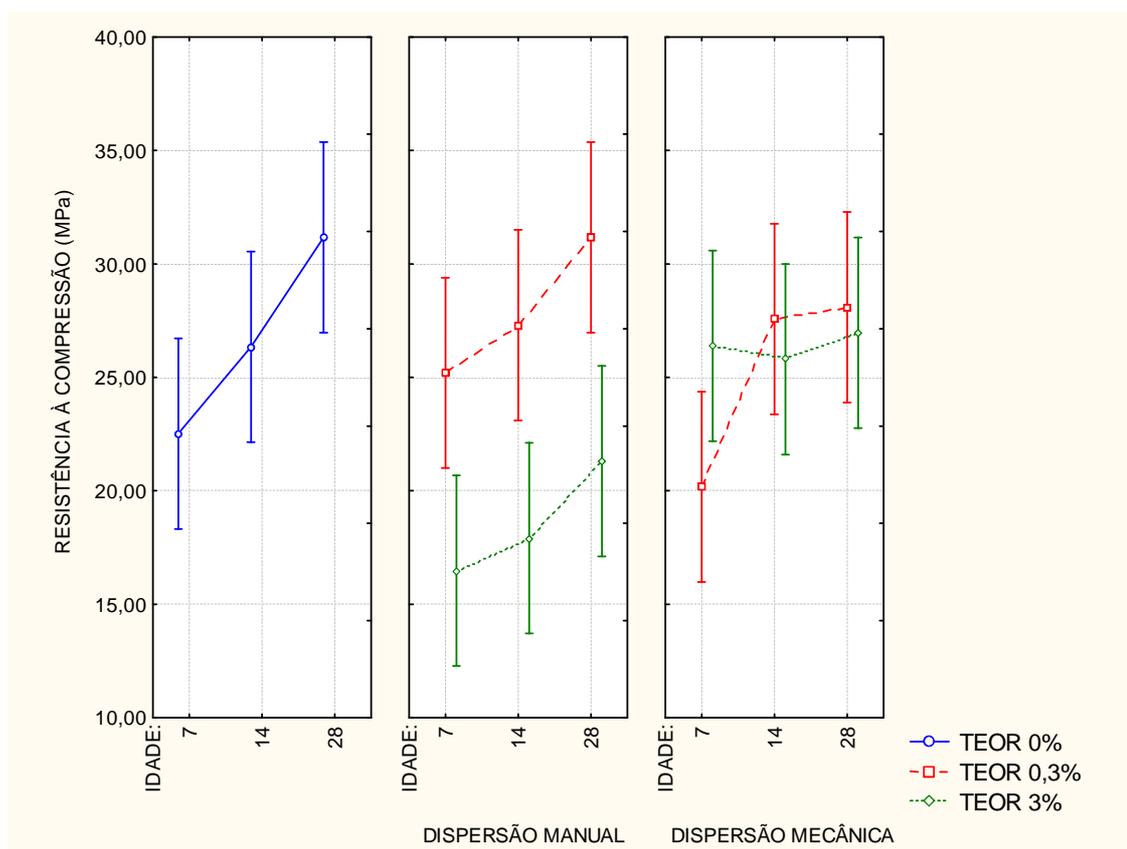


Figura 5.21 – Análise estatística dos resultados de resistência à compressão de compósitos produzidos com agregado 2,4 mm comparando fibra dispersa de forma manual x mecânica (fibra moída).

5.5 ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DO AGREGADO

Como forma de controle da dimensão máxima do agregado empregado e buscando contribuir para a ocorrência de compatibilidade dimensional entre o material e as fibras, o agregado miúdo recebeu três classificações (sem peneiramento, passante em peneira com abertura de 1,2mm e 2,4mm), consideradas parâmetros controláveis.

Para avaliar a influência da dimensão do agregado no desempenho mecânico dos compósitos, foram realizados ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, conforme discutido no Capítulo 4.

Primeiro foram realizados ensaios nos compósitos produzidos com fibra dispersa manualmente para verificar o efeito causado pela variação do tamanho máximo do agregado, comparando agregado sem passar por peneiramento (com partículas maiores que 4,8mm) e passante em peneira com abertura de 2,4mm. A Figura 5.22 apresenta as médias dos valores de resistência à tração na flexão obtidos. Notou-se uma grande variabilidade nos resultados com agregado não peneirado, sendo que o melhor desempenho foi obtido para os compósitos de argamassa produzidos com agregado que não sofreu peneiramento (4,8 mm) e com adição do menor teor de fibra (0,3%).

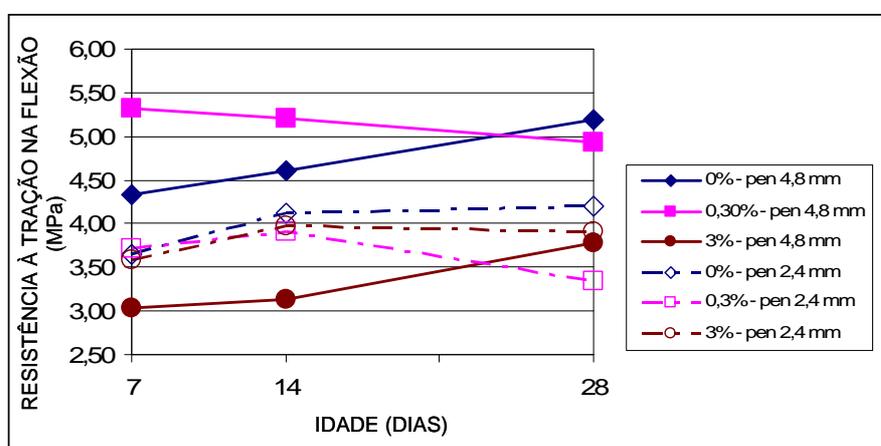


Figura 5.22 – Resultados de resistência à tração na flexão nos compósitos produzidos com fibra dispersa manualmente comparando agregado 4,8 mm x 2,4 mm.

Quando se usam apenas os agregados de menor dimensão (2,4 mm) a variabilidade se reduziu consideravelmente, mas não se observou variação significativa entre os traços com e sem fibras. Em geral, a adição de fibras tendeu a promover um efeito negativo na resistência, indicando que pode ter havido problemas de incorporação de ar ou formação de grumos. A Figura 5.23 apresenta a análise estatística correspondente realizada com auxílio do *software Statistics*, que evidencia o efeito negativo da adição de fibras.

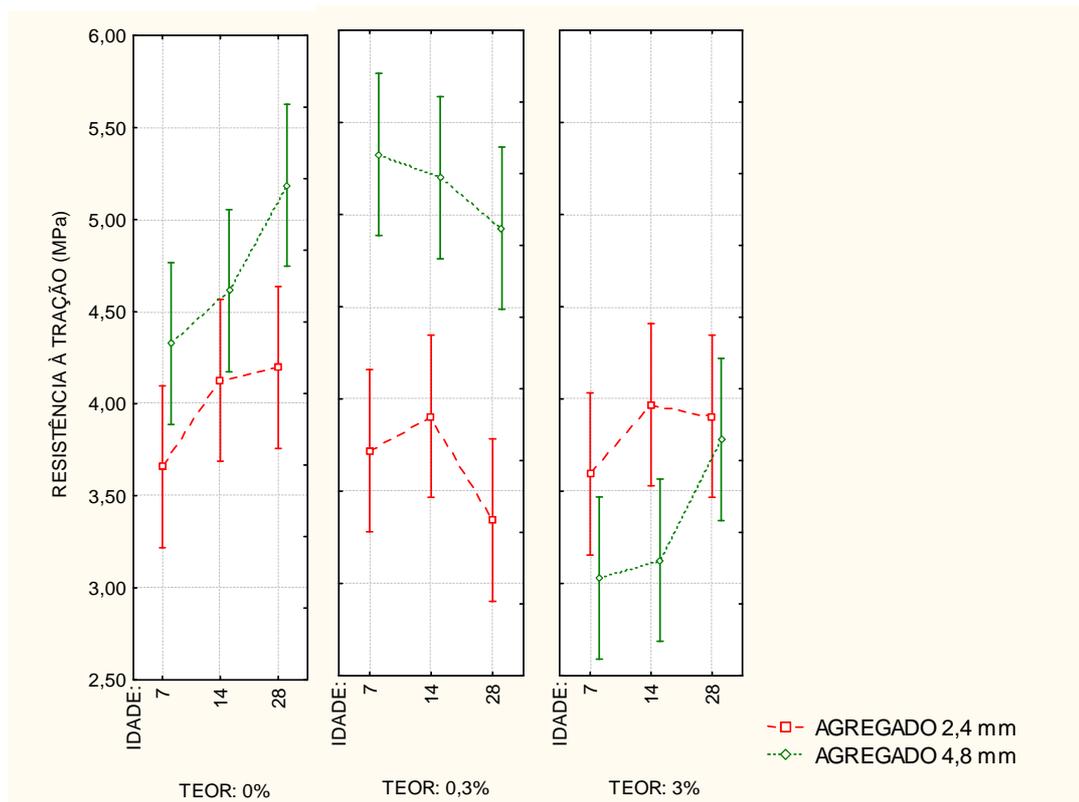


Figura 5.23 – Análise estatística dos resultados de resistência à tração na flexão nos compósitos produzidos com fibra dispersa manualmente comparando agregado 4,8 mm x 2,4 mm.

As Figuras 5.24 e 5.25 apresentam a resistência à compressão para compósitos produzidos com fibra dispersa manualmente, comparando agregado sem passar por peneiramento (4,8mm) e com dimensão máxima de 2,4mm e, a respectiva análise estatística. Os resultados indicam que o efeito da alteração da dimensão do agregado foi pouco significativo. Em compensação, a adição de teores elevados de fibra novamente provocou uma redução importante do desempenho, em relação ao testemunho, para qualquer tamanho de agregado.

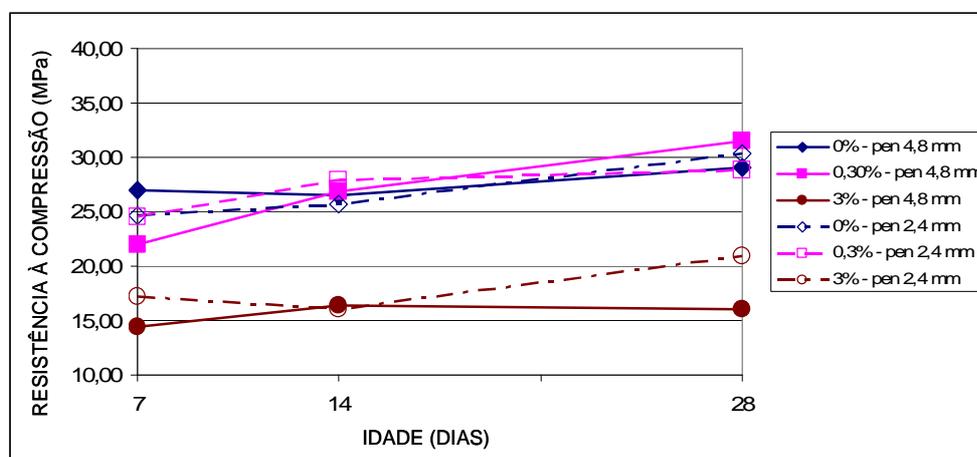


Figura 5.24 – Resultado da resistência à compressão nos compósitos produzidos com fibra dispersa manualmente comparando agregado 4,8 mm x 2,4 mm.

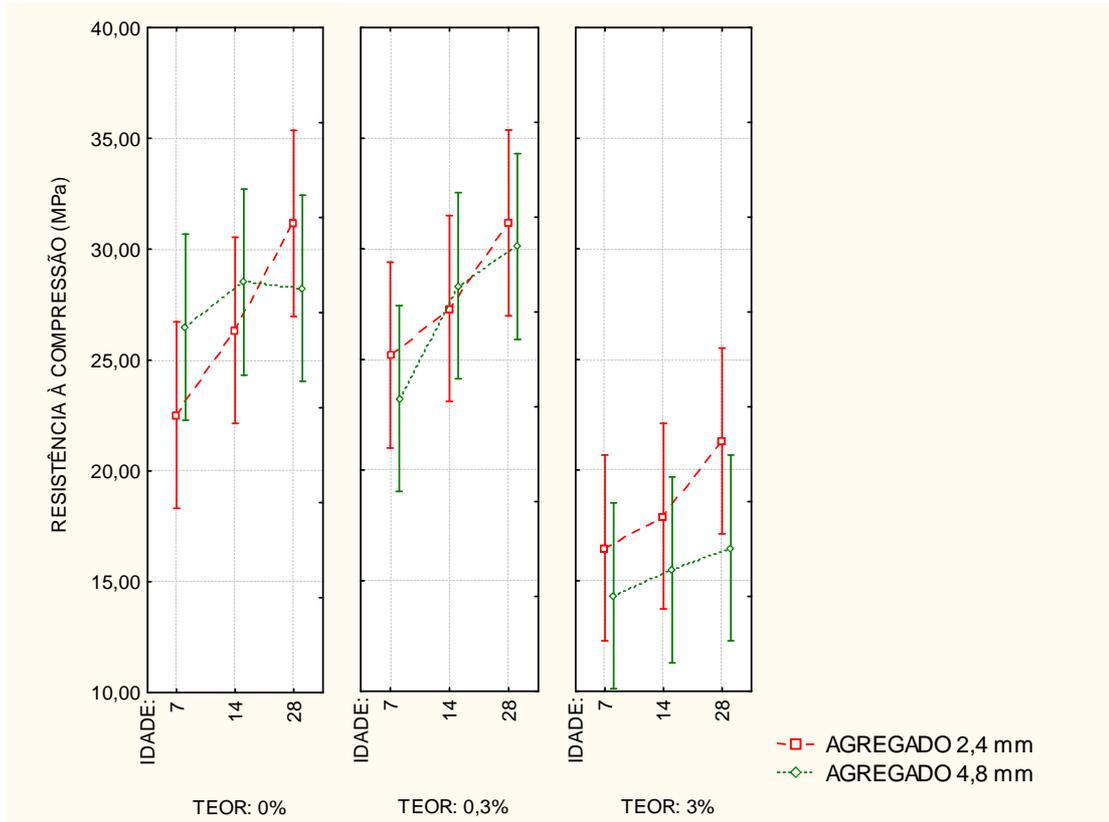


Figura 5.25 – Análise estatística dos resultados de resistência à compressão nos compósitos produzidos com fibra dispersa manualmente comparando: agregado 4,8 mm x 2,4 mm.

Também foram avaliados os compósitos produzidos com fibra dispersa de forma mecânica, havendo a comparação do efeito causado pela variação das dimensões das aberturas das peneiras de 1,2mm e 2,4mm. A Figura 5.26 apresenta as médias dos valores de resistência à tração na flexão e a Figura 5.27 a análise estatística correspondente. Verifica-se que variação do tamanho do agregado teve pouca influência, exceto para o traço com alto teor de fibra, o único que mostrou desempenho superior ao testemunho. Uma das hipóteses levantadas é que o uso de uma grande quantidade de fibras menores, mais bem dispersas, com um agregado regular, acabou por gerar menos defeitos, afetando positivamente o desempenho do compósito.

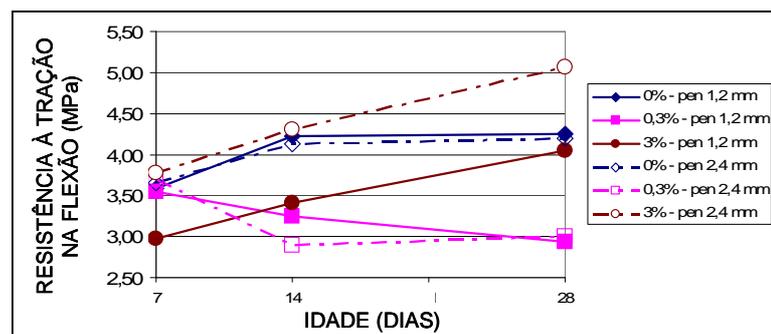


Figura 5.26 – Resultados de resistência à tração na flexão nos compósitos produzidos com fibra dispersa de forma mecânica, comparando: agregado 1,2 mm x 2,4 mm.

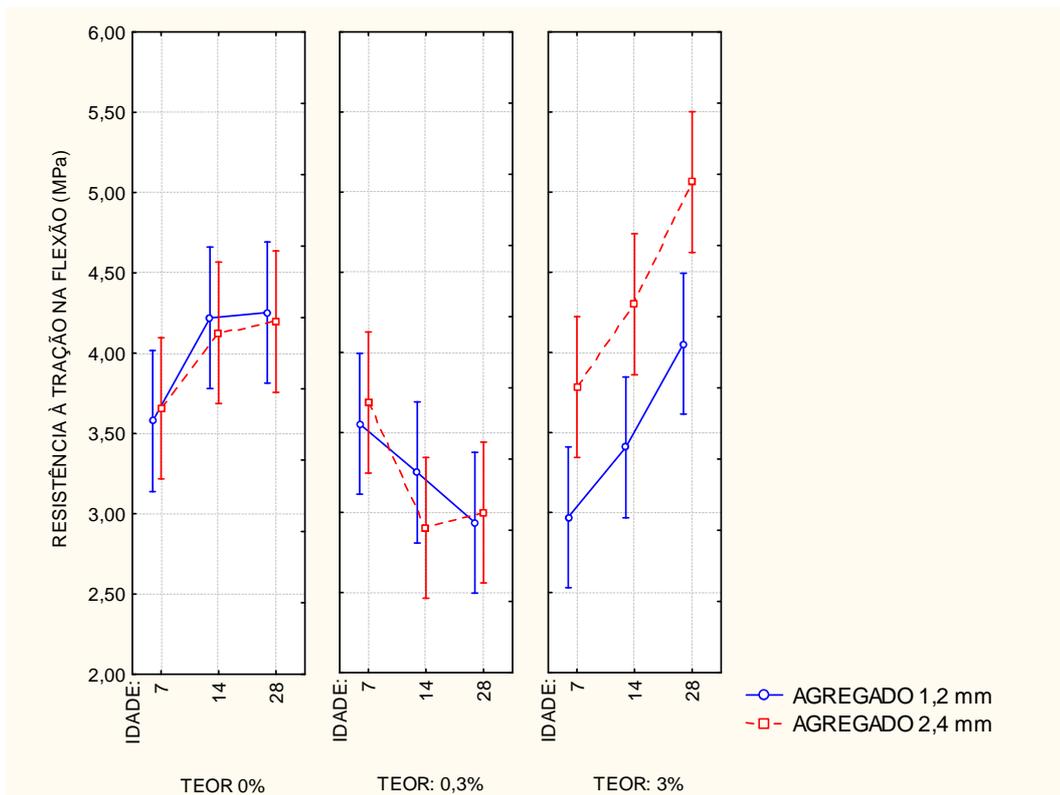


Figura 5.27 – Análise estatística dos resultados de resistência à tração na flexão nos compósitos produzidos com fibra dispersa de forma mecânica, comparando: agregado 1,2 mm x 2,4 mm.

Na Figura 5.28 apresentam-se os valores obtidos para a resistência à compressão dos compósitos com fibras moídas e dois tamanhos de agregado. A verificação estatística é apresentada na Figura 5.29. Os resultados indicam decréscimo nos compósitos com agregado de menor dimensão (1,2 mm). Os traços com altos teores de fibra não impactam positivamente a resistência à compressão, podendo inclusive apresentar queda de desempenho, quando associado a agregados menores. Ou seja, em termos de resistência à compressão, o uso das fibras é desaconselhável.

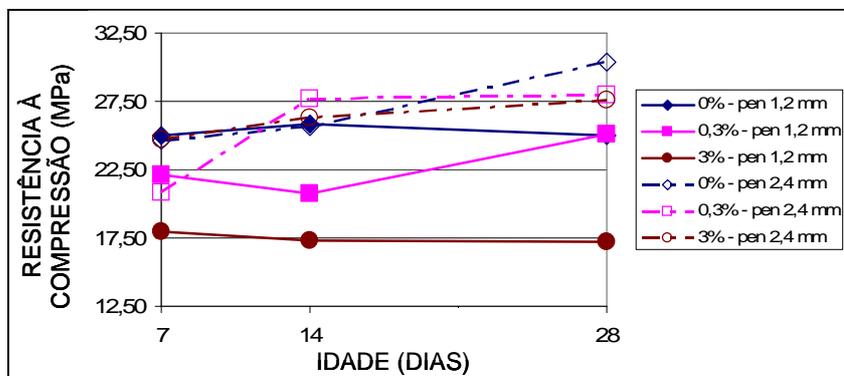


Figura 5.28 – Resultados de resistência à compressão nos compósitos produzidos com fibra dispersa de forma mecânica comparando agregado 1,2 mm x 2,4 mm.

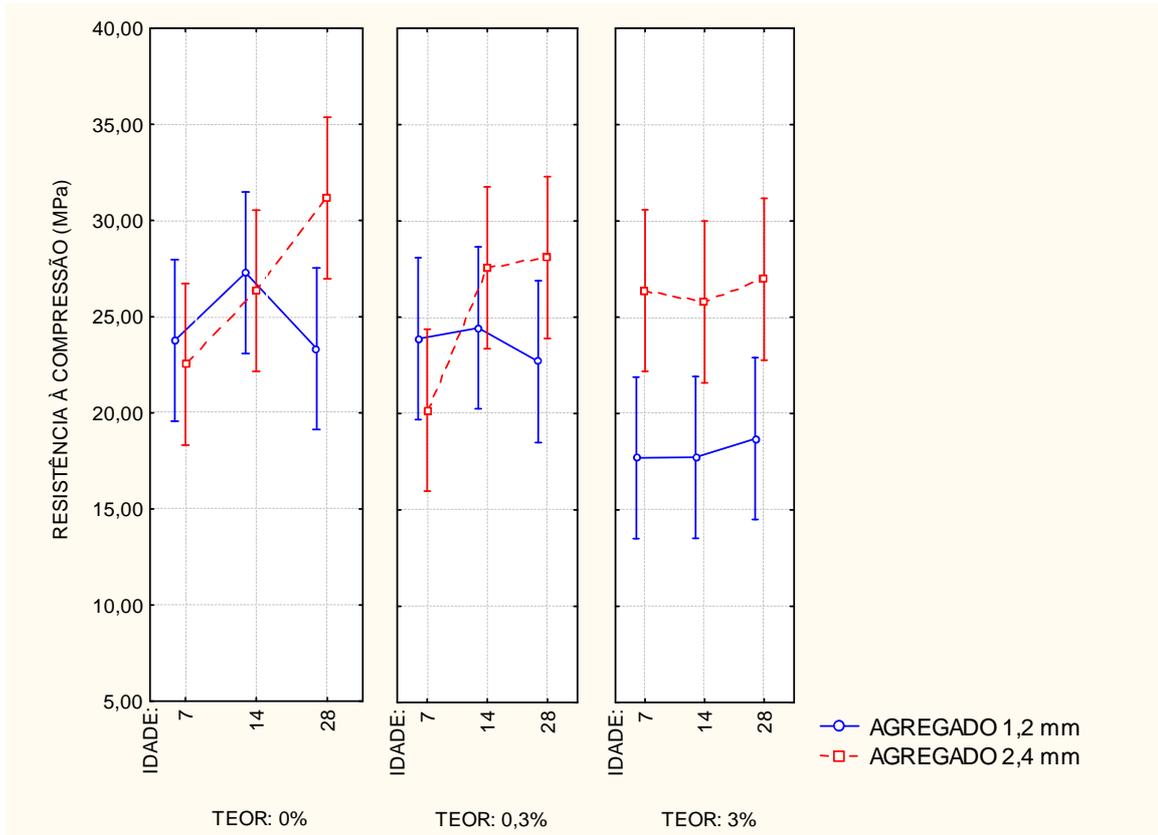


Figura 5.29 – Análise estatística dos resultados de resistência à compressão nos compósitos produzidos com fibra dispersa de forma mecânica, comparando: agregado 1,2 mm x 2,4 mm.

Acredita-se que o desempenho inferior do compósito produzido com agregado de 1,2 mm e menor teor de adição de fibra (0,3%) seja devido à produção de uma matriz mais porosa, pois o empacotamento foi prejudicado ao se reduzir a variedade de tamanhos do agregado. Conforme relatou Silva (2006), tal fato pode ainda ter sido agravado pela adição de fibra, que fez surgir vazios em função dos contatos fibra-fibra e da interação fibra-agregado. A porosidade resultante pode estar associada à formação de um arranjo estrutural inadequado proporcionado pela assimetria, pelo tamanho e pela disposição espacial heterogênea da fibra na matriz. A variação nas dimensões do agregado não influenciou a porosidade existente em torno da fibra, observada em todos os compósitos.

Ainda com relação ao peneiramento do agregado, pode-se inferir que o aumento da superfície específica pode ter afetado negativamente a trabalhabilidade, dificultando a compactação e a incorporação de maiores teores de fibra nos compósitos. Conforme concluiu Silva (2006), a concentração e o tamanho de sólidos da matriz influenciam na capacidade de adição das fibras, havendo uma relação inversa entre a concentração e o tamanho de sólidos e a possibilidade de incorporar fibras.

5.6 RESULTADOS DE TRABALHABILIDADE

Nos estudos preliminares foram realizados ensaios de trabalhabilidade nos compósitos gerados buscando avaliar qual a redução no índice de consistência provocada pela adição de diferentes teores de fibra de escória. O ensaio foi realizado em misturas fabricadas com areia não peneirada, com teores de fibra variando entre 0,3% a 0,9%.

Destaca-se que, para produção dos compósitos com maiores teores de adição da fibra foi necessário o emprego do aditivo, sendo impossibilitada a moldagem dos corpos-de-prova sem o uso do mesmo. O aditivo foi empregado de forma a se obter o índice de consistência padrão de 255 ± 10 mm.

A Figura 5.30 apresenta um gráfico comparativo entre as médias dos índices de consistência (em mm) obtidas para os compósitos com e sem adição de aditivo, além do teor de aditivo empregado (em relação à massa do cimento). Os resultados confirmam a tendência de redução da trabalhabilidade na medida em que aumenta o teor de adição de fibra de escória. Cabe lembrar que, de acordo com a literatura, quanto maior for o fator de forma da fibra, maior será o impacto na trabalhabilidade da mistura. As fibras de escória apresentam relações de aspecto variadas e elevadas, justificando seu forte impacto na trabalhabilidade.

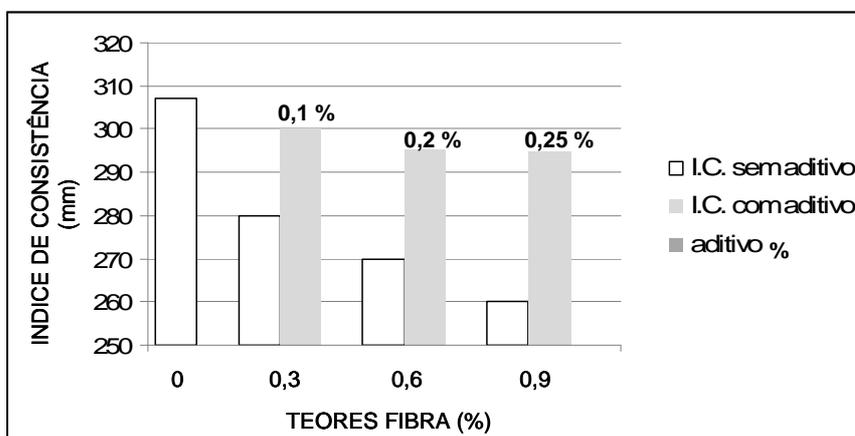


Figura 5.30 – Trabalhabilidade dos compósitos produzidos com e sem o emprego de aditivo, produzidos com fibra dispersa manualmente e agregado sem passar por peneiramento.

A adição da fibra de escória alterou outros parâmetros reológicos da matriz. A mesma atuou como um fino, colaborando para reduzir a exsudação. Segundo Figueiredo (2000), a elevada área superficial do material causa a adsorção de água e colabora para diminuir a fissuração por retração.

5.7 RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os resultados dos ensaios mecânicos refletiram a dificuldade encontrada para dispersar adequadamente a fibra de escória na matriz cimentícia e obter compósitos homogêneos. Por não ser uma matriz compacta, portanto menos resistente, e dada a fraca aderência entre a matriz e as fibras, o gasto energético para o arrancamento da fibra foi menor que o necessário para sua ruptura. Desta forma a ruptura nos compósitos deu-se a partir do arrancamento das fibras, dificultando a obtenção de ganhos significativos na resistência à tração dos compósitos.

Também como consequência de falhas na dispersão da fibra, houve a formação de pontos frágeis. Quando as fibras não ficam totalmente envoltas pela matriz, o mecanismo de aderência fibra-matriz é desfavorecido, conforme pode ser verificado nos ensaios mecânicos, onde na maior parte dos corpos-de-prova, ao serem rompidos, era observado o desprendimento da fibra da matriz.

A Figura 5.31 apresenta as médias das resistências à tração na flexão, em MPa, obtidas nas diferentes idades analisadas para os compósitos produzidos com agregado passante em peneira com abertura de 2,4 mm, com fibra dispersa de forma manual. A Figura 5.32 mostra a respectiva análise estatística.

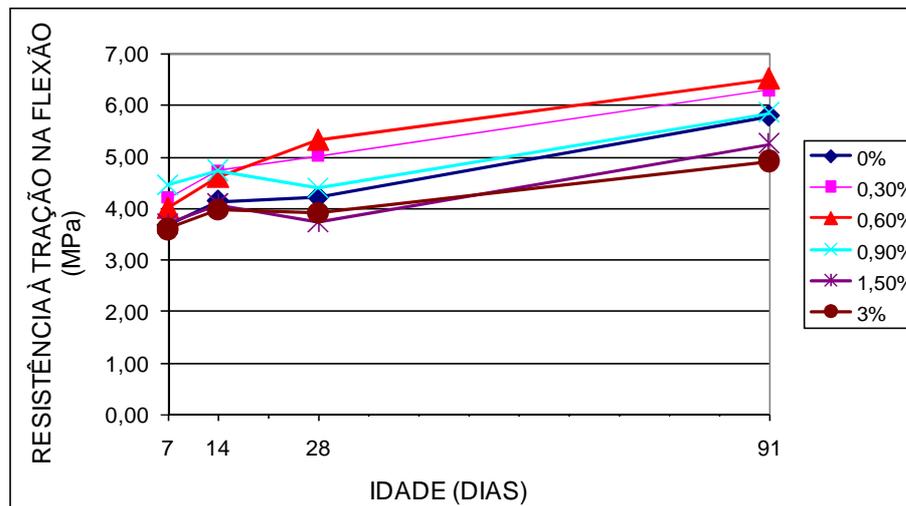


Figura 5.31 – Ensaio de resistência à tração na flexão nos compósitos produzidos com agregado passante em peneira com abertura de 2,4 mm e fibra dispersa de forma manual.

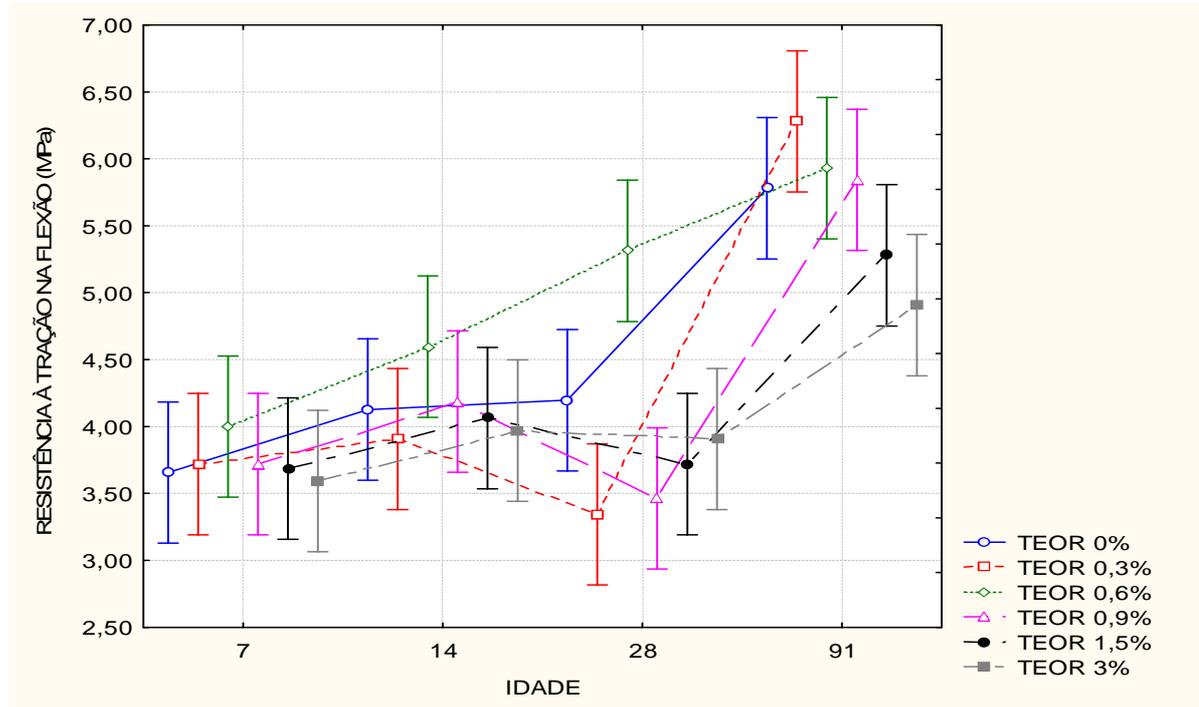


Figura 5.32 – Análise estatística do resultado de resistência à tração na flexão nos compósitos produzidos com agregado passante em peneira com abertura de 2,4 mm e fibra dispersa de forma manual.

Os resultados indicaram claramente que teores de fibra acima de 1% são muito elevados e impactam de forma negativa a resistência dos compósitos. O melhor desempenho aos 28 dias foi obtido quando se empregou um teor de 0,6% de adição de fibra. Já aos 91 dias o melhor resultado foi obtido com um teor de apenas 0,3% de fibras.

Cabe salientar que as falhas na dispersão da fibra de escória e o sentido de distribuição das mesmas na matriz também podem ter prejudicado o desempenho mecânico dos compósitos, conforme discutido no item 5.4. Deve-se ainda considerar que a adição da fibra de escória em grandes quantidades tende a alterar o comportamento reológico das misturas, o que pode impactar o seu comportamento mecânico. De acordo com Silva (2006), o indicador desta influência é dado pela alta variabilidade dos valores médios de resistência, tendência decorrente da presença de “defeitos” internos dos corpos-de-prova, em decorrência de deficiências na moldagem.

A Figura 5.33 apresenta as curvas de tensão x deformação à tração na flexão para os compósitos aos 28 dias, onde é possível verificar a atuação da fibra de escória. Analisando as curvas tensão x deformação das argamassas reforçadas, verifica-se que, até o teor de 0,9% de adição de fibra, não ocorre uma modificação sensível na ductilidade do compósito, embora se obtenham ganhos de resistência. Isto indica que os incrementos de resistência podem ser decorrentes do uso do aditivo e não da presença da fibra.

Para teores acima de 1% nota-se uma tendência de aumento da tenacidade, embora a resistência última não seja afetada. Esse é um comportamento mais característico da adição de fibras e pode ser uma melhora importante de comportamento do material para certas aplicações.

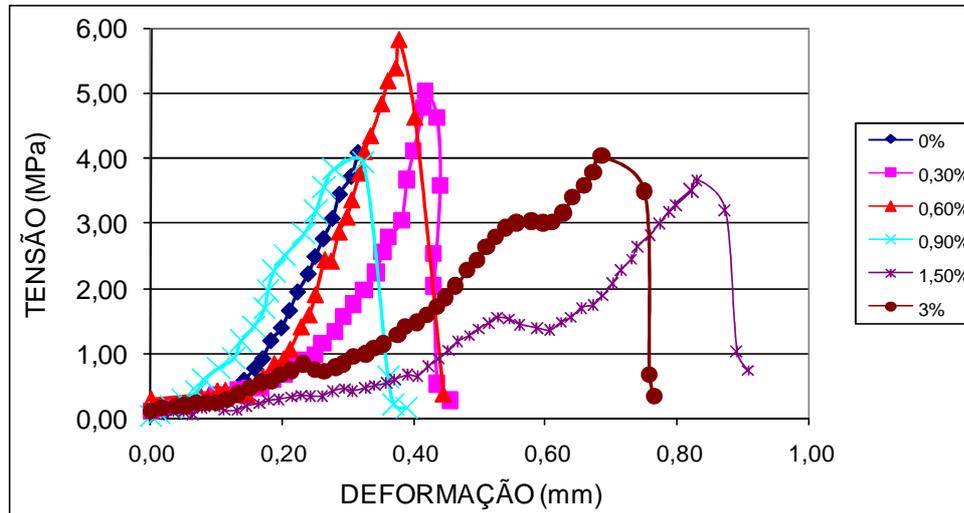


Figura 5.33 – Curvas de tensão x deformação para resistência à tração na flexão dos compósitos com idade de 28 dias.

5.8 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 5.34 apresenta as médias das resistências à compressão, em MPa, obtidas nas diferentes idades dos ensaios de compósitos produzidos com agregado passante em peneira com abertura de 2,4mm e fibra dispersa de forma manual. A Figura 5.35 contém a respectiva análise estatística.

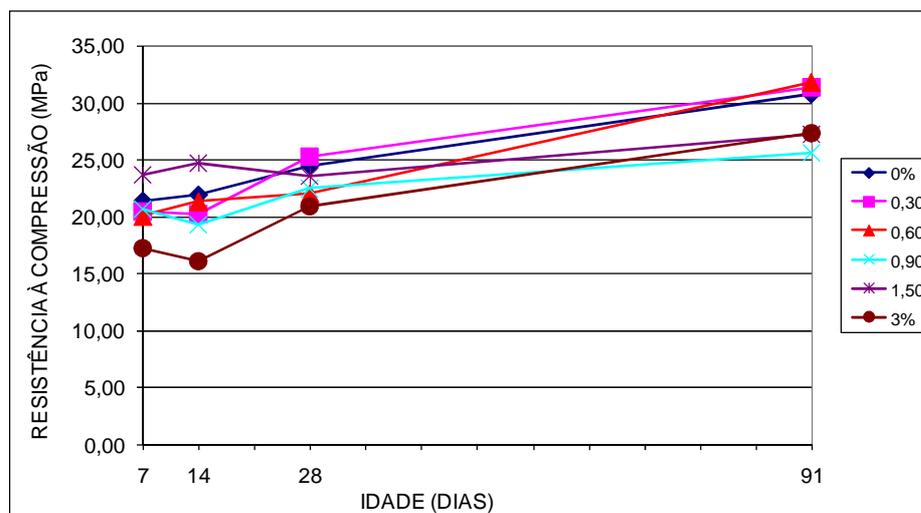


Figura 5.34 – Ensaio de resistência à compressão nos compósitos produzidos com agregado passante em peneira com abertura de 2,4 mm e fibra dispersa de forma manual.

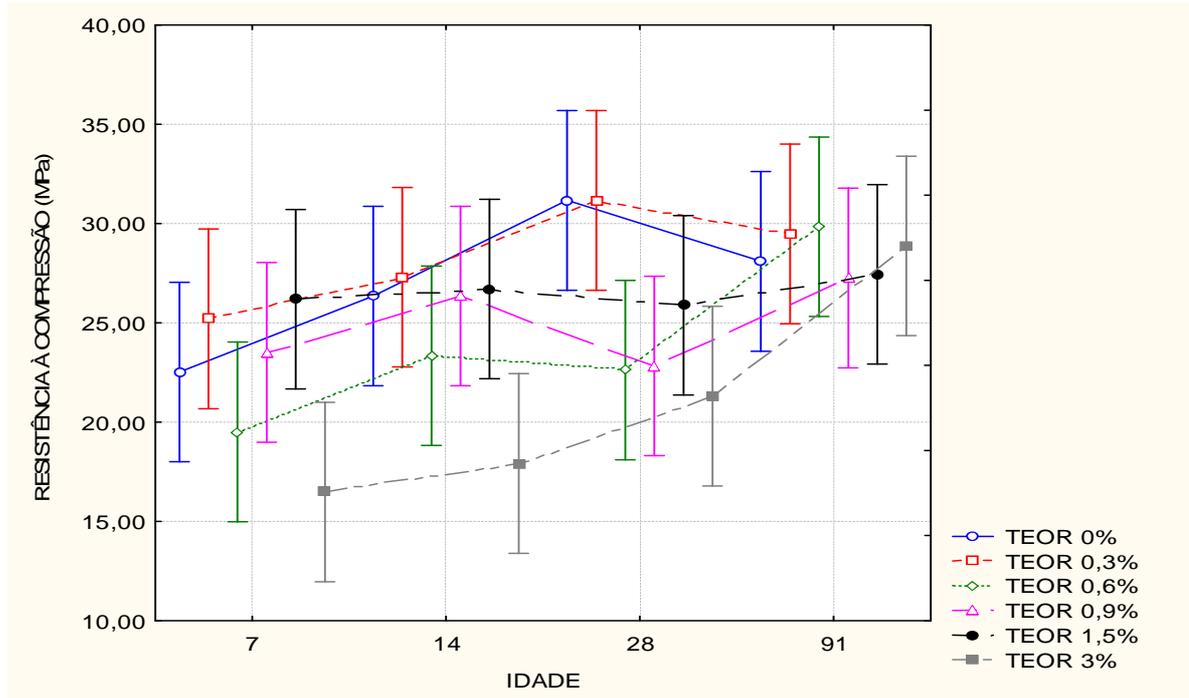


Figura 5.35 – Análise estatística do resultado de resistência à compressão nos compósitos produzidos com agregado passante em peneira com abertura de 2,4 mm e fibra dispersa de forma manual.

Novamente, como no caso da resistência à tração na flexão, os melhores resultados foram obtidos quando se empregaram teores de fibra de 0.3% e 0.6%, a 91 dias. Mas, no presente caso, o desempenho desses compósitos não foi superior ao do testemunho. O pior desempenho foi registrado para o compósito com o maior teor de fibra (3%), indicando que os problemas relacionados à dispersão do material, aliados à incorporação de ar, devem ter afetado fortemente a resistência à compressão dos compósitos.

Assim como no caso dos resultados de resistência à tração na flexão, acredita-se que o comportamento das argamassas reforçadas com fibras submetidas a ensaios de resistência à compressão também foi afetado pelos problemas de dispersão da fibra na matriz cimentícia. Contudo, para este ensaio foram observadas maiores variações nas médias das resistências obtidas, resultando em desvios padrão mais elevados. De acordo com Bernardi (2003), a diferença no comportamento entre os resultados dos ensaios mecânicos pode ser atribuída a uma maior incorporação de ar, devido aos problemas de trabalhabilidade decorrentes da utilização de teores mais elevados de fibra, que tende a afetar mais a resistência à compressão do que a resistência à tração.

Para analisar melhor o efeito das fibras foram plotadas as curvas tensão x deformação das várias argamassas aos 28 dias de idade, como mostrado na Figura 5.36. Observa-se que praticamente todas as misturas, com diferentes teores de adição da fibra de escória, têm

comportamento similar. A adição de fibras de escória não melhora nem a resistência última nem a ductilidade à compressão.

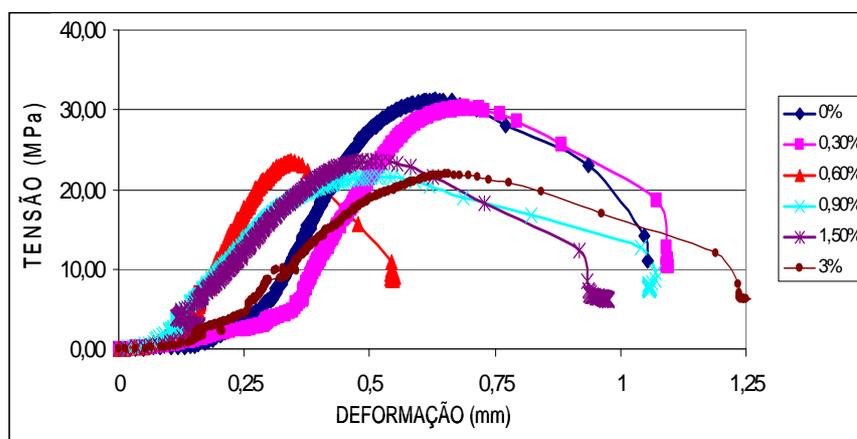


Figura 5.36 – Curvas de tensão x deformação à compressão dos compósitos com idade de 28 dias.

5.9 RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

O cálculo do módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos de argamassa aos 28 dias de idade, produzidos com agregado passante em peneira com abertura de 2,4 mm, foi baseado na equação apresentada no item 4.7.4, sendo os resultados ilustrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados médios dos tempos de propagação da onda ultrassônica, da densidade endurecida dos corpos-de-prova e do módulo de elasticidade dinâmico.

TEOR DE ADIÇÃO DE FIBRA (%)	TEMPO PROPAGAÇÃO ONDA ULTRASSÔNICA (μ s)	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA ULTRASSÔNICA (Km/s)	DENSIDADE ENDURECIDA (kg/m ³)	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (GPa)
0	41,93	0,000382	2171	2,83
0,3	43,9	0,000364	2160	2,57
0,6	41,45	0,000386	1971	2,64
0,9	40,83	0,000392	2144	2,94
1,5	41,36	0,000387	2159	2,88
3	42,7	0,000375	2161	2,71

Os dados da tabela mostram que os menores tempos de propagação da onda ultrassônica foram obtidos nos compósitos com teores de adição entre 0,6 e 1,5%. Os maiores valores de módulo foram registrados nos compósitos com adição de 0,9% e 1,5% de fibras, os únicos que superaram o valor do módulo de elasticidade registrado no testemunho. A Figura 5.37 apresenta um gráfico com os valores dos módulos de elasticidade dinâmico (GPa) obtidos para os compósitos com os diferentes teores de fibra.

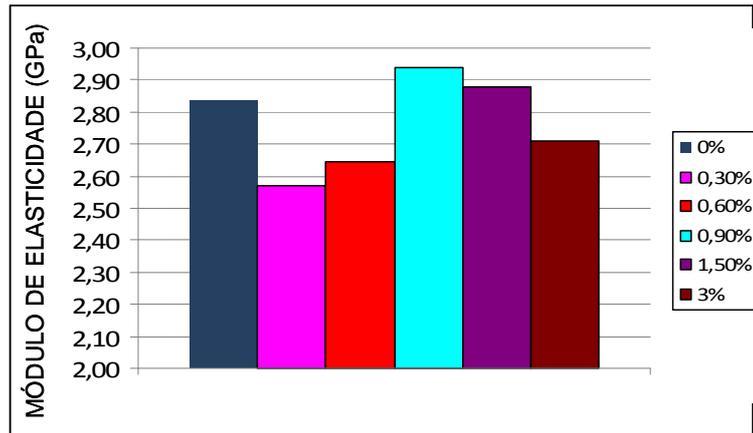


Figura 5.37 – Módulo de elasticidade dinâmico (GPa) das argamassas produzidas com agregado de dimensão máxima de 2,4 mm, aos 28 dias de idade.

Silva (2006) obteve uma redução no módulo de elasticidade de até 30% nos compósitos, com relação à argamassa de referência. A mesma considerou que essa redução do módulo estaria diretamente relacionada com a redução da densidade de argamassa endurecida. A adição de fibras provoca a incorporação de ar, reduzindo a densidade endurecida e o módulo de elasticidade. Essa tendência também foi observada no presente estudo.

A Figura 5.38 apresenta um gráfico contendo uma comparação dos efeitos da adição da fibra de escória no módulo de elasticidade e na densidade endurecida dos compósitos analisados. Os valores apresentam tendências de comportamento similar, mas as variações no módulo são mais sensíveis do que na densidade, indicando que o controle com uso do ultrassom é uma boa estratégia para controlar a fabricação de compósitos com fibras.

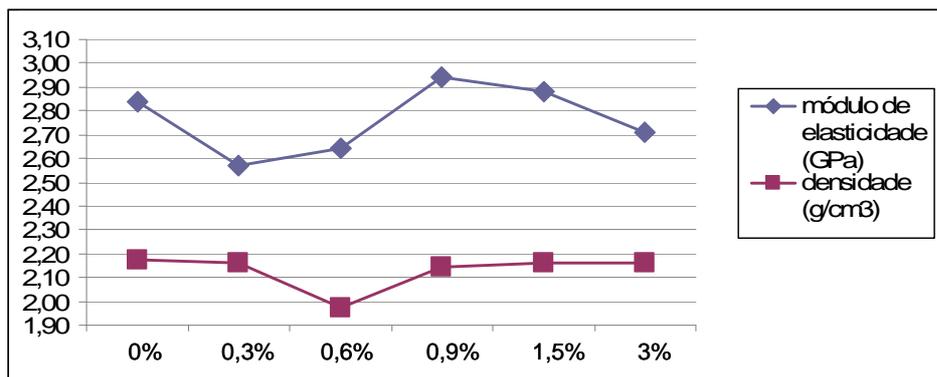


Figura 5.38 – Efeito da adição da fibra de escória no módulo de elasticidade e na densidade endurecida das argamassas produzidas com agregado de dimensão máxima de 2,4 mm.

5.10 RESULTADOS DO ENSAIO DE RETRAÇÃO RESTRINGIDA

Os resultados dos ensaios de retração restringida executados em amostras dos compósitos de argamassa reforçados com diferentes teores de adição de fibra são apresentados na

forma de curvas de avanço da deformação nos anéis, de 24 horas após a desforma até a idade de 14 dias.

As Figuras 5.39, 5.40, 5.41, 5.42, 5.43 e 5.44 apresentam os gráficos de evolução das deformações das argamassas com 0%, 0,3%, 0,6%, 0,9%, 1,5% e 3% de adição de fibras. Na Figura 5.45 tem-se um gráfico com os valores médios de evolução das deformações para todas as argamassas analisadas. Da análise do gráfico geral se observa claramente que todas as amostras com fibras são capazes de suportar deformações muito maiores que o testemunho antes de sofrerem fissuração, o que é um resultado extremamente positivo, pois indica que as mesmas podem ter um efeito bastante favorável no controle da fissuração devido à retração.

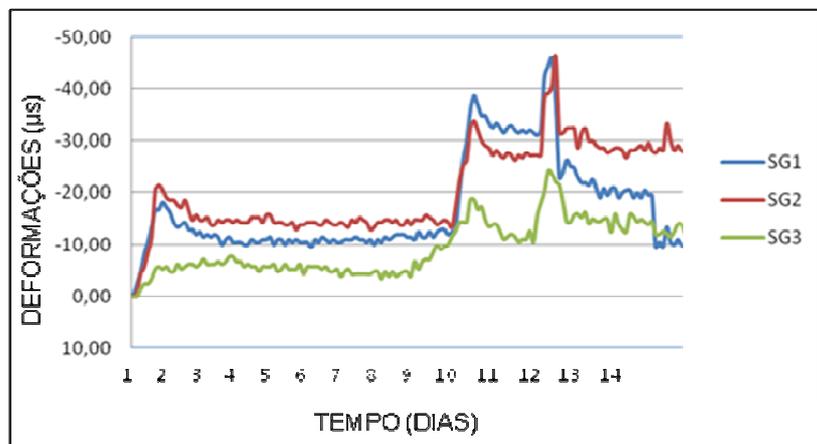


Figura 5.39 – Evolução das deformações do anel restringido em cada extensômetro da argamassa de referência.

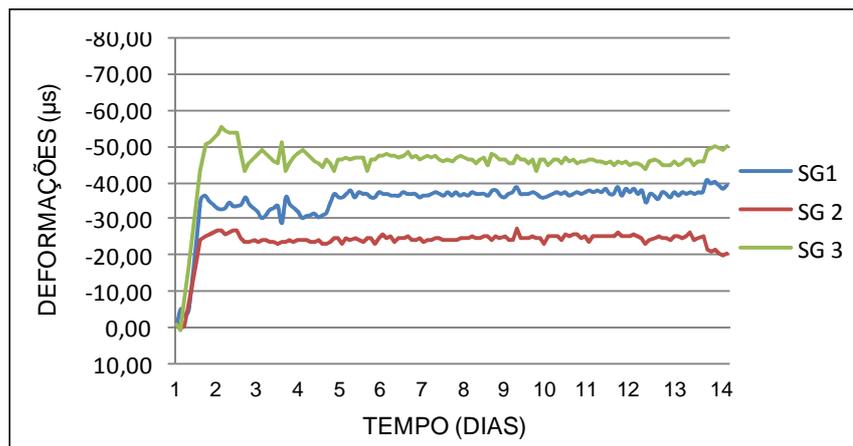


Figura 5.40 – Evolução das deformações do anel restringido em cada extensômetro do teor de adição 0,3% da fibra de escória.

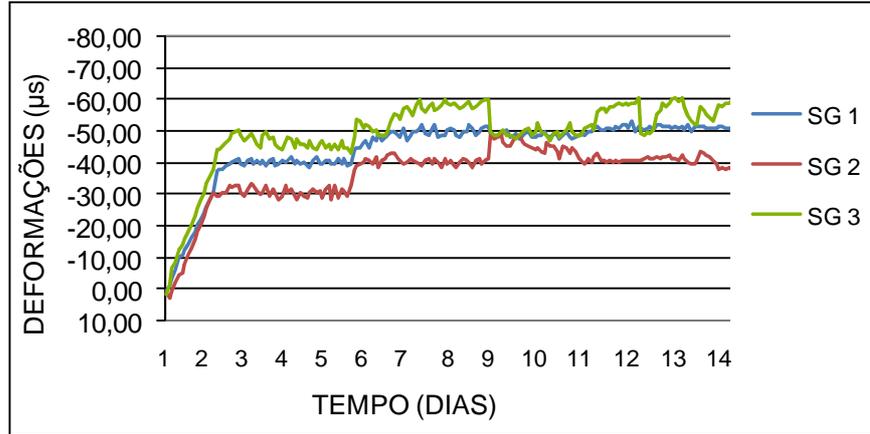


Figura 5.41 – Evolução das deformações do anel restringido em cada extensômetro do teor de adição 0,6% da fibra de escória.

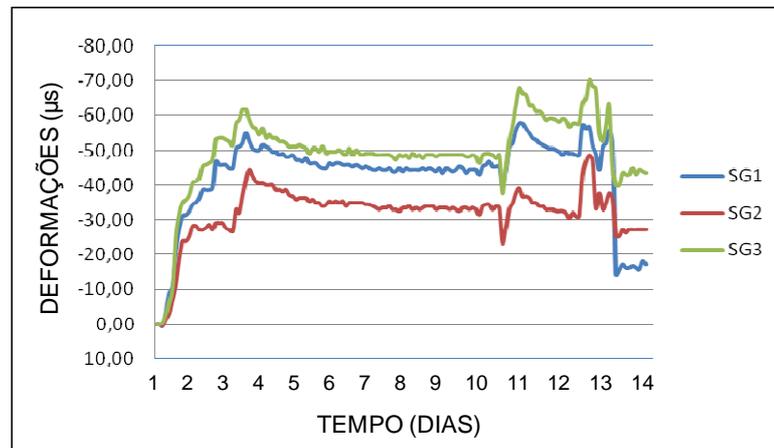


Figura 5.42 – Evolução das deformações do anel restringido em cada extensômetro do teor de 0,9% da fibra de escória.

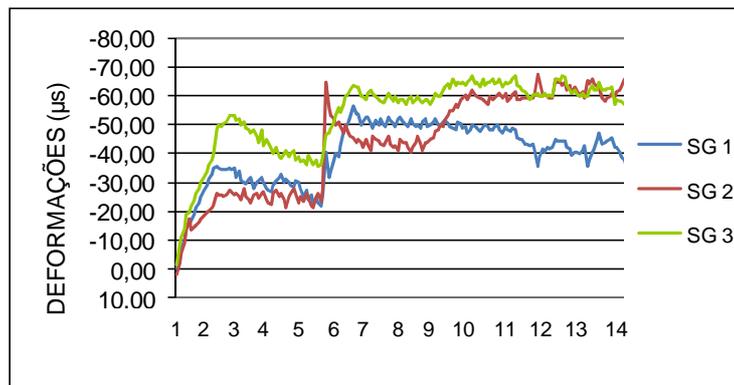


Figura 5.43 – Evolução das deformações do anel restringido em cada extensômetro do teor de adição 1,5% da fibra de escória.

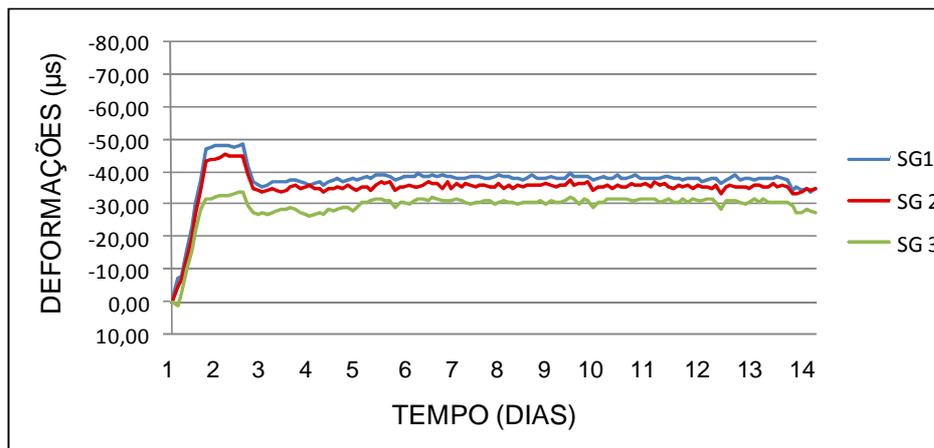


Figura 5.44 – Evolução das deformações do anel restringido em cada extensômetro do teor de adição de 3% da fibra de escória.

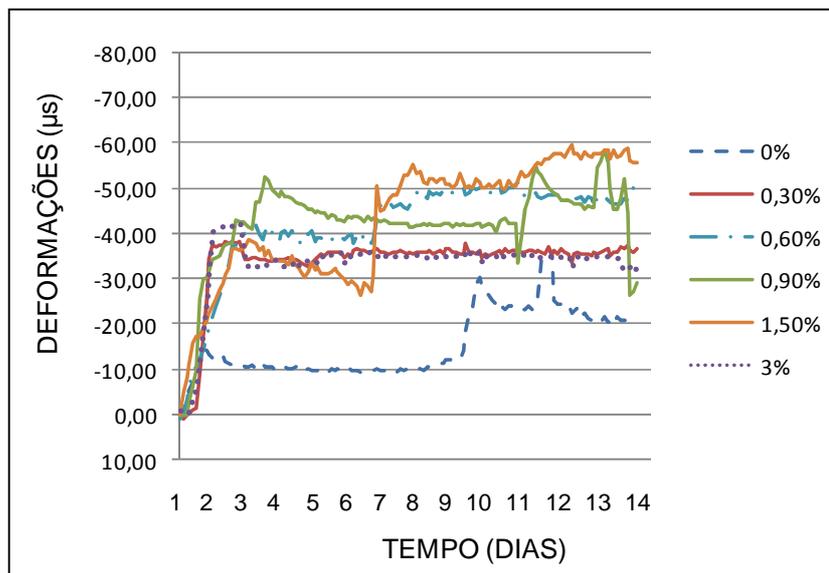


Figura 5.45 – Valores médios obtidos para a evolução das deformações de todos os anéis restringidos.

Analisando os diversos gráficos observa-se que fissuras por retração ocorreram na argamassa de referência entre o primeiro e segundo dias (Figura 5.39). Já no caso das argamassas com adição de fibra de escória de alto-forno, com adição de 0,3% e 0,6%, verificou-se um retardamento no aparecimento das fissuras, que passaram a ocorrer no segundo ou terceiro dia. O melhor resultado foi obtido com o teor de adição de 0,9%, para o qual as fissuras ocorreram a partir do quarto dia (Figura 5.40). Nos teores de adição de 1,5% e 3%, também foi identificado o aparecimento dos picos nos gráficos entre o segundo e o terceiro dia, mostrando que a presença da fibra foi capaz de retardar o surgimento das fissuras.

Os resultados indicaram que o reforço com fibras aprimorou o desempenho de todos os compósitos, proporcionando uma melhor distribuição das tensões, além de reduzir a abertura das fissuras provocadas pela retração. Os mesmos estão de acordo com o observado na revisão bibliográfica, onde adições de microfibras curtas tendem a proporcionar melhores benefícios na contenção da retração do que no reforço da matriz.

Destaca-se que os gráficos apresentaram perturbações em suas leituras oriundas de interferências elétricas devidas ao uso de demais equipamentos no ambiente de laboratório, que requerem grandes cargas para entrar em funcionamento. Conforme pode ser visualizado, as perturbações foram identificadas nos mesmos dias para os pares de anéis ensaiados durante o mesmo período, ocorrendo entre o décimo e décimo primeiro dias nos gráficos da argamassa de referência e teor de adição de 0,9% e no sexto e nono dias nos teores de 0,6% e 1,5%. Apesar deste fato, não houve prejuízo na análise dos resultados do ensaio, pois o dado fundamental para avaliar a fissuração ocorrida nos corpos-de-prova foram os picos registrados nas primeiras idades.

Para complementar o estudo de retração restringida, torna-se necessário determinar também a posição e o perfil da abertura das fissuras, além do estado geral da fissuração. Segundo Sales (2006), o uso da microscopia ótica permite obter tais informações, desde que se disponha de aparelhos com boa resolução.

Buscando observar as aberturas das fissuras geradas nos corpos-de-prova analisados, foram captadas imagens das amostras com o auxílio de lupa microscópica. No entanto, o comportamento apresentado pelas microfissuras não foi o esperado, pois houve um mapeamento destas no contorno dos anéis e em sua maioria estavam próximas aos pontos de aplicação dos três extensômetros. De acordo com a norma ASTM C1581 (2004), deveria ocorrer uma fissura principal que partisse o anel de argamassa, sendo monitorada sua abertura. Acredita-se que o surgimento do mapeamento das microfissuras possa ser em função do não vedamento da face superior dos anéis de argamassa com material selante.

As Figuras 5.46 e 5.47 apresentam, respectivamente, imagens com ampliação de 50 vezes com o detalhamento das microfissuras na argamassa de referência e na com teor de adição de 0,9%, que obteve o melhor desempenho no ensaio de retração restringida.

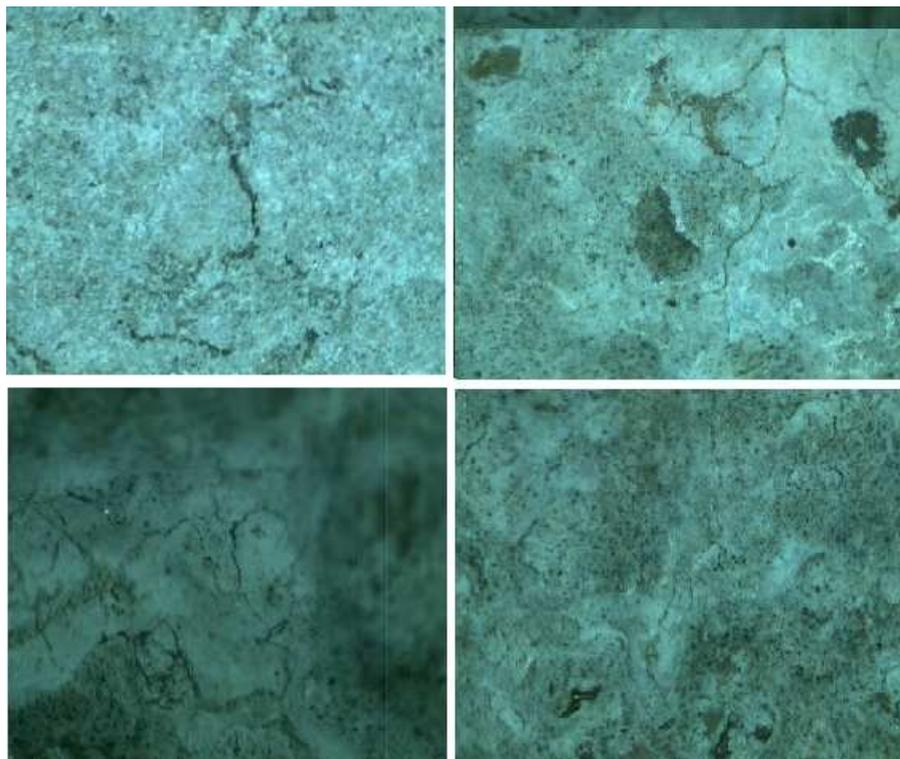


Figura 5.46 – Microfissuras encontradas na argamassa de referência por meio de lupa microscopia com ampliação de 50x.

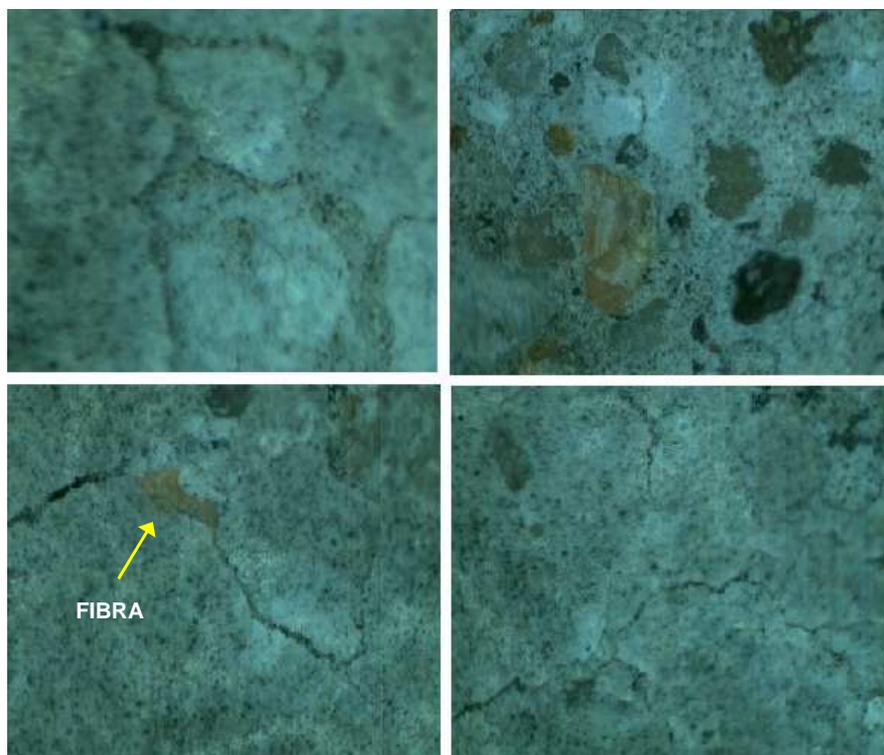


Figura 5.47 – Microfissuras encontradas na argamassa com adição de 0,9% de fibra de escória por meio de lupa microscopia com ampliação de 50x.

Na Figura 5.47 foi possível identificar a presença das fibras entre as fissuras que, conforme indicado na seta, modificaram o caminho destas, por vezes interrompendo-o. O padrão

observado nas imagens ilustra o comportamento citado por Nunes (2006) sobre compósitos reforçados com microfibras, nos quais a contribuição da fibra no controle da fissuração se dá mais em função da sua distribuição na matriz e pela sua interação com esta, do que pelo seu comprimento. Contudo, por outro lado, os grumos de aglomeração de fibras podem ter atuado como defeitos indutores de fissuras, contribuindo negativamente para o desempenho dos compósitos.

De forma geral, o ensaio de retração restringida permitiu caracterizar o comportamento dos compósitos de argamassa reforçados com fibra de escória em termos do retardo na formação de fissuras. Constatou-se claramente que existe uma influência benéfica da adição da fibra no desempenho da matriz cimentícia frente a esforços de retração restringida. A adição da fibra de escória de alto-forno retardou o aparecimento de fissuras nas idades iniciais, permitindo que a matriz suportasse tensões de tração bem mais elevadas antes de fissurar, evidenciando um comportamento típico de microfibra, que atua em conjunto com a matriz cimentícia para dificultar a coalescência das microfissuras.

5.11 RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO – TIPO QUEDA DE ESFERA

5.11.1 Ensaio de queda de esfera de 1 kg

O ensaio de resistência ao impacto foi realizado inicialmente através da queda de uma esfera com massa de aproximadamente 1000g. Os resultados, obtidos segundo os mesmos critérios adotados por Bernardi (2003) e Garcez (2005), são mostrados na Tabela 5.3. Foram levantadas as energias acumuladas até o aparecimento da primeira fissura na face inferior e o número de golpes necessários até a ruptura das placas, considerada como sendo marcada pela propagação das fissuras até a face superior.

Tabela 5.3 – Resultados do ensaio de resistência ao impacto – queda de esfera de 1kg.

TEOR FIBRA (%)	ALTURA MÉDIA DE QUEDA PARA ABERTURA DA PRIMEIRA FISSURA NA FACE INFERIOR (m)	ALTURA MÉDIA DE QUEDA PARA PROPAGAÇÃO DA FISSURA ATÉ A FACE SUPERIOR (m)	NÚMERO DE GOLPES ATÉ A RUPTURA
0	0,34	0,40	4
0,3	0,27	0,37	3
0,9	0,24	0,30	3
3	0,30	0,37	3

Com relação à primeira fissura, nenhum teor de adição da fibra conseguiu retardar seu aparecimento, sendo que o mesmo ocorreu, em média, em uma altura igual de queda. Um

comportamento similar é observado quando se analisa a altura de quedas necessária até a ruptura dos compósitos, não sendo observado aumento na resistência ao impacto com a incorporação de fibra.

A Figura 5.48 apresenta um gráfico com os deslocamentos (mm) registrados, para cada nível de queda da esfera (m). Também estão indicadas as energias médias acumuladas até a ruptura, para cada mistura analisada. Os resultados evidenciam que a adição de fibras prejudica o comportamento ao impacto das placas.

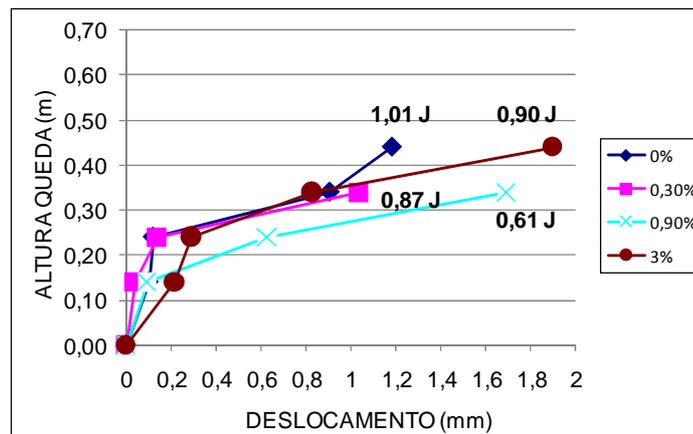
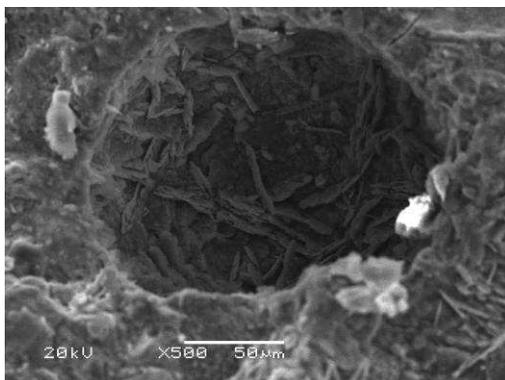
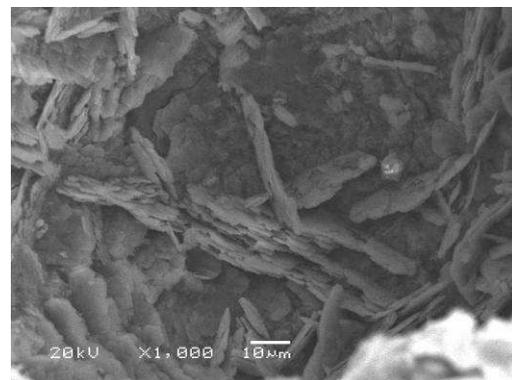


Figura 5.48 – Ensaio de impacto com queda de esfera com massa de 1kg.

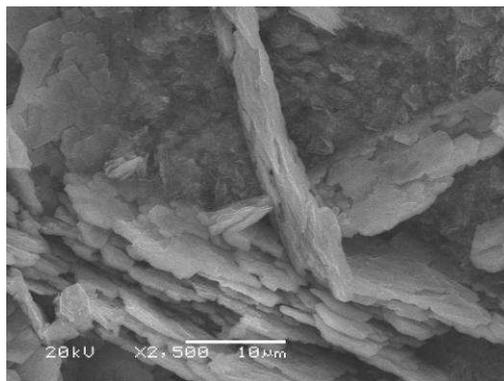
Foram realizados ensaios de microscopia com auxílio do MEV em amostras retiradas das placas de argamassa ensaiadas ao impacto, com o objetivo de verificar a aderência fibra-matriz. A Figura 5.49 apresenta imagens captadas com ampliações de 500, 1.000 e 2.500x de pontos com fibras na superfície fraturada de uma placa de argamassa com teor de adição de 3%.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.49 – MEV da superfície fraturada de placa de argamassa reforçada com teor de 3% de fibra de escória, nas ampliações de: (a) 500x; (b) 1.000x; (c) 2.500x.

As imagens obtidas possibilitaram verificar que muitas fibras foram arrancadas da matriz (Figura 5.49a), confirmando a fraca aderência entre fibra-matriz. Algumas fibras foram fraturadas (Figura 5.49c), mas isso não contribuiu para aumentar a absorção de energia das placas reforçadas de forma sensível, conforme mostram os resultados. Essa constatação confirmou a tendência registrada por Silva (2004) em seus ensaios de impacto com fibra de wollastonita, microfibras cujas características se assemelham à fibra de escória.

Como citado acima, a análise dos resultados indica que a adição da fibra de escória não contribuiu para incrementar a resistência ao impacto das placas de argamassa. O mesmo comportamento foi observado por Bernardi (2003) para compósitos reforçados com fibras de sisal, sendo as mesmas consideradas inadequadas para controlar o impacto em matrizes cimentícias. A autora concluiu que os compósitos com adição de fibra de aço e fibra aramida apresentaram melhor comportamento em relação à energia de ruptura acumulada e à energia para aparecimento da primeira fissura.

Várias podem ser as causas para o desempenho insatisfatório da fibra de escória como reforço na resistência ao impacto e, principalmente, da aleatoriedade no resultado do ensaio, tais como os problemas de dispersão das fibras na matriz. Entretanto, deve-se considerar que o ensaio com a esfera de 1 kgf foi concebido para concreto, e pode ser inadequado para analisar placas de argamassa que tem menor resistência, fato comprovado pelo desempenho modesto do testemunho, que não suportou muitas quedas da esfera.

A comparação direta dos resultados com os obtidos por Bernardi (2003) e Garcez (2005) se mostrou impossível, por se tratarem de materiais com resistências muito diferenciadas (concreto e argamassa), e porque a espessura da placa era muito inferior à usada anteriormente. Desta forma, decidiu-se refazer o ensaio de impacto para alguns teores de

adição com uso de uma esfera de aproximadamente 500g, utilizando a metodologia proposta por Ramakrishna e Sundararajan (2005). Os resultados são apresentados a seguir.

5.11.2 Ensaio de queda de esfera de 500 g

O ensaio de comportamento ao impacto com queda de esfera de 500g foi executado em amostras com teores selecionados de fibras (0%, 0,3%, 0,9% e 3%) e foi avaliado de duas maneiras distintas. Em uma delas se adotaram os mesmos parâmetros adotados para o ensaio com a esfera de 1 kg, propostos por Bernardi (2003), enquanto na outra se efetuou a análise da mesma forma que Ramakrishna e Sundararajan (2005), fixando a altura de queda da esfera em 0,24m.

A Tabela 5.4 apresenta as alturas médias de queda necessárias para o aparecimento das primeiras fissuras nas faces inferior e superior, além do número de golpes até a ruptura das placas. Os resultados evidenciam que o reforço com fibra promove um pequeno incremento no desempenho ao impacto dos compósitos em relação à referência, sendo verificado que a abertura das fissuras ocorre em alturas maiores que as registradas no testemunho. Além disto, demandam um maior número de golpes até ruptura.

Tabela 5.4 – Resultados do ensaio de resistência ao impacto com esfera de 500 g – variando altura de queda.

TEOR FIBRA (%)	ALTURA MÉDIA DE ABERTURA PRIMEIRA FISSURA FACE INFERIOR (m)	ALTURA MÉDIA DE ABERTURA PRIMEIRA FISSURA FACE SUPERIOR (m)	NÚMERO DE GOLPES ATÉ A RUPTURA
0	0,59	0,64	6
0,3	0,74	0,79	7
0,9	0,54	0,69	6
3	0,54	0,74	7

O teor de 0,9% apresentou o pior comportamento, fato que pode ser atribuído a problemas identificados na moldagem dos corpos-de-prova, em função da aglomeração da fibra de escória e incorporação de ar. Tais aspectos também foram observados nas placas produzidas com adição da maior quantidade de fibra (3%), levando a concluir que a dificuldade para dispersar a fibra na matriz culminou na produção de placas com distribuição heterogênea de fibras, contribuindo para a aleatoriedade dos resultados do ensaio. Já os melhores resultados foram obtidos com o teor de 0,3% de adição de fibras.

A Figura 5.50 mostra um gráfico contendo os deslocamentos (mm) obtidos, para cada altura de queda da esfera (m). Também estão indicadas as energias acumuladas até a ruptura. Observa-se que as placas com adição da fibra de escória absorveram uma quantidade de

energia pouco maior que o testemunho até a ruptura. O melhor desempenho foi registrado para o teor de 0,3%, que demandou mais golpes para seu rompimento.

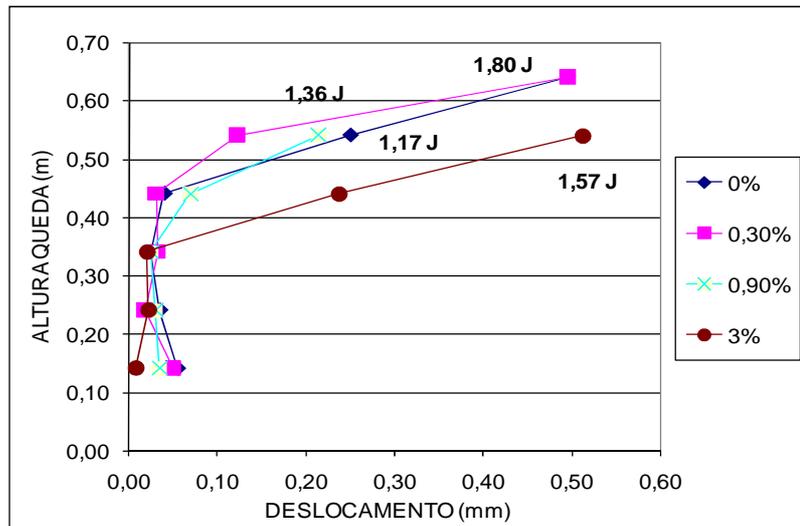


Figura 5.50 – Ensaio de impacto com queda de esfera com massa de 500 g – variando altura de queda.

No ensaio com a esfera lançada de uma altura fixa, o melhor desempenho também foi registrado na placa com a menor quantidade de fibra (0,3%), que suportou um maior número de golpes até o aparecimento das fissuras nas faces inferior e superior. O teor intermediário de adição (0,9%) foi o único a apresentar desempenho inferior ao testemunho, absorvendo menor quantidade de energia. A Tabela 5.5 apresenta os números médios de golpes necessários até a abertura das primeiras fissuras nas faces inferiores e superiores.

Tabela 5.5 – Resultados do ensaio de resistência ao impacto com esfera de 500 g – altura de queda fixa.

TEOR FIBRA (%)	NÚMERO MÉDIO DE GOLPES ATÉ ABERTURA PRIMEIRA FISSURA FACE INFERIOR	NÚMERO MÉDIO DE GOLPES ATÉ ABERTURA PRIMEIRA FISSURA FACE SUPERIOR
0	16	17
0,3	19	23
0,9	15	16
3	17	17

Na Figura 5.51 tem-se o gráfico com os deslocamentos obtidos (mm), em relação ao número de quedas da esfera sofrido pelas placas, assim como o valor da energia acumulada até a ruptura. Ao contrário de Ramakrishna e Sundararajan (2005), que obtiveram incrementos em torno de 3 a 18 vezes na resistência ao impacto de suas placas reforçadas com fibras vegetais, utilizando teores de adição de 0,5%, 1%, 1,5% e 2%, em relação à massa do cimento, os resultados indicaram apenas uma pequena melhoria no comportamento dos compósitos reforçados com 0,3% de fibra de escória. Contudo, deve ser

considerado que os comprimentos das fibras vegetais utilizadas por Ramakrishna e Sundararajan (2005) eram bem maiores, ficando entre 20 e 40 mm.

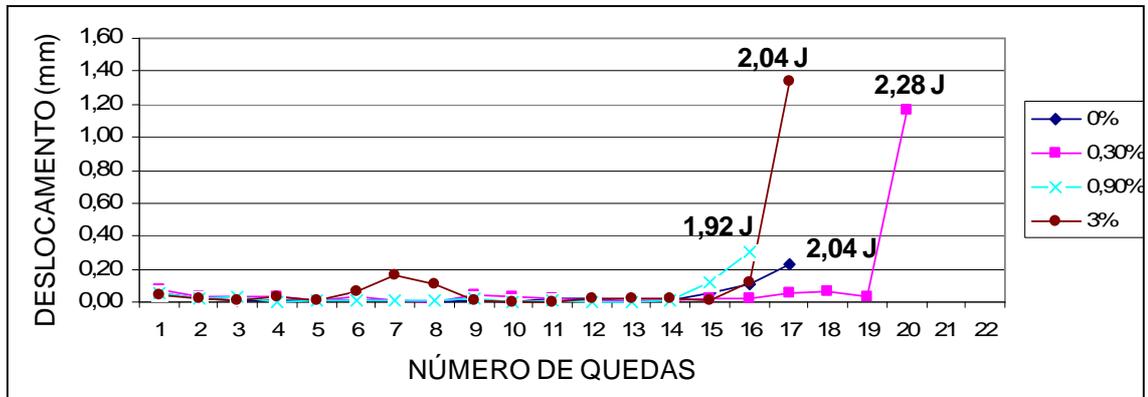


Figura 5.51 – Ensaio de impacto com queda de esfera com massa de 500 g – altura de queda fixa.

De forma geral, os resultados indicam que o reforço com fibras não conseguem melhorar o comportamento ao impacto das placas. Acredita-se que esse comportamento é derivado das características da fibra, que não favorecem a aderência com a matriz, dificultando que a mesma restrinja o desenvolvimento de fissuras. Além disso, os problemas associados à dispersão da fibra podem prejudicar seu desempenho.

5.12 CONSIDERAÇÕES SOBRE A DISPERSÃO DA FIBRA

No decorrer da pesquisa, diversas técnicas para análise da dispersão da fibra de escória de alto-forno foram testadas. Considerando a questão ambiental, buscou-se inicialmente utilizar a fibra na sua condição natural, ou seja, sem adição de reagentes químicos e evitando processos de queima que pudessem emitir gases poluentes.

Depois, como descrito no programa experimental, foram propostos outros métodos para promover a dispersão da fibra, classificados em manual e mecânico. Atribuiu-se o insucesso desses devido a características inerentes das fibras minerais de escória que, ao serem submetidas a processos mecânicos de dispersão, se agrupam em grumos cada vez mais firmes, dificultando sua separação.

A partir da percepção de que a presença da resina orgânica aplicada na fibra de escória durante seu processo de produção poderia ser responsável pela dificuldade de dispersão da mesma na matriz cimentícia, buscou-se submeter a fibra a um aquecimento em forno elétrico da marca Sanchis (Figura 5.52), para retirada do adesivo que permite a fabricação das mantas de fibras. Foram usados patamares de aquecimento de 400°C e 600°C,

especificados por especialistas para fazer com que apenas a resina orgânica fosse eliminada no processo. Foi adotada uma taxa de elevação de temperatura de 3°C/min, para não danificar a fibra.



Figura 5.52 – Forno elétrico utilizado no aquecimento das fibras com temperaturas de 400°C e 600°C.

Após o aquecimento, foi verificada uma perda de massa de aproximadamente 1%, em cada nível de temperatura. Contudo, visualmente a fibra manteve sua condição aglomerada conforme mostrado na Figura 5.53.



Figura 5.53 – Fibra de escória após aquecimento de: (a) 400°C; (b) 600°C.

As fibras aquecidas foram dispersas manualmente e aplicadas na moldagem de anéis extras de argamassa, escolhidos como teste para verificação da eficácia do processo de dispersão da fibra após exposição à temperatura. Porém, os mesmos sinais de aglomeração registrados em misturas com fibras não aquecidas foram observados.

Em outra tentativa para dispersar a fibra de escória, amostras do material foram imersas em água e submetidas à emissão de ondas ultrassônicas, técnica comumente utilizado para dispersão de nanofibras. O resultado foi positivo quando se utilizou uma quantidade pequena de fibra (aproximadamente 1g). Percebeu-se que se podiam visualizar separadamente as microfibras de escória e o shot concentrado ao fundo do recipiente. A

Figura 5.54 apresenta imagens do equipamento de ultrassom utilizado e a quantidade de fibra dispersada no fundo do recipiente.

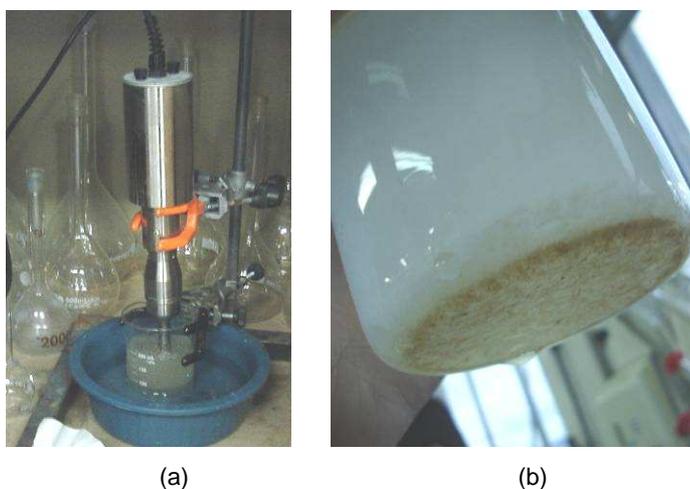


Figura 5.54 – (a) Equipamento de ultrassom; (b) Fibra dispersada no fundo do recipiente utilizado no ensaio.

No entanto, quando se incrementou a quantidade de fibra na solução, as ondas ultrassônicas não conseguiram provocar a dispersão, mesmo com o aumento de sua amplitude, como mostrado na Figura 5.55. Dessa forma se descartou a técnica, pois a mesma só se mostrou eficiente para quantidades muito pequenas de fibra.

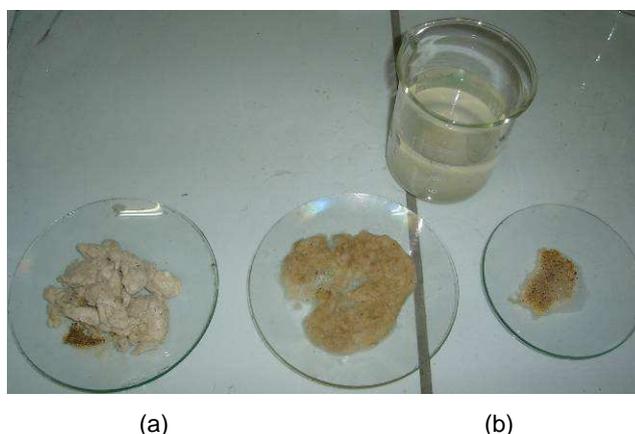


Figura 5.55 – (a) Fibra de escória na condição natural; (b) Materiais resultantes da passagem pelo equipamento de ultrassom.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo se apresentam algumas considerações gerais a respeito do programa experimental desenvolvido na presente pesquisa. Também são descritas uma série de conclusões específicas que sumarizam os principais resultados obtidos, em relação a cada aspecto analisado: caracterização da fibra e do compósito; análise de parâmetros de produção e estudo do efeito das variáveis de estudo. Essas subsidiam a análise do potencial de utilização da fibra de escória de alto-forno, principal objetivo do trabalho. No fim do capítulo são listadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O desenvolvimento sustentável tem provocado mudanças no processo de gestão dos resíduos gerados por diferentes tipos de indústrias. A busca pelo fechamento dos ciclos produtivos, através da reciclagem e do aproveitamento de subprodutos como matéria-prima para o desenvolvimento de novos materiais, é uma realidade que se impõe. Neste contexto, a construção civil ocupa papel de destaque como indústria recicladora, pois sua cadeia produtiva, dividida em várias etapas, é capaz de absorver diferentes tipos de subprodutos.

Materiais como a escória de alto-forno, produto gerado em elevada quantidade pela indústria siderúrgica, costumam ter baixo aproveitamento, apresentando aplicação limitada. Esse resíduo hoje é encaminhado quase que exclusivamente às indústrias cimenteiras, cuja capacidade de aproveitamento é inferior à geração da escória, fazendo com que uma parte do material seja destinada a aterros industriais. Recentemente uma fibra reciclada a partir da escória de alto-forno começou a ser produzida e estudada, com o objetivo de avaliar se a mesma poderia se constituir numa alternativa viável para substituição dos asbestos na fabricação de fibrocimento. O reforço de matrizes cimentícias é uma forma de aplicação antiga, sendo o uso de fibras recicladas, com menor custo ambiental, uma nova vertente de desenvolvimento fundamental nos tempos atuais.

A revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2 mostrou-se eficaz ao contribuir para ampliar os conhecimentos a respeito da produção de compósitos de matrizes cimentícias com adição de fibras, além de possibilitar a fixação de conceitos empregados na pesquisa. O Capítulo 3, específico sobre a fibra de escória, foi importante para melhorar o entendimento do processo produtivo que originou o produto, contribuindo para adquirir informações relevantes sobre suas características e propriedades.

Já o desenvolvimento do programa experimental permitiu que se atingissem os objetivos propostos para a pesquisa. Com relação aos ensaios, acredita-se que o conjunto de métodos empregado possibilitou a coleta de subsídios importante acerca do estudo dos efeitos derivados da adição da fibra de escória como reforço em compósitos de argamassa.

6.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

A seguir são relatadas as conclusões específicas derivadas dos ensaios realizados no programa experimental. Salieta-se que algumas destas considerações são válidas apenas para a fibra de escória de alto-forno e as matrizes cimentícias ensaiadas neste trabalho. Eventuais generalizações destas tendências devem ser efetuadas com a devida cautela.

6.2.1 Em relação à caracterização da fibra

Os resultados dos ensaios para caracterização da fibra ampliaram o conhecimento sobre o material e contribuíram para que se pudessem analisar os efeitos de sua aplicação como reforço em matrizes cimentícias.

Por se tratar do estudo de uma microfibras, a análise microscópica do material mostrou-se essencial, possibilitando a visualização da geometria das fibras e do *shot*, além da verificação dos diâmetros e comprimentos variados. Com auxílio do EDS se pode confirmar a constituição da fibra, confirmando sua afinidade com a matriz cimentícia.

Com o ensaio de Fluorescência de Raios X foi possível identificar a composição química da fibra, marcada pela presença de óxidos de cálcio (CaO) e de magnésio (MgO) em elevadas quantidades. De acordo com a fórmula usada para checar a estabilidade das escórias, constatou-se que o material utilizado apresenta uma composição com muito magnésio, que pode ser considerada instável.

Através da Difração de Raios X observou-se que a fibra e o *shot* apresentam estrutura amorfa, sem picos cristalinos. Também se verificou que a matriz cimentícia reforçada com adição da fibra de escória apresentou os mesmos picos cristalinos da matriz sem reforço, indicando que não houve reação química entre os materiais.

O ensaio de Le Chatelier possibilitou avaliar a interação entre a matriz cimentícia e a fibra de escória, verificando a influência exercida pela presença dos elevados teores de CaO e MgO. No procedimento de cura a quente se verificou que a pasta confeccionada com adição do shot sofreu expansão, caracterizada pelo afastamento das hastes das agulhas. O fenômeno foi também analisado por meio de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) e as imagens obtidas indicaram a formação de etringita, cristal compatível com a natureza química do shot e que pode ser responsável pela capacidade de expansão da pasta, aspecto que deve ser mais bem estudado. Até lá se recomenda que se peneire o material para retirar as partículas de shot.

6.2.2 Em relação à caracterização do compósito

A observação das misturas frescas, das superfícies de fratura e das imagens da microestrutura dos compósitos obtidas no MEV possibilitou avaliar a interação existente entre a fibra de escória e a matriz cimentícia. Constatou-se que o grau de aderência das fibras à matriz é bastante baixo. De acordo com a revisão bibliográfica, tal fato era esperado, devido às dimensões reduzidas apresentadas pela fibra e à sua natureza química.

O exame das superfícies de ruptura indicou que, nos compósitos ensaiados à tração na flexão e ao impacto, as fibras, além de serem arrancadas da matriz, sofreram fraturas, indicando baixa aderência e fragilidade do material, características que podem afetar a resistência mecânica do compósito.

Outra característica observada nas misturas frescas consistiu na formação de grumos ou aglomerações de fibras nos compósitos, resultante da dificuldade de dispersão da fibra durante o preparo da mistura. Este problema pode ter ocorrido em função de diferentes causas, devendo ser considerada, em especial, a presença de resina orgânica adicionada à fibra no processo de produção. O método de mistura adotado também pode ter contribuído para as aglomerações de fibras, pois, como registrado na literatura, as fibras minerais tendem a formar grumos resistentes e pouco permeáveis à pasta, que se incrementam com o aumento do atrito derivado do processo de mistura dos materiais.

Para solucionar o problema foram experimentadas diversas técnicas desenvolvidas com o intuito de promover uma melhor dispersão das fibras (dispersão manual, moagem, aquecimento a 600 °C e aplicação de ondas de ultrassom). Porém, nenhuma das técnicas empregadas apresentou resultados adequados.

6.2.3 Em relação à influência dos parâmetros de produção do compósito

Os parâmetros considerados controláveis foram avaliados por meio de ensaios mecânicos de resistência à tração na flexão e à compressão. Com relação à dimensão máxima do agregado verificou-se que, nos compósitos produzidos com fibra dispersa manualmente, a variação do tamanho do agregado não tem influência significativa na resistência à compressão dos compósitos. A resistência à tração na flexão mostrou-se mais sensível à variação da dimensão do agregado, havendo prejuízo no desempenho com o aumento do tamanho do agregado no maior teor de adição da fibra. Os melhores resultados foram obtidos para os compósitos com menores teores de fibra, mas não se sabe se os mesmos são resultado da presença de fibras ou do uso do aditivo. A ductilidade só aumentou quando se usaram teores de fibra elevados, mas houve uma pequena redução na resistência última.

Para os corpos-de-prova produzidos com fibra dispersa de forma mecânica, os resultados indicaram que o uso de um elevado teor de adição com agregados de 2,4 mm pode ocasionar uma melhora significativa na resistência à tração, em relação ao testemunho. Essa tendência foi atribuída a uma menor tendência à aglomeração em função da redução do fator de forma da fibra, que permitiu a geração de uma matriz com menos defeitos. Essa tendência necessita, porém, ser confirmada.

Na resistência à compressão, os resultados indicaram que o método de dispersão manual gera maiores valores no menor teor de adição, levando a concluir que esta propriedade não sofre praticamente nenhuma influência da forma de preparação da fibra. Tais análises confirmaram o insucesso do método de dispersão da fibra, pois a aglomeração da fibra é comum e pode ser verificada nas imagens obtidas no MEV.

6.2.4 Em relação à influência das variáveis de estudo

A avaliação dos resultados dos ensaios de trabalhabilidade dos compósitos no estado fresco mostrou que a adição de fibras ocasiona a redução dos índices de consistência, provocando uma modificação na reologia das misturas, que ficam menos fluidas e mais consistentes, o que pode acarretar dificuldades na moldagem dos corpos-de-prova. Os compósitos produzidos com maior quantidade de fibra, bem como as placas e anéis utilizadas nos ensaios de impacto e retração restringida, necessitaram de adição de aditivo para possibilitar a realização das moldagens. O ensaio de trabalhabilidade também possibilitou identificar a ocorrência de aglomeração da fibra no estado fresco do compósito, evidenciando os problemas de interação fibra-matriz.

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão foram afetados negativamente pela aglomeração das fibras, que constituíram pontos frágeis nas matrizes cimentícias, reduzindo o desempenho mecânico dos compósitos. Na ruptura dos compósitos foram identificados sinais de arrancamento e fratura da fibra, fato que contribuiu para o desempenho mecânico insatisfatório dos compósitos. Neste sentido, o estudo de tratamentos que possibilitem a adequada dispersão da fibra de escória na matriz cimentícia torna-se extremamente importante para o desenvolvimento e utilização deste tipo de compósito. Verificou-se que ocorre uma queda na resistência à tração na flexão apresentada pelos compósitos com maiores teores de adição da fibra aos 28 dias de idade, contudo, aos 91 dias de idade, as amostras com menores teores de fibra apresentaram um acréscimo de resistência, em relação ao testemunho. A análise das curvas de tensão x deformação evidencia que a fibra de escória não modifica significativamente o comportamento do material, podendo ocasionar pequenos ganhos de resistência em teores pequenos e incrementos de tenacidade em teores elevados, tendo potencial para atuar como reforço em matrizes cimentícias, uma vez que consegue modificar o módulo de elasticidade dos compósitos.

Os resultados de resistência à compressão apresentaram a mesma tendência de comportamento aos 28 dias de idade, marcado por uma pequena queda na resistência, com exceção do menor teor de adição, que obteve um pequeno incremento na resistência. Os maiores teores, devido ao volume excessivo de fibra, foram mais prejudicados pelo problema da aglomeração da fibra, resultando em valores reduzidos de resistência. Supõe que, a partir do teor intermediário de adição a quantidade de fibra causa muita incorporação de ar e, conseqüentemente, prejuízo na resistência dos compósitos. Os gráficos de tensão x deformação na compressão não indicaram mudança de comportamento pela adição da fibra de escória nos diferentes teores estudados.

O ensaio com o equipamento de ultrassom possibilitou a identificação do módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos de argamassa com fibra de escória, sendo os resultados influenciados pela porosidade existente. A adição da fibra resultou no aumento da porosidade, o que fez com que o tempo de propagação da onda ultrassônica fosse reduzido, em alguns casos. No teor intermediário de adição, o pequeno tempo de propagação da onda proporcionou uma elevada velocidade e, conseqüentemente, um módulo de elasticidade mais elevado que o testemunho. A partir deste teor, com o aumento da porosidade, houve redução no módulo de elasticidade dos compósitos. A maior modificação no módulo de elasticidade dinâmico foi observada nos compósitos com menor adição da fibra, nos quais houve uma redução de módulo de aproximadamente 15%.

Nos ensaios de retração restringida todos os compósitos com adição da fibra mostraram desempenho claramente superior ao do testemunho. Esse foi o ensaio que indicou, de forma mais promissora, que é possível obter benefícios reais com o uso da fibra de escória de alto-forno. Ficou claro que existe potencial para aplicação da fibra com o intuito de reduzir ou prevenir a fissuração de matrizes cimentícias devido à variação das condições ambientais nas primeiras idades.

Ao contrário do verificado em outros estudos existentes na literatura com fibras curtas, as fibras de escória não conseguiram obter um bom desempenho, em termos de absorção de tensões, nos ensaios de impacto. Os resultados indicaram um desempenho insatisfatório dos compósitos, praticamente não sendo verificado incremento na resistência dos mesmos. Atribui-se tais respostas ao problema da dispersão da fibra, que permaneceram aglomeradas nas placas. A distribuição desigual da fibra na matriz faz com que hajam áreas menos reforçadas, fazendo com que a adição de fibras não seja eficiente. Ademais, o pequeno comprimento e a baixa aderência das fibras podem ter colaborado para que as mesmas sejam pouco eficientes no controle da fissuração macroscópica.

Em geral a fibra de escória de alto-forno é um material novo, que necessita ser bem caracterizado e entendido. É necessário averiguar se a expansibilidade do shot é nociva e desenvolver métodos adequados para promover uma dispersão mais adequada das fibras. O material disponível, na forma atual, não é capaz de aumentar a resistência ou ductilidade de matrizes cimentícias de forma significativa. Mas como a adição de teores até 1% não afetam negativamente o desempenho da matriz, o mesmo pode ser usado para ajudar a controlar a fissuração por retração, especialmente em argamassas, função para a qual mostrou adequada capacidade. Analisando sob o ponto de vista ambiental, fica claro que existem benefícios importantes que a utilização da fibra de escória de alto-forno pode proporcionar. Além do baixo custo econômico e de energia, no caso da substituição do amianto, a fibra de escória não oferece riscos à saúde, além de ser produzida a partir de um resíduo siderúrgico, proporcionando a ampliação da aplicabilidade deste produto cuja elevada geração representa um impacto ambiental preocupante. Acredita-se que a combinação do potencial ambiental das fibras de escória reciclada com os resultados técnicos justifica plenamente a continuidade dos estudos com a mesma.

6.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando o interesse em adicionar a fibra de escória de alto-forno como reforço em matrizes cimentícias faz-se necessária a continuidade dos estudos com esse material. A

seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros com a fibra de escória reciclada:

- desenvolvimento de estudos adicionais visando obter um método que permita promover uma melhor dispersão da fibra. Recomenda-se, em particular, que se investigue a possibilidade de produzir as fibras sem a camada de adesivo à base de silicatos, necessária para criar as mantas de lã mineral, mas que favorece a aglomeração dos filamentos de fibra.
- realização de estudos sobre a adição de material químico dispersante nas fibras, buscando a produção de compósitos mais homogêneos e com obtenção de incremento no seu desempenho mecânico;
- análise do sistema de produção dos compósitos utilizando a técnica de extrusão, de forma a verificar se é possível fabricar filamentos mais homogêneos e fáceis de dispersar, permitindo que se empreguem teores de fibra mais elevados;
- realização de ensaios em alta temperatura para avaliar o potencial de isolamento térmico dos compósitos produzidos com a fibra de escória de alto-forno;
- aplicação dos compósitos com fibra de escória de alto-forno como argamassa de revestimento, buscando verificar o potencial de atuação das fibras no controle da fissuração provocada por retração.

REFERÊNCIAS

AAHTO. **Standard practice for estimating the crack tendency of concrete.** AASHTO DESIGNATION. Pp 34-89.

ACCETTI, K. M., PINHEIRO, L.M. **Tipos de Fibras e Propriedades do Concreto com Fibras.** In: 42º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais:** CBC2000. Fortaleza, IBRACON, 2000.

AITCIN, P. C.; NEVILLE, A. M.; ACKER, P. **Integrated view of shrinkage deformation.** Concrete International, pp. 35-41, Sep., 1997.

ALVES, A.K.; ANDRADE, P.A.; BERUTTI, F.A.; BERGMANN, C.P. **Caracterização de nanofibras de zircônia obtidas por electrospinning.** In: 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 2006.

ALVES, J. O. **Processo de reciclagem da escória de aciaria e do resíduo de corte de granito visando a produção de lã mineral.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro preto. Rede Temática em Engenharia dos Materiais. Ouro Preto, MG. 2008. 116p.

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE SÃO PAULO (ALESP). **Lei N 12.684/ 07** - Proíbe o uso, no Estado de São Paulo de produtos, materiais ou artefatos que contenham quaisquer tipos de amianto ou asbesto ou outros minerais que, acidentalmente, tenham fibras de amianto na sua composição. Disponível em:<<http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2007/lei%20n.12.684,%20de%2026.07.2007.htm>> Acesso em: 22 de Jan. de 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS – Agregados – Determinação da composição granulométrica – **NBR NM248.** Rio de Janeiro, 2003.

____ Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão – **NBR 13279.** Rio de Janeiro, 2005.

____ Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência-padrão – **NBR 13276.** Rio de Janeiro, 2005.

____ Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de *Le Chatelier* – **NBR 11582.** Rio de Janeiro, 1991.

____ Placas Cerâmicas para revestimento – especificação e métodos de ensaio – **NBR 13818.** Rio de Janeiro, 1997.

____ Resíduo sólidos – Classificação – **NBR 10004.** Rio de Janeiro, 2004.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil.** In: IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil - Materiais Reciclados e suas Aplicações. **Anais.** São Paulo: 2001.

BALAGURU, P. **Contribution of fibers to crack reduction of cement composites during the initial and final setting period.** In: ACI Materials Journal. American Concrete Institute. Maio /Junho, 1994.

BARTOS, P. J. M. **Workability of special fresh concretes.** Special Concretes: workability and mixing. RILEM, LONDON, p. 3-13, 1994.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites.** Elsevier Applied Science. London and New York, 1990.

BERNANDER, S. & EMBORG, M. **Risk of cracking in massive concrete structures – New developments and experiences.** “Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. RILEM Technical Committee 119, Avoidance of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, 348pp, 1998.

BERNARDI, S. T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida Kevlar.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003. 164p.

BETTERMAN, L. R.; OUYANG, C.; SHAN, S. P. **Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar.** 1995. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/compstruct/>>. Acesso em: 12 de Julho de 2009.

BRANDT, A. M. **Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering.** In: Composites Structures 86, 2008. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/compstruct/>>. Acesso em: 12 de Julho de 2009.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais, Uma Introdução;** 5^a.ed. Rio de Janeiro, 2006.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. **A massa unitária como parâmetro de análise das características das argamassas.** In: Ambiente Construído, São Paulo, V. 1, N. 2, pág. 37-44, Jul/Dez, 1997.

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

CECCATO, M. R.; NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A. D. **Estudo do controle da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço.** In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções – VI Congresso de Controle da Qualidade, Porto Alegre, 1997. **Anais:** Porto Alegre: LEME/CPGEC, 1997. p. 539-546.

CENTRO MULTIDISCIPLINAR PARA O DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS CERÂMICOS – **CMDMC**. Disponível em: <http://www.cmdmc.com.br/cg/BRA/industria.html>. Acesso em: 29 de Junho de 2009.

COSTA, F. L.; SCHMIDT, M. V.; GLEIZE, P. J. P.; GOMEZ; L. A. **Metodologia para verificação da ocorrência de fissuras em argamassas cimentícias**. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. *International Symposium on Mortars Technology. Anais*. Florianópolis: 23 a 25 de maio de 2005.

COUTTS, R. S. P. **A review of Australian research into natural fibre cement composites**. In: *Cement Concrete* 27, p.518–26. 2005. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/>>. Acesso em: 12 de Julho de 2009.

DE LARRAD, F. **Concrete mixture proportioning**. In: *Modern Concrete Technology Series*. London, 1999.

FATTUHI; CLARK. **Cement-based materials containing shredded scrap truck tire rubber**. *Construction and Building Materials*, Guildford, v.10, n.4, p.229-236, 1996.

FERRARIS, C. F. **Concrete mixing methods and concrete mixers: state of the art**. *Journal of research of the national institute of standards and technology*. v. 106, n. 2, 2001.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras**. In: *Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON. Ed.: Geral Cechella Isaia. v. 2. cap. 39. 2005. p. 1195-1225.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras de aço**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000. Boletim Técnico.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO – **FAPESP**. Disponível em: < www.fapesp.br>. Acesso em: 10 de dez. 2008.

GARCEZ, E. O. **Análise Teórico-Experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005. 113p.

GARCEZ, E. O.; CAETANOL. F.; GRAEFF, A. G.; LEMPKE T. K.; SILVA FILHO L. C. P.; RIOS R. D. **Modelagem dos efeitos de impacto em concretos reforçados com fibras**. In: II Seminário de Patologia das Edificações: Novos materiais e tecnologias emergentes. Porto Alegre: 18 e 19 de Novembro de 2004.

GOMES, C. E. M. **Emprego de fibras fabricadas a partir de escória de alto-forno para reforço de matrizes cimentícias inorgânicas, como cimento, argamassa, gesso e concreto**. Pedido de patente: PI 0601902-1 A. 2007.

GOMES, C. E. M. **Propriedades da pasta de cimento portland com adições do copolímero Va/VeoVa e fibras de poliamida – estudo da interface fibra-matriz**. Tese (Doutorado). Interunidades ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005. 200p.

HANNANT, D. J. **Fiber Cements and Fiber Concretes**. Guildford, United Kingdom: John Wiley & Sons, 1978.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ARTIGOS REFRAATÓRIOS – **IBAR**. Disponível em: <<http://www.ibar.com.br/animacoes>>. Acesso em: 24 de Jan. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (IBS). **Relatório de Sustentabilidade de 2007**. Disponível em: <<http://www.ibs.org.br>>. Acesso em: 10 de dez. 2008.

JOHNSTON, C. D. **Fiber matrix compatibility consideration in fiber reinforced cements and concretes**. Special Publication.1997. In: ACI. Disponível em: <<http://www.concrete.org/>>. Acesso em: 27 de Julho de 2009.

JOHN, V. M. **Módulo de elasticidade: fundamentos, importância, e formas de medir**. In: I Workshop CONSITRA - Consórcio Setorial para Inovação em Tecnologia de Revestimentos de Argamassa. São Paulo: CONSITRA, 23 de setembro de 2005. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/sala_de_imprensa/noticias/imagens/consitra/consitra_modulo_elasticidade.pdf> Acesso em: 19 de janeiro de 2009.

JOHN, V. M. **Cimentos e escória ativada com silicatos de sódio**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995. 200p.

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

JOHN, V. M.; ÂNGULO, S. C. **Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos**. In: Utilização de resíduos na construção habitacional. Coletânea Habitar-Programa de Tecnologia da Habitação. Ed.: Janaíde Cavalcante Rocha; Vanderley M. John. v. 2, 2003, p. 9-71.

MARQUES, A. C.; TRIGO, A. P. M.; AKASAKI, J. L. **Argamassas compostas com fibras de borrachas: microestrutura e propriedades mecânicas**. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto. p. 183-194. **Anais: CBC2004**. IBRACON, 2004.

MA Y., ZHU, B., TAN, M. **Properties of ceramic fiber reinforced cement composites**. In: Cement and Concrete Research 35. p. 296-300. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 15 de Março de 2009.

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

NUNES, N. L. **Contribuição para aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006, 276p.

NUNES, N. L.; AGOPYAN, V. **A influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998. Boletim técnico.

NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A. D. **Retração de concreto de cimento portland**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP (BT/PCC/452). São Paulo, 2007.

OSTERBERG, T. **Measurement of properties of fresh high performance concrete and effects of the mixing process**. RILEM, London, p. 17-30, 1994.

OZYURT, N.; WOO, L. Y., MU B.; SHAH, S. P. S; MASON T. O. **Detection of fiber dispersion in fresh and hardened cement composites**. *Advances in Concrete Through Science and Engineering, An International Symposium During the RILEM Spring Meeting*, Northwestern University, Evanston, Ill., 2004.

PENÑA, M. R. G.; HELENE, P. R. L. **Estudo de fissuração associada à retração em argamassas para reparo em estruturas de concreto**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP (BT/PCC/406). São Paulo, 2005.

PICANÇO, M. S.; GHAVAMI, K. **Comportamento à compressão de argamassas reforçadas com fibras vegetais da Amazônia**. In: Revista Escola Minas. Ouro Preto: Jan./Mar. 2008. v.61, n.1.

PINHO, F.; BORGES, S. **Otimização via algoritmo genético do processo construtivo de estruturas de concreto submetidos à retração restringida tendo em vista a fissuração nas primeiras idades**. Dissertação (Mestrado). 97p. COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999. 189p.

RAMAKRISHNA, G.; SUNDARARAJAN, T. **Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: a comparative study**. In: *Cement & Concrete Composites* 27, 2005. p 547-553. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/cemconcomp>>/. Acesso em: 28 de Maio de 2009.

RAMAKRISHNAN, V.; ZELLERS, R. PATNAIK, A. K. **Plastic shrinkage reduction potential of a new high tenacity monofilament polypropylene fiber**. In: Malhotra VM, editor. 9th CANMET/ACI international conference on recent advances in concrete technology, 2007, ACI SP-243. p. 49–62. Disponível em: <<http://www.concrete.org/>>. Acesso em: 14 de Maio de 2009.

RIZZON, A. C.; RUIVER, C. A; SOUZA, C. H. C. S. MASUERO, A. B. **Concreto reforçado com fibras recicladas de garrafas PET: as propriedades mecânicas e a questão ambiental**. In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais: CBC2008**. São Paulo: Setembro/ 2008.

ROCHA, Janaíde Cavalcante; CHERIAF, Malik. **Aproveitamento de resíduos na construção**. In: Utilização de resíduos na construção habitacional. Coletânea Habitar-Programa de Tecnologia da Habitação. Ed.: Janaíde Cavalcante Rocha; Vanderley M. John, v. 3, 2003, p. 73-93.

SALES, A. G. T. C. **Retração, fluência e fratura em compósitos cimentícios reforçados com poupa de bambu.** Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2006, 273p.

SANJÚAN, M. A.; MORAGUES, A. **Polypropylene-fibre-reinforced mortar mixes: optimization to control plastic shrinkage.** In: Composites Science and Technology, p. 655-660, 1997.

SANTANA FILHO, E.; FAVALESSA, K.; BORLINI, M. C.; VIEIRA E. A. ; PEIXOTO, R. A. F.; OLIVEIRA, J. R.. **Estudo da condutibilidade térmica de resíduo de manta cerâmica e da viabilidade técnica de sua utilização na fabricação de argamassa.** In: 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. **Anais:** 18º CBECiMat - 2008. PORTO DE GALINHAS, 2008.

SAVASTANO Jr., H. **Sistemas de cobertura para construções de baixo custo: uso de fibras vegetais e de outros resíduos agroindustriais.** In: Utilização de resíduos na construção habitacional. Coletânea Habitar-Programa de Tecnologia da Habitação. Ed.: Janaíde Cavalcante Rocha; Vanderley M. John, v. 4, 2003, p. 93-123.

SAVASTANO Jr., H. **Zona de transição entre fibras e pasta de cimento Portland: caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito.** Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992. 249 p.

SAVASTANO, Jr. H.; DANTAS, A. S.; AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras: correlação entre a zona de transição fibra-matriz e as propriedades mecânicas.** São Paulo: Instituto de pesquisas tecnológicas: PINI, 1994. 55p.

SAVASTANO Jr., H.; SANTOS, S. **Uso de resíduos de fibra vegetal em construção.** In: Revista ComCiência. São Paulo, 2008.

SCHMIDT, M. V. ; GLEIZE, P. J. ; GÓMEZ, L. A. . **Metodologia para avaliação da ocorrência de fissuração em argamassas.** In: V SBTA - Simpósio Brasileiro de Tecnologia em Argamassas, 2003, São Paulo. **Anais:** V Simpósio Brasileiro de Tecnologia em Argamassas, 2003. v. 1. p. 225-231.

SEE, H. T.; ATTIOGBE, E. K.; MILTENBERGER, M. A. **Shrinkage Cracking Characteristics of Concrete Using Ring Specimens.** p – 239 -245. ACI Materials Journal/May-June, 2003.

SHEN, B.; HUBLER, M.; PAULINO, G.H.; STRUBLE, L. J. **Functionally-graded fiber-reinforced cement composite: Processing, microstructure and properties.** In: Concrete & Composites 30, p. 663-673. 2008. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/cemconcomp/>>. Acesso em: 07 de Maio de 2009.

SILVA, F. A. **Tenacidade de materiais compósitos não convencionais.** Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ. 2004. 234p.

SILVA, J. G. **Análise do ciclo de vida de tijolos prensados de escória de alto-forno.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Espírito Santo, 2005.

SILVA, R. P. **Argamassas com adição de fibras de polipropileno – estudo do comportamento reológico e mecânico**. São Paulo. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2006.

SILVA, R. P.; BARROS, M. M. S. B.; JOHN, V. M. **Influência do método de mistura na produção de argamassas com fibras**. In: VII Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2007, Recife (PE). **Anais**: VII SBTA, 2007.

SUCATAS. Disponível em: <<http://www.sucatas.com.br/metal>>. Acesso em: 24 de Jan. 2009.

TANESI, J. A. **Influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração**. Dissertação (Mestrado). 132 p. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

TANESI, J.; TORNERI, P.; FIGUEIREDO, A. D. **A influência das fibras de polipropileno na fissuração por retração**. In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções – VI Congresso de Controle da Qualidade, Porto Alegre, 1997. **Anais**: Porto Alegre: LEME/CPGEC, 1997. p. 273-287.

TEIXEIRA, M. A. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. São Paulo, 2000. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, 2000. 135p.

TOUTANJI, H. A. **The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates**. Cement and Concrete Composites, Barking, v.18, n.2, p.135-139, 1996.

UNIFRAX BRASIL Ltda. Disponível em: <<http://www.unifrax.com.br>>. Acesso em: 02 de Dez. de 2008.

VELTEN, R. Z; SANT`ANA, A. P.; LIMA, D. C. **Caracterização mecânica de misturas solo, escória de alto-forno granulada, moída para aplicações em estradas florestais**. Revista Árvore, ano/v. 30, n. 002. Viscosa. Brasil, 2006.

YUAN, M. C. Ações institucionais da Siderurgia Brasileira para disseminação do uso das escórias de aciaria. Biblioteca Técnica, ArcelorMittal. Disponível em: <http://www.arcelormittal.com.br/>. Acesso em: 29 de Junho de 2009.

ANEXO

Planilha para análise da influencia da preparação da fibra

TEOR (%)	IDADE	AGREGADO (mm)	DISPERSÃO	TRAÇÃO (MPa)	COMPRESSÃO (MPa)
TESTEMUNHO	7	2,4	X	3,47	16,22
TESTEMUNHO	7	2,4	X	3,75	21,00
TESTEMUNHO	7	2,4	X	3,75	30,34
TESTEMUNHO	7	2,4	X		25,72
TESTEMUNHO	7	2,4	X		25,25
TESTEMUNHO	7	2,4	X		29,44
TESTEMUNHO	14	2,4	X	3,94	31,38
TESTEMUNHO	14	2,4	X	3,94	30,50
TESTEMUNHO	14	2,4	X	4,50	17,16
TESTEMUNHO	14	2,4	X		20,91
TESTEMUNHO	14	2,4	X		25,44
TESTEMUNHO	14	2,4	X		28,72
TESTEMUNHO	28	2,4	X	3,59	32,38
TESTEMUNHO	28	2,4	X	4,59	35,00
TESTEMUNHO	28	2,4	X	4,41	26,13
TESTEMUNHO	28	2,4	X		32,59
TESTEMUNHO	28	2,4	X		31,25
TESTEMUNHO	28	2,4	X		24,66
0,3	7	2,4	MANUAL	3,94	28,97
0,3	7	2,4	MANUAL	3,47	26,97
0,3	7	2,4	MANUAL	3,75	19,66
0,3	7	2,4	MANUAL		17,53
0,3	7	2,4	MANUAL		26,13
0,3	7	2,4	MANUAL		27,91
0,3	14	2,4	MANUAL	4,03	25,88
0,3	14	2,4	MANUAL	3,75	27,09
0,3	14	2,4	MANUAL	3,94	28,94
0,3	14	2,4	MANUAL		29,81
0,3	14	2,4	MANUAL		28,03
0,3	14	2,4	MANUAL		27,47
0,3	28	2,4	MANUAL	2,91	31,63
0,3	28	2,4	MANUAL	3,84	32,19
0,3	28	2,4	MANUAL	3,28	29,69
0,3	28	2,4	MANUAL		26,31
0,3	28	2,4	MANUAL		30,25
0,3	28	2,4	MANUAL		23,06
3	7	2,4	MANUAL	3,94	13,16
3	7	2,4	MANUAL	4,03	20,06
3	7	2,4	MANUAL	2,81	16,22
3	7	2,4	MANUAL		13,53
3	7	2,4	MANUAL		18,72
3	7	2,4	MANUAL		21,38
3	14	2,4	MANUAL	3,19	21,66
3	14	2,4	MANUAL	4,13	22,81
3	14	2,4	MANUAL	4,59	9,28
3	14	2,4	MANUAL		12,16
3	14	2,4	MANUAL		18,28
3	14	2,4	MANUAL		12,13

TEOR (%)	IDADE	AGREGADO (mm)	DISPERSÃO	TRAÇÃO (MPa)	COMPRESSÃO (MPa)
3	28	2,4	MANUAL	3,47	20,44
3	28	2,4	MANUAL	4,41	27,28
3	28	2,4	MANUAL	3,84	16,22
3	28	2,4	MANUAL		19,91
3	28	2,4	MANUAL		19,75
3	28	2,4	MANUAL		21,84
0,3	7	2,4	MECANICO	3,47	23,31
0,3	7	2,4	MECANICO	4,03	19,50
0,3	7	2,4	MECANICO	3,56	17,72
0,3	7	2,4	MECANICO		17,41
0,3	7	2,4	MECANICO		24,13
0,3	7	2,4	MECANICO		22,91
0,3	14	2,4	MECANICO	2,78	26,54
0,3	14	2,4	MECANICO	2,89	27,39
0,3	14	2,4	MECANICO	3,04	28,79
0,3	14	2,4	MECANICO		27,64
0,3	14	2,4	MECANICO		28,26
0,3	14	2,4	MECANICO		27,59
0,3	28	2,4	MECANICO	2,89	28,96
0,3	28	2,4	MECANICO	3,39	25,54
0,3	28	2,4	MECANICO	2,72	29,79
0,3	28	2,4	MECANICO		25,75
0,3	28	2,4	MECANICO		26,70
0,3	28	2,4	MECANICO		X
3	7	2,4	MECANICO	3,94	26,84
3	7	2,4	MECANICO	3,85	29,84
3	7	2,4	MECANICO	3,56	22,47
3	7	2,4	MECANICO		23,13
3	7	2,4	MECANICO		21,13
3	7	2,4	MECANICO		25,03
3	14	2,4	MECANICO	4,29	25,65
3	14	2,4	MECANICO	3,98	24,48
3	14	2,4	MECANICO	4,63	27,27
3	14	2,4	MECANICO		23,95
3	14	2,4	MECANICO		27,57
3	14	2,4	MECANICO		28,88
3	28	2,4	MECANICO	5,14	27,59
3	28	2,4	MECANICO	4,54	26,69
3	28	2,4	MECANICO	5,51	26,63
3	28	2,4	MECANICO		27,63
3	28	2,4	MECANICO		28,69
3	28	2,4	MECANICO		28,38

Planilha para análise da influencia da dimensão agregado (2,4 x 4,8)

TEOR (%)	IDADE	AGREGADO (mm)	DISPERSÃO	TRAÇÃO (MPa)	COMPRESSÃO (MPa)
TESTEMUNHO	7	2,4	X	3,47	16,22
TESTEMUNHO	7	2,4	X	3,75	21,00
TESTEMUNHO	7	2,4	X	3,75	30,34
TESTEMUNHO	7	2,4	X		25,72
TESTEMUNHO	7	2,4	X		25,25
TESTEMUNHO	7	2,4	X		29,44
TESTEMUNHO	14	2,4	X	3,94	31,38
TESTEMUNHO	14	2,4	X	3,94	30,50
TESTEMUNHO	14	2,4	X	4,50	17,16
TESTEMUNHO	14	2,4	X		20,91
TESTEMUNHO	14	2,4	X		25,44
TESTEMUNHO	14	2,4	X		28,72
TESTEMUNHO	28	2,4	X	3,59	32,38
TESTEMUNHO	28	2,4	X	4,59	35,00
TESTEMUNHO	28	2,4	X	4,41	26,13
TESTEMUNHO	28	2,4	X		32,59
TESTEMUNHO	28	2,4	X		31,25
TESTEMUNHO	28	2,4	X		24,66
0,3	7	2,4	MANUAL	3,94	28,97
0,3	7	2,4	MANUAL	3,47	26,97
0,3	7	2,4	MANUAL	3,75	19,66
0,3	7	2,4	MANUAL		17,53
0,3	7	2,4	MANUAL		26,13
0,3	7	2,4	MANUAL		27,91
0,3	14	2,4	MANUAL	4,03	25,88
0,3	14	2,4	MANUAL	3,75	27,09
0,3	14	2,4	MANUAL	3,94	28,94
0,3	14	2,4	MANUAL		29,81
0,3	14	2,4	MANUAL		28,03
0,3	14	2,4	MANUAL		27,47
0,3	28	2,4	MANUAL	2,91	31,63
0,3	28	2,4	MANUAL	3,84	32,19
0,3	28	2,4	MANUAL	3,28	29,69
0,3	28	2,4	MANUAL		26,31
0,3	28	2,4	MANUAL		30,25
0,3	28	2,4	MANUAL		23,06
3	7	2,4	MANUAL	3,94	13,16
3	7	2,4	MANUAL	4,03	20,06
3	7	2,4	MANUAL	2,81	16,22
3	7	2,4	MANUAL		13,53
3	7	2,4	MANUAL		18,72
3	7	2,4	MANUAL		21,38
3	14	2,4	MANUAL	3,19	21,66
3	14	2,4	MANUAL	4,13	22,81
3	14	2,4	MANUAL	4,59	9,28
3	14	2,4	MANUAL		12,16
3	14	2,4	MANUAL		18,28
3	14	2,4	MANUAL		12,13
3	28	2,4	MANUAL	3,47	20,44
3	28	2,4	MANUAL	4,41	27,28
3	28	2,4	MANUAL	3,84	16,22
3	28	2,4	MANUAL		19,91
3	28	2,4	MANUAL		19,75
3	28	2,4	MANUAL		21,84

TEOR (%)	IDADE	AGREGADO (mm)	DISPERSÃO	TRAÇÃO (MPa)	COMPRESSÃO (MPa)
TESTEMUNHO	7	4,8	MANUAL	4,20	28,06
TESTEMUNHO	7	4,8	MANUAL	4,65	25
TESTEMUNHO	7	4,8	MANUAL	4,13	26,41
TESTEMUNHO	7	4,8	MANUAL		26,44
TESTEMUNHO	7	4,8	MANUAL		27,03
TESTEMUNHO	7	4,8	MANUAL		28,81
TESTEMUNHO	14	4,8	MANUAL	4,39	31,66
TESTEMUNHO	14	4,8	MANUAL	4,91	29,75
TESTEMUNHO	14	4,8	MANUAL	4,54	24,13
TESTEMUNHO	14	4,8	MANUAL		25,19
TESTEMUNHO	14	4,8	MANUAL		30,88
TESTEMUNHO	14	4,8	MANUAL		X
TESTEMUNHO	28	4,8	MANUAL	5,85	28,09
TESTEMUNHO	28	4,8	MANUAL	4,76	27,53
TESTEMUNHO	28	4,8	MANUAL	4,95	29,13
TESTEMUNHO	28	4,8	MANUAL		27,53
TESTEMUNHO	28	4,8	MANUAL		32,44
TESTEMUNHO	28	4,8	MANUAL		29,97
0,3	7	4,8	MANUAL	5,55	25,09
0,3	7	4,8	MANUAL	4,84	19,96
0,3	7	4,8	MANUAL	5,59	24,66
0,3	7	4,8	MANUAL		22,00
0,3	7	4,8	MANUAL		20,09
0,3	7	4,8	MANUAL		19,91
0,3	14	4,8	MANUAL	5,66	26,66
0,3	14	4,8	MANUAL	4,84	25,31
0,3	14	4,8	MANUAL	5,1	33,03
0,3	14	4,8	MANUAL		19,81
0,3	14	4,8	MANUAL		30,53
0,3	14	4,8	MANUAL		25,84
0,3	28	4,8	MANUAL	5,1	27,59
0,3	28	4,8	MANUAL	4,43	31,59
0,3	28	4,8	MANUAL	5,25	31,13
0,3	28	4,8	MANUAL		33,13
0,3	28	4,8	MANUAL		31,84
0,3	28	4,8	MANUAL		34,09
3	7	4,8	MANUAL	3,09	14,96
3	7	4,8	MANUAL	2,72	12,78
3	7	4,8	MANUAL	3,28	15,18
3	7	4,8	MANUAL		16,43
3	7	4,8	MANUAL		11,15
3	7	4,8	MANUAL		15,71
3	14	4,8	MANUAL	3,00	13,15
3	14	4,8	MANUAL	3,47	17,53
3	14	4,8	MANUAL	2,91	15,78
3	14	4,8	MANUAL		16,46
3	14	4,8	MANUAL		17,65
3	14	4,8	MANUAL		18,03
3	28	4,8	MANUAL	3,66	16,28
3	28	4,8	MANUAL	3,84	18,69
3	28	4,8	MANUAL	3,84	14,46
3	28	4,8	MANUAL		14,16
3	28	4,8	MANUAL		15,81
3	28	4,8	MANUAL		17,03

Planilha para análise da influencia da dimensão agregado (1,2 x 2,4)

TEOR (%)	IDADE	AGREGADO (mm)	DISPERSÃO	TRAÇÃO (MPa)	COMPRESSÃO (MPa)
TESTEMUNHO	7	1,2	X	3,26	20,59
TESTEMUNHO	7	1,2	X	3,79	23,16
TESTEMUNHO	7	1,2	X	3,68	27,53
TESTEMUNHO	7	1,2	X		24,34
TESTEMUNHO	7	1,2	X		27,56
TESTEMUNHO	7	1,2	X		26,59
TESTEMUNHO	14	1,2	X	4,22	27,47
TESTEMUNHO	14	1,2	X	4,13	31,44
TESTEMUNHO	14	1,2	X	4,31	22,94
TESTEMUNHO	14	1,2	X		25,34
TESTEMUNHO	14	1,2	X		24,00
TESTEMUNHO	14	1,2	X		23,84
TESTEMUNHO	28	1,2	X	4,41	23,63
TESTEMUNHO	28	1,2	X	4,13	24,47
TESTEMUNHO	28	1,2	X	4,22	21,88
TESTEMUNHO	28	1,2	X		20,94
TESTEMUNHO	28	1,2	X		29,94
TESTEMUNHO	28	1,2	X		29,34
0,3	7	1,2	MECANICO	2,78	25,34
0,3	7	1,2	MECANICO	3,94	25,34
0,3	7	1,2	MECANICO	3,94	20,97
0,3	7	1,2	MECANICO		20,78
0,3	7	1,2	MECANICO		21,22
0,3	7	1,2	MECANICO		19,16
0,3	14	1,2	MECANICO	3,28	20,94
0,3	14	1,2	MECANICO	3,47	23,31
0,3	14	1,2	MECANICO	3,00	29,09
0,3	14	1,2	MECANICO		14,66
0,3	14	1,2	MECANICO		21,00
0,3	14	1,2	MECANICO		15,22
0,3	28	1,2	MECANICO	3,09	25,25
0,3	28	1,2	MECANICO	2,81	X
0,3	28	1,2	MECANICO	2,91	19,81
0,3	28	1,2	MECANICO		23,03
0,3	28	1,2	MECANICO		25,16
0,3	28	1,2	MECANICO		25,81
3	7	1,2	MECANICO	3,19	20,00
3	7	1,2	MECANICO	3,00	20,50
3	7	1,2	MECANICO	2,72	12,59
3	7	1,2	MECANICO		15,53
3	7	1,2	MECANICO		21,59
3	7	1,2	MECANICO		17,63
3	14	1,2	MECANICO	3,47	17,50
3	14	1,2	MECANICO	3,94	17,13
3	14	1,2	MECANICO	2,81	18,56
3	14	1,2	MECANICO		18,72
3	14	1,2	MECANICO		14,66
3	14	1,2	MECANICO		X
3	28	1,2	MECANICO	3,84	18,59
3	28	1,2	MECANICO	4,01	17,91
3	28	1,2	MECANICO	4,31	19,59
3	28	1,2	MECANICO		15,78
3	28	1,2	MECANICO		15,63
3	28	1,2	MECANICO		15,72

TEOR (%)	IDADE	AGREGADO (mm)	DISPERSÃO	TRAÇÃO (MPa)	COMPRESSÃO (MPa)
TESTEMUNHO	7	2,4	X	3,47	16,22
TESTEMUNHO	7	2,4	X	3,75	21,00
TESTEMUNHO	7	2,4	X	3,75	30,34
TESTEMUNHO	7	2,4	X		25,72
TESTEMUNHO	7	2,4	X		25,25
TESTEMUNHO	7	2,4	X		29,44
TESTEMUNHO	14	2,4	X	3,94	31,38
TESTEMUNHO	14	2,4	X	3,94	30,50
TESTEMUNHO	14	2,4	X	4,50	17,16
TESTEMUNHO	14	2,4	X		20,91
TESTEMUNHO	14	2,4	X		25,44
TESTEMUNHO	14	2,4	X		28,72
TESTEMUNHO	28	2,4	X	3,59	32,38
TESTEMUNHO	28	2,4	X	4,59	35,00
TESTEMUNHO	28	2,4	X	4,41	26,13
TESTEMUNHO	28	2,4	X		32,59
TESTEMUNHO	28	2,4	X		31,25
TESTEMUNHO	28	2,4	X		24,66
0,3	7	2,4	MECANICO	3,47	23,31
0,3	7	2,4	MECANICO	4,03	19,50
0,3	7	2,4	MECANICO	3,56	17,72
0,3	7	2,4	MECANICO		17,41
0,3	7	2,4	MECANICO		24,13
0,3	7	2,4	MECANICO		22,91
0,3	14	2,4	MECANICO	2,78	26,54
0,3	14	2,4	MECANICO	2,89	27,39
0,3	14	2,4	MECANICO	3,04	28,79
0,3	14	2,4	MECANICO		27,64
0,3	14	2,4	MECANICO		28,26
0,3	14	2,4	MECANICO		27,59
0,3	28	2,4	MECANICO	2,89	28,96
0,3	28	2,4	MECANICO	3,39	25,54
0,3	28	2,4	MECANICO	2,72	29,79
0,3	28	2,4	MECANICO		25,75
0,3	28	2,4	MECANICO		26,70
0,3	28	2,4	MECANICO		X
3	7	2,4	MECANICO	3,94	26,84
3	7	2,4	MECANICO	3,85	29,84
3	7	2,4	MECANICO	3,56	22,47
3	7	2,4	MECANICO		23,13
3	7	2,4	MECANICO		21,13
3	7	2,4	MECANICO		25,03
3	14	2,4	MECANICO	4,29	25,65
3	14	2,4	MECANICO	3,98	24,48
3	14	2,4	MECANICO	4,63	27,27
3	14	2,4	MECANICO		23,95
3	14	2,4	MECANICO		27,57
3	14	2,4	MECANICO		28,88
3	28	2,4	MECANICO	5,14	27,59
3	28	2,4	MECANICO	4,54	26,69
3	28	2,4	MECANICO	5,51	26,63
3	28	2,4	MECANICO		27,63
3	28	2,4	MECANICO		28,69
3	28	2,4	MECANICO		28,38

Planilha para análise dos resultados de resistência a tração e a compressão

TEOR (%)	IDADE	AGREGADO (mm)	DISPERSÃO	TRAÇÃO (MPa)	COMPRESSÃO (MPa)
TESTEMUNHO	7	2,4	X	3,47	16,22
TESTEMUNHO	7	2,4	X	3,75	21,00
TESTEMUNHO	7	2,4	X	3,75	30,34
TESTEMUNHO	7	2,4	X		25,72
TESTEMUNHO	7	2,4	X		25,25
TESTEMUNHO	7	2,4	X		29,44
TESTEMUNHO	14	2,4	X	3,94	31,38
TESTEMUNHO	14	2,4	X	3,94	30,50
TESTEMUNHO	14	2,4	X	4,50	17,16
TESTEMUNHO	14	2,4	X		20,91
TESTEMUNHO	14	2,4	X		25,44
TESTEMUNHO	14	2,4	X		28,72
TESTEMUNHO	28	2,4	X	3,59	32,38
TESTEMUNHO	28	2,4	X	4,59	35,00
TESTEMUNHO	28	2,4	X	4,41	26,13
TESTEMUNHO	28	2,4	X		32,59
TESTEMUNHO	28	2,4	X		31,25
TESTEMUNHO	28	2,4	X		24,66
0,3	7	2,4	MANUAL	3,94	28,97
0,3	7	2,4	MANUAL	3,47	26,97
0,3	7	2,4	MANUAL	3,75	19,66
0,3	7	2,4	MANUAL		17,53
0,3	7	2,4	MANUAL		26,13
0,3	7	2,4	MANUAL		27,91
0,3	14	2,4	MANUAL	4,03	25,88
0,3	14	2,4	MANUAL	3,75	27,09
0,3	14	2,4	MANUAL	3,94	28,94
0,3	14	2,4	MANUAL		29,81
0,3	14	2,4	MANUAL		28,03
0,3	14	2,4	MANUAL		27,47
0,3	28	2,4	MANUAL	2,91	31,63
0,3	28	2,4	MANUAL	3,84	32,19
0,3	28	2,4	MANUAL	3,28	29,69
0,3	28	2,4	MANUAL		26,31
0,3	28	2,4	MANUAL		30,25
0,3	28	2,4	MANUAL		23,06
0,6	7	2,4	MANUAL	3,84	19,50
0,6	7	2,4	MANUAL	4,03	21,00
0,6	7	2,4	MANUAL	4,13	18,03
0,6	7	2,4	MANUAL		21,91
0,6	7	2,4	MANUAL		19,43
0,6	7	2,4	MANUAL		20,34
0,6	14	2,4	MANUAL	4,50	23,90
0,6	14	2,4	MANUAL	4,88	26,21
0,6	14	2,4	MANUAL	4,41	19,93
0,6	14	2,4	MANUAL		15,21
0,6	14	2,4	MANUAL		17,31
0,6	14	2,4	MANUAL		25,40
0,6	28	2,4	MANUAL	4,97	23,31
0,6	28	2,4	MANUAL	5,63	22,13
0,6	28	2,4	MANUAL	5,34	22,41
0,6	28	2,4	MANUAL		18,31
0,6	28	2,4	MANUAL		23,50
0,6	28	2,4	MANUAL		22,44

TEOR (%)	IDADE	AGREGADO (mm)	DISPERSÃO	TRAÇÃO (MPa)	COMPRESSÃO (MPa)
0,9	7	2,4	MANUAL	3,28	25,19
0,9	7	2,4	MANUAL	3,75	21,00
0,9	7	2,4	MANUAL	4,13	24,34
0,9	7	2,4	MANUAL		18,84
0,9	7	2,4	MANUAL		19,84
0,9	7	2,4	MANUAL		21,84
0,9	14	2,4	MANUAL	4,50	28,19
0,9	14	2,4	MANUAL	3,75	26,91
0,9	14	2,4	MANUAL	4,31	23,94
0,9	14	2,4	MANUAL		23,69
0,9	14	2,4	MANUAL		23,28
0,9	14	2,4	MANUAL		24,28
0,9	28	2,4	MANUAL	3,38	21,34
0,9	28	2,4	MANUAL	3,09	20,44
0,9	28	2,4	MANUAL	3,92	26,72
0,9	28	2,4	MANUAL		21,47
0,9	28	2,4	MANUAL		27,42
0,9	28	2,4	MANUAL		27,07
1,5	7	2,4	MANUAL	3,28	26,63
1,5	7	2,4	MANUAL	3,75	27,13
1,5	7	2,4	MANUAL	4,03	24,81
1,5	7	2,4	MANUAL		23,53
1,5	7	2,4	MANUAL		20,97
1,5	7	2,4	MANUAL		18,56
1,5	14	2,4	MANUAL	3,94	27,38
1,5	14	2,4	MANUAL	3,47	29,34
1,5	14	2,4	MANUAL	4,78	23,38
1,5	14	2,4	MANUAL		26,91
1,5	14	2,4	MANUAL		21,69
1,5	14	2,4	MANUAL		19,13
1,5	28	2,4	MANUAL	3,66	23,09
1,5	28	2,4	MANUAL	3,94	28,63
1,5	28	2,4	MANUAL	3,56	25,94
1,5	28	2,4	MANUAL		23,53
1,5	28	2,4	MANUAL		18,25
1,5	28	2,4	MANUAL		21,59
3	7	2,4	MANUAL	3,94	13,16
3	7	2,4	MANUAL	4,03	20,06
3	7	2,4	MANUAL	2,81	16,22
3	7	2,4	MANUAL		13,53
3	7	2,4	MANUAL		18,72
3	7	2,4	MANUAL		21,38
3	14	2,4	MANUAL	3,19	21,66
3	14	2,4	MANUAL	4,13	22,81
3	14	2,4	MANUAL	4,59	9,28
3	14	2,4	MANUAL		12,16
3	14	2,4	MANUAL		18,28
3	14	2,4	MANUAL		12,13
3	28	2,4	MANUAL	3,47	20,44
3	28	2,4	MANUAL	4,41	27,28
3	28	2,4	MANUAL	3,84	16,22
3	28	2,4	MANUAL		19,91
3	28	2,4	MANUAL		19,75
3	28	2,4	MANUAL		21,84