UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Arquitetura e Urbanismo

**Estudo das alternativas de uso da fibra de vidro sem
características álcali resistente em elementos construtivos
de cimento Portland**

Autor: Antônio de Paulo Peruzzi

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Doutor em Arquitetura

ORIENTADOR: Prof. Dr. Osny Pellegrino Ferreira

São Carlos

2007

A Deus

À Maria

A meus pais

À Veridiana

*Fez-se real, um sonho discreto,
De, na vida, tudo ser concreto.
No calor da hidratação,
Completei minha formação.
Com cimento e agregado fiz uma sólida união
Através de uma alcalina reação.
Longe do sol que me causa retração,
Revelei minha vida nesta divina construção.
Buscando qualidade,
Aumentei minha resistência e durabilidade.
Com o poder do engenho,
Melhorei cada vez mais meu desempenho.*

Valdirene Maria Silva

AGRADECIMENTOS

A Deus que me deu tudo o que me foi necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

A meus pais e familiares por terem acreditado em mim e estarem sempre ao meu lado.

À Veridiana, minha esposa, e seus familiares pelo apoio.

A todos meus professores, desde aqueles que me ensinaram as primeiras letras até aqueles que me ensinaram os conceitos mais avançados da ciência e tecnologia.

Ao Prof. Dr. Osny Pellegrino Ferreira por ter acreditado em meu trabalho e pela valiosa orientação.

Ao engenheiro Edouard Zurstrassen, da Owens Corning, pelo companheirismo, apoio e entusiasmo.

Aos professores Eduvaldo Sichieri, João Adriano Rossignolo, José Samuel Giongo, Benedito de Souza Bueno, Ângelo Rubens Migliore pelo apoio.

Aos funcionários da Owens Corning, Texiglass e Tecnun.

Aos técnicos do Laboratório de Construção Civil (LCC), Geotexteis e Estruturas da EESC-USP.

Aos amigos de laboratório George Oda, Fernando Mazzeo, Carlos Gomes, ...

À Owens Corning do Brasil pelo apoio à pesquisa e fornecimento de materiais e à Texiglass, H Brothers, Brasken, Ernetex, Stratus, Tecnun, Holcim, Microsilica-Elken, Dow, pelo fornecimento dos materiais necessários para essa pesquisa.

RESUMO

As fibras de vidro são usadas há alguns anos com a finalidade de melhorar a resistência à tração e ao impacto de compósitos cimentícios. Mas, os álcalis do cimento Portland atacam essas fibras causando a degradação de suas propriedades mecânicas. Para contornar essa degradação, há alguns anos, foram desenvolvidas as fibras álcalis-resistente (AR) que, embora tenham apresentado melhor desempenho que as fibras de vidro convencionais, ainda apresentam perda de desempenho com o tempo. Esse trabalho trata do desenvolvimento de um novo tipo de fibra na forma de telas, a partir das fibras de vidro convencionais, usando uma impregnação de PVC como barreira para impedir o ataque químico dos álcalis do cimento. A análise da eficiência dessas telas em relação à durabilidade foi feita por meio de processo de envelhecimento acelerado e, a seguir, foram estudados os vários tipos de aplicação delas em elementos construtivos à base de matrizes cimentícias concomitantemente como o uso de barras de GFRP. Como resultado final comprovou-se a eficiência da resina desenvolvida na pesquisa para impregnação das fibras em relação à sua durabilidade frente ao meio alcalino do cimento Portland e a adequação do uso das telas impregnadas com essa resina em diversos tipos de produtos de matrizes cimentícias para construção civil.

Palavras – chave: Fibra de vidro/ Eglass / durabilidade/ painéis cimentícios / GRC/ GFRP

ABSTRACT

Glass fibers are used since several years to improve the tensile and impact strengths of cement composites. However, the alkalis from Portland cement attack the glass fibers causing the deterioration of its mechanical properties. In order to avoid this degradation, the alkali-resistant (AR) fibers were developed some years ago. Although those fibers have provided better results than the conventional fibers, they still suffer of performance drop with time. This work deals with the development of a new type of fiberglass product in the form of grids and fabricated from conventional glass fibers impregnated with PVC, which protects the glass from the cement alkalinity. The analysis of the efficacy of those grids in terms of durability was carried out through a process of accelerated ageing and, afterwards, studying various types of applications of those grids in cement matrices along with the use of GFRP rebars. As result, we proved the efficacy of the resin developed in this research as a mean to impregnate and protect the glass fibers from the Portland cement alkali medium and the adequacy of using the grids impregnated with that resin in several types of cement composite products for civil construction.

Key-words: Glassfiber/ Eglass / ageing/ matrix panels / GRC/ GFRP

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	19
1) Preâmbulo	19
2) Hipóteses	23
3) Objetivo	24
4) Estrutura da tese	25
CAPÍTULO 1 Concretos e argamassas reforçados com fibras	27
1.1) Conceito de compósito	27
1.2) Tipos e propriedades das fibras usadas para estruturar matrizes de cimento Portland	29
1.2.1) Fibras de aço	29
1.2.2) Fibras sintéticas	30
1.3) A Fibra de vidro	37
1.3.1) Produção das fibras de vidro	38
1.3.2) Tipos de fibra de vidro	39
1.4) A fibra de vidro e sua durabilidade frente ao meio alcalino do cimento Portland	45
CAPÍTULO 2 Painéis de vedação	52
2.1) Conceito	52
2.2) O sistema <i>drywall</i>	52
2.2.1) Princípio construtivo	52
2.2.2) Tipos de placas esbeltas usadas no sistema <i>drywall</i>	58
2.2.3) Suscetibilidade dos materiais à presença de água	61
2.2.4) Placas cimentícias no sistema <i>sanduíche</i> (WC's etc)	63
2.3) Painéis pré-moldados de concreto	65
CAPÍTULO 3 Outras aplicações da fibra de vidro no cimento Portland	68

	8
3.1) Preâmbulo	68
3.2) Placas cimentícias para piso elevado	68
3.2.1) O sistema de piso elevado	68
3.2.2) Requisitos a serem cumpridos pelas placas	71
3.3) Uso de tela de fibra de vidro no <i>tratamento</i> de juntas de alvenaria - concreto	72
3.3.1) As deformações da alvenaria	72
3.3.2) Etapas para execução do reforço nos encontros da alvenaria com lajes e vigas	74
3.3.3) Análise dos tipos de materiais usados para reforço	75
3.4) Substituição das armaduras de aço em ambientes agressivos	77
CAPÍTULO 4 A argamassa armada	79
4.1) Preâmbulo	79
4.2) Importância da leveza dos componentes da construção civil	80
4.3) Breve histórico da argamassa armada	81
4.4) A argamassa armada e a durabilidade	85
CAPÍTULO 5 Método utilizado no trabalho	88
5.1) Preâmbulo	88
5.2) Depuração estatística dos resultados	91
5.3) Primeira etapa do desenvolvimento experimental: Análise da durabilidade da fibra de vidro frente o meio alcalino do cimento Portland	92
5.3.1) Processo de envelhecimento acelerado	92
5.3.2) Tipos de fibra analisadas	95
5.3.3) Ensaio realizados	96
5.4) Segunda etapa do desenvolvimento experimental:	110
5.4.1) Descrição das telas de fibra de vidro impregnadas com PVC desenvolvidas	111
5.4.2) Aplicação 1 - Placa cimentícia para o sistema <i>drywall</i>	113
5.4.3) Aplicação 2 - Placa para o sistema de piso elevado	116

5.4.4) Aplicação 3 - Substituição de armadura metálica por tela de fibra de vidro e barras de GFRP em peças de argamassa armada	118
5.4.4.1) Considerações iniciais	118
5.4.4.2) Adaptação de método de ensaio à aderência do GFRP	119
5.4.4.3) Análise do comportamento mecânico dos GFRP e da tela de fibra de vidro impregnada com PVC em comparação com o aço	125

CAPÍTULO 6 Resultados Obtidos **130**

6.1) Primeira etapa do desenvolvimento experimental: Análise da durabilidade da fibra de vidro frente ao meio alcalino do cimento Portland	131
6.1.1) Análise do desempenho das telas de fibra de vidro encontradas no mercado	131
6.1.2) Análise da tela de fibra de vidro álcali-resistente (AR)	132
6.1.3) Desenvolvimento da tela de fibra de vidro impregnada com PVC	135
6.1.3.1) Desenvolvimento do Plastissol de PVC para impregnação das fibras	135
6.1.3.2) Análise dos fios impregnados com a formulação de PVC desenvolvida	135
6.1.4) Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	140
6.2) Segunda etapa de desenvolvimento experimental	144
6.2.1) Primeiro caso de aplicação: Substituição da tela de fibra de vidro anteriormente usada (1 cm x 1cm de abertura) em placas cimentícias pela tela 10 x 10 desenvolvida	145
6.2.2) Segundo caso de aplicação: Armadura de placas cimentícias para piso elevado	152
6.2.3) Resultados dos ensaios de aderência nas barras pultrudadas GFRP e aço	156
6.2.4) Resultados dos ensaios de flexão de vigas plasmáticas armadas com barras de aço e GFRP	158

CAPÍTULO 7 Análise dos resultados, perspectivas e conclusões **163**

7.1) Quanto à durabilidade da fibra de vidro frente ao meio alcalino do cimento Portland	163
7.2) Quanto aos casos estudados de aplicação das telas	167
7.3) Quanto ao desempenho das barras de FRP em relação à aderência com o concreto	168
7.4) Quanto à análise da correspondência área de FV x área de aço	169

CAPÍTULO 8	Potencialidade para o uso das fibras de vidro na construção civil	171
8.1)	Quanto o uso da fibra de vidro picada em matrizes cimentícias	171
8.2)	Quanto ao uso da fibra de vidro em tela ou barra em matrizes cimentícias	172
8.3)	Quanto o uso da fibra de vidro em tela ou barra em elementos de argamassa armada	174
8.4)	Quanto o uso da fibra de vidro em obras de geotecnia	176
	Referências Bibliográficas	179

LISTA DE FIGURAS

Figural – Representação esquemática do comportamento à flexão de um concreto convencional e um concreto reforçado com fibras (Adaptado de MEHTA & MONTEIRO, 1994)	19
Figura 2 – Processo de proteção dos filamentos que formam a fibra de vidro pela impregnação de polímero.	22
Figura 3 – Resumo das etapas para o desenvolvimento da pesquisa	25
Figura 1.1 – Classificação dos vários tipos de compósitos. (Fonte: CALLISTER JR, W. D. - 2002)	27
Figura 1.2 – Exemplos de compósitos	28
Figura 1.3 – Feixe de fibra metálica. Em destaque, a deformação nas extremidades. (fonte: www.belgomineira.com.br/produtos)	30
Figura 1.4 - Fluxograma mostrando os tipos de fibras sintéticas usadas em matrizes cimentícias e sua classificação segundo o módulo de elasticidade.	31
Figura 1.5 – Tecido unidirecional (direção longitudinal) de fibra de carbono comercializado no Brasil. (fonte: www.texiglass.com.br)	33
Figura 1.6 – Tecido unidirecional (direção longitudinal) de fibra de aramida comercializado no Brasil. (fonte: www.texiglass.com.br)	35
Figura 1.7 – Figura esquemática da estrutura do vidro. (fonte: BENTUR e MINDESS – 1990, adaptado)	37
Figura 1.8 - Esquema resumido do processo de produção das fibras de vidro (Adaptado de CARVALHO, 1993).	39
Figura 1.9 - Fibra de vidro em forma de cordoalha (<i>roving</i>). Tratam-se de milhares de filamentos de diâmetro em torno de 15 µm contínuos unidos formando a fibra. (fonte: www.owenscorning.com.br).	39
Figura 1.10 - Fibras de vidro transformadas em mantas a partir do <i>roving</i> . (fonte: www.texiglass.com.br).	40
Figura 1.11 - Fibras de vidro picada a partir do <i>roving</i> .	40
Figura 1.12 - Fotografia que mostra a fabricação de um barco pelo processo <i>spray-up</i> . (fonte: Saint Gobain).	41
Figura 1.13 - Representação esquemática do processo de grampeamento de fissuras pelas fibras. (fonte: EKANE, 2000. adaptado)	42
Figura 1.14 – Esquema simplificado do processo de pultrusão convencional.	44
Figura 1.15 – Fotografias ilustrando exemplos de aplicação dos materiais pultrudados de GFRP. (A) Grades para piso. (B) Escada móvel. (C) Escada fixa. (Fonte: www.cogumelo.com.br)	44
Figura 1.16 – Fotografia de algumas barras de GFRP disponíveis no mercado mundial.	45

- Figura 1.17 - Reação responsável pela degradação das propriedades mecânicas das fibras de vidro convencionais quando expostas ao meio alcalino, segundo Bentur e Mindess (1990). **46**
- Figura 1.18 - Superfície da fibra de vidro convencional (tipo E) removida de um compósito de cimento Portland após dois meses de envelhecimento acelerado em água a 20°C. (fonte: Bentur e Mindess, 1990) **46**
- Figura 1.19 - Superfície da fibra de vidro AR removida de um compósito de cimento Portland **49**
- Figura 1.20 – Microscopia feita por Purnell et al (2000) em uma amostra de matriz cimentícia armada com fibra de vidro AR. **50**
- Figura 2.1 - Medidas tradicionais das placas de gesso acartonado e das placas cimentícias. (fonte: www.decorlit.com.br) **54**
- Figura 2.2 - Planta baixa de um apartamento hipotético com vedo externo e interno executado pelo sistema convencional (alvenaria em blocos). **55**
- Figura 2.3 – a) alvenaria estrutural em blocos cerâmicos; b) alvenaria estrutural em blocos de concreto e c) alvenaria de vedação em estrutura formada por vigas, lajes e pilares. **55**
- Figura 2.4 - Planta baixa de um apartamento hipotético com vedo externo de alvenaria convencional e interno executado com placas so sistema *drywall* **56**
- Figura 2.5 – Na foto a estão destacadas as paredes externas em alvenaria convencional e em b os montantes metálicos para receberem as placas esbeltas do sistema *drywall* para divisões internas. **56**
- Figura 2.6 - Planta baixa de um apartamento hipotético com vedo externo e interno executado pelo sistema *drywall* **57**
- Figura 2.7 - Fotografia de uma edificação estruturada em perfis metálicos usando placas para *drywall* nas divisões externas e internas. (fonte: Useplac) **57**
- Figura 2.8 – Placas de gesso acartonado usados no sistema *drywall*. (fonte: www.placo.com.br) **58**
- Figura 2.9 – Exemplo de placa cimentícia sendo instalada. (fonte: Knauf) **58**
- Figura 2.10 – Figura esquemática da placa cimentícia fabricada com microconcreto e telas de fibra de vidro **60**
- Figura 2.11 – Fotografia da placa cimentícia fabricada com microconcreto e telas de fibra de vidro nas faces. (fonte: Spence, 1988) **60**
- Figura 2.12 - Apartamento hipotético com vedo externo de alvenaria convencional e interno executado com placas de gesso acartonado nas áreas secas e placas cimentícias nas áreas molhadas. **62**
- Figura 2.13 - Apartamento hipotético com vedo externo e interno executado em *drywall*. As divisórias externas (sujeitas à intempéries) e de áreas molhadas são de placas cimentícias **62**
- Figura 2.14 – Representação esquemática do painel “sanduíche” formado com placas cimentícias **63**

- Figura 2.15 - Painel “sanduíche” de placas cimentícias usando sarrafos de madeira como preenchimento. **63**
- Figura 2.16 – As figuras a, b, c, d e e mostram a sequência de transporte e instalação dos banheiros pré-moldados e em E uma visão interna destes. (fonte: www.pavidobrasil.com.br) **64**
- Figura 2.17 – Possíveis tipos de textura externa dos painéis moldados de concreto. (fonte: KRÜGER, 2000) **65**
- Figura 2.18 – Exemplos de painéis moldados de concreto (fonte: www.pavidobrasil.com.br) **66**
- Figura 3.1 – Representação esquemática que ilustra o sistema de piso elevado **69**
- Figura 3.2 – Exemplos de aplicação do sistema de piso elevado em escritórios. (fonte: www.tate.com.br) **69**
- Figura 3.3 – Placas cimentícias para piso elevado apoiadas nos cilindros de PVC com areia. (fonte: www.concretif.com.br) **70**
- Figura 3.4 - Situação da placa cimentícia para piso elevado relacionada à espessura da camada de cobrimento da armadura. **71**
- Figura 3.5 - Parede com fissuras evidenciando a dilatação térmica da laje de cobertura. (fonte: Libório & Mello) **73**
- Figura 3.6 - Exemplos de locais onde há grande probabilidade de ocorrência de fissuras **74**
- Figura 3.7 - Exemplo de aplicação de tela para reforço do encontro da alvenaria com pilares. (fonte: THOMAS, 2001) **74**
- Figura 3.8 - Sequência das etapas para execução do reforço do encontro viga-alvenaria (fonte: texiglass) **77**
- Figura 3.9 – Exemplos de aplicação das fibras de vidro em ambientes agressivos. (Fonte: ACI 440.1R-03) **78**
- Figuras 4.1 (de a a d) – Fotografias que ilustram a grande versatilidade das formas da argamassa armada. Em sentido horário: cobertura e paredes de uma escola infantil, cobertura industrial, sanitário público e em um reservatório de água. (Fonte: HANAI, 1992) **80**
- Figura 4.2 - Pavilhão de exposições em Turin, Itália, projetado por Pier Luigi Nervi em 1948. (Fonte: HANAI, 1992) **82**
- Figura 4.3 - Palacete de esportes - Nervi Palazzo, em Roma, Itália, projetado por Pier Luigi em 1957. (Fonte: HANAI, 1992) **82**
- Figura 4.4 – Foto da construção do ginásio de esportes dos CAIC's (Centro de Assistência Integrado à Criança) usando argamassa armada. (Fonte: Hanai, 1992) **84**
- Figura 5.1 – Resumo das etapas do desenvolvimento experimental do trabalho **90**
- Figura 5.2 – Representação esquemática do equipamento de envelhecimento acelerado usado na pesquisa **94**
- Figura 5.3 – Representação esquemática das amostras colocadas dentro do equipamento de envelhecimento acelerado **94**
- Figura 5.4 – Representação esquemática do dispositivo de ensaio de tração simples nas telas de fibra de vidro estudadas. **97**

Figura 5.5 – Fotografia do dispositivo de ensaio de tração simples nas telas de fibra de vidro estudadas.	97
Figura 5.6 – Fotografias da garra caracol usada nos ensaios à tração simples das fibras de vidro.	99
Figura 5.7 - Representação esquemática das placas cimentícias armadas com as telas analisadas	101
Figura 5.8 - Fotografias mostrando as etapas de moldagem das placas cimentícias.	102
Figura 5.9 – Representação esquemática do dispositivo de ensaio de flexão em quatro pontos segundo ASTM C 947/89.	103
Figura 5.10 – Fotografias mostrando o dispositivo de ensaio à flexão das placas esbeltas usado nos trabalhos segundo ASTM C 947/89.	104
Figura 5.11 – Curva Carga-Deformação característica segundo ASTM C 947/89	105
Figura 5.12 – Exemplo do comportamento da curva carga – deslocamento e seus pontos importantes	106
Figura 5.13 – Desenho ilustrativo da fibra de vidro “trabalhando” à tração em uma fissura da matriz cime	107
Figura 5.14 – Exemplo do comportamento da curva carga – deslocamento cujo valor do ponto 1 é maior que os do ponto 2 e 3.	108
Figura 5.15 – Interpretação das curvas em termo de módulo de elasticidade, a carga na qual ocorre a primeira fissura (first crack) e a resistência à Flexão (Fonte: BENTUR e MINDESS, (1990))	108
Figura 5.16 - Curva esquemática com os parâmetros relativos aos índices de tenacidade de acordo com o ASTM C1018. (fonte: BENTUR e MINDESS, 1990)	109
Figura 5.17 - Desenho da tela de fibra de vidro 10 x 10 usada nos experimentos	112
Figura 5.18 - Desenho da tela de fibra de vidro 40 x 40 usada nos experimentos	112
Figura 5.19 - Ilustração do equipamento utilizado na determinação da resistência ao impacto	115
Figura 5.20 - (a) Posição do relógios comparador para execução do ensaio nas placas, (b) ponto de aplicação da carga	117
Figura 5.21– Placas cimentícias para piso elevado sendo ensaiadas.	117
Figura 5.22 – Dispositivo de ensaio de aderência entre FRP e concreto usado no trabalho de Katz et al. (1999).	120
Figura 5.23 – Dispositivo de ensaio de aderência entre FRP e concreto proposto nesse trabalho	120
Figura 5.24 – Amostras preparadas para o ensaio de aderência entre FRP e concreto segundo procedimentos propostos neste trabalho.	121
Figura 5.25 – Fotografia mostrando o cilindro de concreto para ensaio de aderência com a barra da HBrothers	121
Figura 5.26 – Fotografia mostrando o ensaio de aderência entre FRP e concreto proposto neste trabalho.	122

Figura 5.27 - Ruptura típica dos corpos-de-prova de GFRP ensaiados à tração por Tavares (2006)	123
Figura 5.28 - Dimensões usadas nas vigas, modelo de reforço usado e dispositivo de ensaio à tração na flexão adotado	126
Figura 5.29- Fotografias mostrando o dispositivo de ensaio à flexão em quatro pontos usado na análise das vigas.	126
Figura 5.30 - Fotografias mostrando as armaduras de algumas amostras com GFRP na face inferior	127
Figura 5.31 - Fotografia mostrando a armadura de aço CA 50 com $\varnothing = 6,3\text{mm}$	128
Figura 6.1 – Curvas Força x deflexão e Tensão x deflexão para amostras de placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro impregnadas com PVC comercializada	132
Figura 6.2 – Curvas força x deflexão e tensão x deflexão para amostras de placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro AR.	134
Figura 6.3 – Curvas Força x deslocamento e Tensão x deslocamento para amostras de placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro 10 x 10 impregnadas com PVC desenvolvida nesta pesquisa	138
Figura 6.4 - Micrografias das fibras de vidro convencional, sem impregnação, obtidas por meio de MEV nas várias idades de envelhecimento acelerado	141
Figura 6.5 - Micrografia da fibra de vidro convencional sem impregnação com aproximação de sete mil vezes.	141
Figura 6.6 - Micrografias das fibras de vidro impregnadas encontradas no mercado, obtidas por meio de MEV nas várias idades de envelhecimento acelerado	142
Figura 6.7 - Micrografia da fibra de vidro impregnadas encontradas no mercado com aproximação de dezessete mil vezes.	142
Figura 6.8 - Micrografias das fibras de vidro AR, obtidas por meio de MEV nas várias idades de envelhecimento acelerado	143
Figura 6.9 - Micrografia da fibra de vidro AR com aproximação de sete mil vezes.	143
Figura 6.10 - Micrografias das fibras de vidro impregnadas desenvolvidas, obtidas por meio de MEV nas várias idades de envelhecimento acelerado	144
Figura 6.11 - Curvas tensão x deslocamento para a placa cimentícia produzida pela indústria com tela anteriormente usada submetida a ensaio de flexão.	145
Figura 6.12 - Curvas tensão x deslocamento para a placa cimentícia produzida pela indústria com tela 10 x 10 submetida a ensaio de flexão.	146
Figura 6.13 - Curvas tensão x deslocamento para a placa cimentícia desenvolvida no LCC com tela 10 x 10 submetida a ensaio de flexão.	147
Figura 6.14 - Curvas tensão x deslocamento para as placas produzidas na indústria com tela anteriormente usada e a tela 10 x 10, submetidas ao ensaio de flexão	148

- Figura 6.15 – Fotografias ilustrando a colocação do véu de poliéster na face externa da placa cimentícia com a função de regularizar o acabamento externo desta. **149**
- Figura 6.16 - Curvas tensão x deslocamento para as placas produzidas em laboratório usando tela de FV 10 x 10 e véu de poliéster submetidas a ensaio de flexão. **149**
- Figura 6.17 – Placa cimentícia sem reforço de tela, evidenciando ruptura com características frágeis **150**
- Figura 6.18 – Placa cimentícia com reforço de tela 1x1 evidenciando ruptura com característica dúctil **151**
- Figura 6.19 – Placa cimentícia com reforço de tela 4x4, evidenciando ruptura com característica menos frágil **152**
- Figura 6.20 - Fotografias ilustrando as placas cimentícias para piso elevado após a realização dos ensaios. **156**
- Figura 6.21 – Curvas carga (N) x deflexão (mm) para amostras de vigas de concreto armadas com 2 barras de aço CA 50 de $\varnothing = 6,3\text{mm}$ na face inferior. **159**
- Figura 6.22 – Curvas carga (N) x deflexão (mm) para amostras de vigas de concreto reforçadas com 2 barras de GFRP da HBrothers de $\varnothing = 6,3\text{mm}$ na face inferior. **159**
- Figura 6.23 – Fotografias mostrando os corpos-de-prova prismáticos ensaiados à flexão, nas quais se observa uma predominância de trincas a 45° nos pontos de aplicação de carga. **160**
- Figura 6.24 – Curvas carga (N) x deslocamento para amostras de vigas de concreto reforçadas com 1 barra de aço $\varnothing = 6,3\text{mm}$ e variando de 1 até 6 barras GFRP de $\varnothing = 6,3\text{mm}$ na face inferior. **162**
- Figura 8.1 – Exemplos de possibilidade de aumento da inércia alterando a geometria das peças: em (A) uma viga prismática; em (B) uma viga/ calha. **175**
- Figura 8.2 - Exemplo esquemático de solos reforçados com geossintéticos, em (a) um muro e em (b) talude íngreme. (Fonte: VERTEMATTI, 2004) **177**
- Figura 8.3 – Exemplo de aplicação da tela de fibra de vidro em pavimentos **178**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Algumas características mecânicas dos concretos e argamassas de cimento Portland	31
Tabela 1.2 – Propriedades das fibras de carbono.	33
Tabela 1.3 – Propriedades mecânicas das fibras de aramida.	34
Tabela 1.4 - Preço de três tecidos com gramaturas próximas formados por cada um dos tipos de fibras	36
Tabela 1.5 – Propriedades de alguns tipos de fibras usadas no reforço dos compósitos de cimento Portland.	36
Tabela 2.1 – Variação dimensional dos vários tipos de placas usadas no sistema <i>drywall</i>	61
Tabela 3.1 - Resumo das exigências que a EB – 2101 em relação às cargas e flecha máximas admissíveis.	72
Tabela 5.1 – Exemplo de depuração estatística do resultado de ensaio de seis corpos-de-prova de concreto pelo critério de <i>Chauvenet</i> .	91
Tabela 5.2 – Exemplo de depuração estatística do resultado de ensaio de cinco corpos-de-prova de concreto pelo critério de <i>Chauvenet</i> .	92
Tabela 5.3 – Principais características da fibra de vidro <i>AR</i>	95
Tabela 5.4 – Principais características da fibra de vidro <i>sem boro</i> comparadas à fibra tipo E	95
Tabela 5.5 - Propriedades das barras de GFRP fornecidas pelo fabricante (fonte: HBrothers)	122
Tabela 5.6 - Propriedades determinadas por TAVARES (2006) para as barras de GFRP	123
Tabela 6.1 – Resultado do ensaio à tração simples na fibra de vidro impregnada com resina PVC comercializada	130
Tabela 6.2 - Resultados do ensaio à flexão de placas cimentícias reforçadas com tela de fibra de vidro impregnada com resina PVC comercializada	131
Tabela 6.3 – Resultado do ensaio à tração simples na fibra de vidro AR	133
Tabela 6.4 - Resultados do ensaio à flexão das placas cimentícias reforçadas com tela de fibra de vidro AR	133
Tabela 6.5 – Formulação do Plastissol desenvolvido na pesquisa	135
Tabela 6.6 - Resultados do ensaio à tração simples da fibra de vidro impregnada com PVC desenvolvido na pesquisa e porcentagem de queda de resistência mecânica devido processo de envelhecimento acelerado.	136
Tabela 6.7: Resultados do ensaio à tração simples da fibra de vidro impregnada com PVC desenvolvido na pesquisa e porcentagem de queda de resistência mecânica em decorrência do processo de envelhecimento acelerado.	136

Tabela 6.8: Resultados do ensaio à flexão para placas cimentícias reforçadas com tela de fibra de vidro 10 x 10 impregnada com resina PVC desenvolvida na pesquisa	137
Tabela 6.9: Resultado da análise do índice de tenacidade das amostras de placas cimentícias reforçadas com tela de fibra de vidro 10 x 10 impregnada com resina PVC comercializada	139
Tabela 6.10: Resultado da análise do índice de tenacidade das amostras de placas cimentícias reforçadas com tela de fibra de vidro AR	139
Tabela 6.11: Resultado da análise do índice de tenacidade das amostras de placas cimentícias reforçadas com tela de fibra de vidro 10x10 impregnada com resina PVC desenvolvida	140
Tabela 6.12 – Resultados do ensaio de impacto de corpo duro das amostras de placas cimentícias padrão	150
Tabela 6.13 – Resultados do ensaio de impacto de corpo duro das amostras reforçadas com tela de fibra de vidro	150
Tabela 6.14 – Resultados do ensaio de impacto de corpo duro das amostras reforçadas com tela de fibra de vidro 4x4	152
Tabela 6.15 - Resultados do ensaio da placa de piso elevado <i>produzido pela indústria</i> usando o reforço de uma tela de fibra de vidro 40 x 40	153
Tabela 6.16 - Resultados do ensaio da placa de piso elevado <i>desenvolvida em laboratório</i> sem reforço de tela de fibra de vidro.	154
Tabela 6.17 - Resultados do ensaio da placa de piso elevado <i>desenvolvida em laboratório</i> reforçada com uma tela de fibra de vidro.	154
Tabela 6.18 - Resultados do ensaio da placa de piso elevado <i>desenvolvida em laboratório</i> reforçada com duas telas de fibra de vidro.	155
Tabela 6.19 - Resultados do Ensaio de Aderência, segundo procedimentos propostos neste trabalho, para barras de FRP dos fabricantes HBrothers e GFRP nacional e barra de aço como padrão	157
Tabela 6.20 - Resultados do ensaio à flexão das vigas de concreto armadas com 2 barras de GFRP e aço com $\varnothing = 6,3\text{mm}$	158
Tabela 6.21 - Resultados do ensaio à flexão das vigas de concreto armadas com 1 barra de aço $\varnothing = 6,3\text{mm}$ e variando as barras de GFRP de 1 até 6 barras de $\varnothing = 6,3\text{mm}$	162

INTRODUÇÃO

1) Preâmbulo

O uso de fibras de vidro (FV) em matrizes cimentícias já é consagrado mundialmente, principalmente em situações em que se necessita aumentar a tenacidade de argamassas e concretos de cimento Portland, que têm como propriedades intrínsecas uma pequena resistência à tração (se comparada à sua resistência à compressão), uma pequena capacidade de deformação e ruptura frágil. Normalmente, essas fibras são usadas na composição dos concretos e argamassas, na forma difusa (picada), com a função de ampliar a capacidade de deformação do material e aumentar a sua capacidade resistente, principalmente quanto à tração, flexo-tração e impacto.

A maior deformação dos concretos e argamassas é obtida pelo efeito de *grampeamento das fissuras*, a partir do atrito e da aderência existente entre as fibras e a matriz de cimento, substituindo-se fissuras pronunciadas, chamadas de *macrofissuras* (propriedade encontrada nas argamassas e concretos de cimento Portland sem adição de fibras), por várias *microfissuras*, de menor abertura e em maior número (EKANE, 2000ⁱⁱ).

A figura 1 mostra a diferença de ruptura à flexão de um concreto sem a adição de fibras e com fibras.

Figura 1 – Representação esquemática do comportamento à flexão de um concreto convencional e um concreto com adição de fibras (Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 1994, p. 436 ⁱⁱ)

Outra aplicação bastante comum das fibras de vidro picadas em matrizes cimentícias é na atuação como *anti-crack*. Pelo termo *anti-crack*, entenda-se a capacidade que fibras de vidro discretas têm de controlar a fissuração das argamassas e concretos em decorrência da variação volumétrica desses pela perda de água e pelo aumento da temperatura, ocorrida nas primeiras horas da hidratação do cimento Portland.

Hoje, o uso das fibras de vidro na forma de fios, tecidos ou telas em matrizes cimentícias representa um desafio a ser superado, pois são inúmeras as situações em que se necessita do uso de um material não metálico para armar elementos construtivos – estruturais ou não estruturais – como, por exemplo, em ambientes agressivos, em que os metais estão sujeitos à corrosão. Porém, para que as fibras de vidro possam atuar na substituição de armaduras metálicas, é necessário levar em conta fatores importantes como a sua deformação na ruptura, o módulo de elasticidade, a resistência à tração e a característica da ruptura (se frágil ou dúctil).

Outro fator a ser levado em conta é a suscetibilidade da fibra de vidro *convencional*¹ ao ataque alcalino da matriz de cimento Portland, que provoca a degradação de suas propriedades físicas com o tempo, afetando, principalmente, a tenacidade e causando a diminuição progressiva da sua resistência à tração.

Para contornar o problema da durabilidade da fibra de vidro, desenvolveu-se a fibra de vidro álcalis-resistente (AR), adicionando-se cerca de 16% de óxido de zircônio (ZrO_2) na composição do vidro (TEZUKA, 1989ⁱⁱⁱ; PARDELA e AGUILA, 1992^{iv}), que tem melhor desempenho em relação à durabilidade em meios alcalinos, se comparado à fibra de vidro convencional. Por outro lado, o custo da fibra de vidro AR é alto - cerca de três vezes o valor da fibra convencional - sendo economicamente interessante viabilizar o uso da fibra de

¹ Neste trabalho, adota-se o termo *fibra de vidro convencional* para aquelas cuja composição do vidro não tenha sido adicionado óxido de zircônio (ZnO_2).

vidro convencional em matrizes de cimento Portland. Entretanto, para isso ser possível, é necessário proteger as fibras do ataque químico do meio alcalino do cimento Portland.

Embora os estudos realizados mostrem que a fibra de vidro AR não apresente corrosão considerável após certo período de envelhecimento acelerado, o compósito que usa essa fibra como reforço apresenta perda de tenacidade, fruto dos produtos da hidratação do cimento Portland – principalmente o Ca(OH)_2 ⁽²⁾, causando uma perda de flexibilidade das fibras (PURNELL et al., 2000)^v,

Além do uso das fibras AR, para contornar a degradação das fibras de vidro pode-se modificar as matrizes de cimento das seguintes maneiras:

- a) utilizar cimentos de baixa alcalinidade, como o cimento de alto forno (CP III);
- b) adicionar sílica ativa, cinza volante, metacaulinita, etc., que têm por objetivo diminuir o pH da solução dos poros e/ou reduzir ou eliminar a formação de hidróxido de cálcio.

Uma primeira forma de viabilizar o uso da fibra convencional é o uso de cimentos que não gerem Ca(OH)_2 na sua reação, tal como os cimentos aluminosos, ou usar cimentos cuja quantidade de hidróxido de cálcio gerado fosse suficientemente pequena, de tal forma que pudesse ser consumida na reação pozolânica³. Para isso ser possível, seria necessária a adição de sílica ativa, metacaulinita ou algum outro material com propriedades pozolânicas.

Nos trabalhos desenvolvidos por Peruzzi (2001)^{vi}, em sua dissertação de mestrado, estudou-se a viabilidade do uso das fibras de vidro convencionais, usando-se cimentos que

² É importante ressaltar que o Ca(OH)_2 , conhecido na química do cimento como *Portlandita* e denotado por CH, é o maior responsável pelo meio alcalino que reage com as fibras de vidro, causando a perda de resistência mecânica.

³ A formação do Ca(OH)_2 (Portlandita) pode ser proveniente tanto do processo de hidratação da Alita (C_3S) quanto da Belita (C_2S). A reação pozolânica ocorre entre a Portlandita produzida com um material de características pozolânicas (sílica ativa, metacaulinita, etc.). Toma-se a reação de hidratação da Alita para exemplificar a reação pozolânica:

gerassem menor quantidade de Ca(OH)_2 na sua hidratação e, ainda, modificando-se a matriz com látex estireno-butadieno (SB) e adição de sílica ativa para reagir com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento, concluindo que a maneira mais eficiente de atenuar a corrosão química das fibras de vidro pelos produtos da hidratação do cimento Portland, é a proteção da superfície da fibra.

Desta forma, em vez de se tentar diminuir a quantidade de Ca(OH)_2 disponível na matriz, uma maneira simples, econômica e eficiente de viabilizar o uso da fibra de vidro convencional em matrizes de cimento Portland é a proteção dos filamentos das fibras com uma película que impeça o contato destas com os produtos da hidratação. A figura 2 ilustra a proteção dos filamentos que formam a fibra de vidro pela impregnação de polímero:

Figura 2 – Processo de proteção dos filamentos que formam a fibra de vidro pela impregnação de polímero.

É necessário ressaltar que as fibras de vidro são compostas por inúmeros filamentos de cerca de $15\ \mu\text{m}$ de diâmetro e, quando se impregnam os fios, a resina polimérica deve ser fluida o suficiente para garantir a impregnação de cada filamento que compõe esta fibra. Dessa forma, o perigo de rompimento da camada externa de polímero não significa que a fibra esteja passível de degradação, pois há um filme de polímero recobrindo cada filamento.

Por outro lado, o encapsulamento impossibilita o uso da fibra de vidro convencional na forma de fibras discretas, misturadas às argamassas ou aos concretos. Assim, essas fibras impregnadas são adequadas para serem usadas na forma de fios contínuos, telas e

barras, possibilitando uma gama de aplicações desse material bastante diversificada em matrizes de cimento Portland. No capítulo 2 desta tese, se discutem as muitas alternativas de aplicação destes materiais em matrizes cimentícias.

2) Hipóteses

i) É possível usar a *fibra de vidro convencional* no meio alcalino do cimento Portland em forma de fios, telas e barras, desde que se crie uma película protetora para cada filamento, impedindo que o hidróxido de cálcio reaja com a sílica da fibra;

ii) A resina usada para formar a película deve oferecer uma impregnação adequada aos filamentos de fibra de vidro e uma efetiva proteção destes filamentos à reação com o hidróxido de cálcio, mas uma proteção efetiva só pode ser obtida pela formulação adequada dessa resina;

iii) Pode-se produzir telas de fibra de vidro impregnadas com resina polimérica para serem usadas como reforço de inúmeras peças esbeltas à base de cimento Portland;

iv) Para as aplicações nas quais o desempenho mecânico da tela de fibra de vidro não seja suficiente para resistir às tensões solicitadas - sob o ponto de vista da viabilidade econômica e/ou de execução - as barras de fibra de vidro impregnadas com resina poliéster ou epóxi (GFRP⁴) são adequadas para serem usadas no auxílio deste reforço, concomitantemente às telas de fibra de vidro;

v) Uma vez que se leve em consideração a diferença existente entre módulo de elasticidade (E) do aço e da fibra de vidro, pode-se usar a fibra de vidro, na forma de tela ou GFRP, para reforçar peças esbeltas de cimento Portland em substituição ao aço.

⁴ Os perfis produzidos usando-se fibras impregnadas com resinas poliméricas são conhecidos internacionalmente como FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) e aqueles produzidos usando a fibra de vidro – como é o caso das barras usadas neste estudo – são chamados de GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*).

3) Objetivo

- a. Desenvolver uma película de proteção para as fibras de vidro convencional que proporcione uma efetiva durabilidade dessas fibras frente ao meio alcalino do cimento Portland;
- b. Desenvolver telas de fibra de vidro convencional protegidas com uma película de resina polimérica que tenham o desenho⁵ adequado para diversas aplicações em peças esbeltas de cimento Portland;
- c. Estudar possíveis aplicações para as telas de fibra de vidro desenvolvidas - concomitantemente às barras de GFRP, quando necessárias – em peças esbeltas de cimento Portland sem função estrutural (vedação no sistema *drywall*) ou com função estrutural (argamassa armada ou placas cimentícias para piso elevado);
- d. Comparar o desempenho mecânico das peças esbeltas armadas com telas de fibra de vidro e GFRP com aquelas armadas com aço.

4) Estrutura da tese

A figura 3 traz um resumo das etapas de trabalho que foram cumpridas para que os objetivos citados acima pudessem ser obtidos.

⁵ O desenho da tela aqui referido diz respeito à abertura da malha bem como ao diâmetro dos fios de fibra de vidro usados na sua confecção.

Figura 3– Resumo das etapas para o desenvolvimento da pesquisa

No capítulo 1, faz-se uma análise do *estado da arte* relacionado aos concretos e argamassas com adição de fibras, bem como aos armados com fibra de vidro e abordam-se os vários tipos de fibras usadas para este fim. Nesse momento, dá-se um especial destaque à fibra de vidro: sua produção, suas propriedades, os processos de adição para formação de compósitos, sua suscetibilidade aos álcalis do cimento Portland e, principalmente, à fabricação de produtos adequados para o uso na construção civil.

O capítulo 2 apresenta um panorama das possíveis aplicações da fibra de vidro em painéis cimentícios para o sistema *drywall* e, no capítulo 3, faz-se uma análise de outras possibilidades de aplicação das fibras de vidro no concreto, tais como: armadura de placas cimentícias para piso elevado, tratamento de juntas de encontro entre alvenaria e elementos estruturais como vigas, lajes e pilares e na substituição da armadura metálica em ambientes agressivos.

No capítulo 4, retoma-se, ainda que de forma breve, o histórico da argamassa armada no Brasil e no mundo. Por meio deste histórico, procura-se identificar quais as principais patologias que os elementos estruturais apresentaram, os quais foram responsáveis pelo declínio do uso desse sistema construtivo. A partir dessa análise, vislumbrou-se a possibilidade de contornar os problemas de durabilidade do sistema, substituindo-se as armaduras metálicas por armaduras não-metálicas de fibra de vidro.

A metodologia usada para o desenvolvimento dos trabalhos experimentais deste doutorado é apresentada no capítulo 5 e os resultados obtidos nos experimentos podem ser vistos no capítulo 6.

No capítulo 7 faz-se uma análise dos resultados obtidos e faz-se as conclusões finais. Finalmente, no capítulo 8 faz-se uma análise das perspectivas de uso da fibra de vidro na construção civil.

CAPÍTULO 1

Concretos e argamassas com fibras

1.1) Conceito de compósito

Pode-se definir *compósito* como sendo uma combinação macroscópica de dois ou mais materiais distintos, no qual os materiais componentes mantêm suas identidades, fazendo com que as propriedades deste compósito sejam superiores as de cada um dos materiais constituintes individualmente.

Reinhart e Clements (1987, apud SILVESTRE FILHO, 2001, p. 09^{vii}) consideram um compósito como sendo aquele formado por um *reforço* ligado por um material *aglomerante*. Então, os compósitos têm uma ou mais fases descontínuas envolvidas por uma fase contínua. A fase descontínua (reforço) é, usualmente, mais rígida e mais resistente do que a fase contínua (aglomerante), chamada *matriz*. É importante destacar que, para incrementar a resistência aos compósitos, as fibras usadas para o reforço devem ter um módulo de elasticidade maior que a matriz.

A figura 1.1 traz um esquema simples para a classificação dos materiais compósitos.

Figura 1.1 – Classificação dos vários tipos de compósitos. (Fonte: CALLISTER JR, W. D. - 2002^{viii})

A figura 1.2 mostra alguns exemplos de compósitos reforçados por partículas e por fibras.

Figura 1.2 – Exemplos de compósitos reforçados: (A) por partículas aleatórias; (B) por fibras descontínuas unidirecionais; (C) por fibras descontínuas aleatórias; (D) por fibras contínuas unidirecionais. (fonte: MATTEWS e RAWLINGS (1994 apud SILVESTRE FILHO, 2001)).

Segundo Callister Junior (2002, p. 362), “o concreto é um compósito comum, que consiste em um agregado de partículas ligadas umas às outras em um sólido por meio de algum tipo de meio de ligação, isto é, um cimento. Assim, as argamassas e concretos reforçados com fibras, sejam elas picadas ou contínuas (na forma de barras ou telas), podem ser considerados como sendo um compósito, pois o meio *aglomerante* (argamassa ou concreto) tem boas qualidades mecânicas à compressão e baixo desempenho à tração, mas deve ter aderência suficiente para transmitir ao *reforço* (fibras picadas ou contínuas) os esforços submetidos, restando às fibras resistir à tração”.

Quando uma fibra está submetida a uma força crescente, ela pode atingir a sua capacidade resistente e romper. Entretanto, a intensidade da força que leva à ruptura da fibra depende da sua capacidade de deformação ou a sua ductilidade. Certas fibras, como a de carbono, rompem antes mesmo de atingir a sua capacidade nominal. Assim, a escolha do tipo de fibra a ser usada no compósito é de grande importância na avaliação do tipo de comportamento que esse compósito deverá ter quando submetido às solicitações mecânicas, devendo-se levar em conta as propriedades mecânicas e químicas destas (EKANE, 2000).

Em relação às propriedades mecânicas das fibras, devem ser levadas em conta as seguintes variáveis: resistência à tração (f_t), módulo de elasticidade (E), tipo de ruptura (se dúctil ou frágil) e sua deformação até a ruptura. Em relação às propriedades químicas, os fatores mais importantes a serem analisados são: durabilidade quanto aos compostos químicos que formam o compósito, durabilidade quando exposto ao ambiente (raios UV, oxigênio, CO_2 , umidade, etc.) e aderência compatível com a matriz.

A seguir, faz-se uma descrição dos principais tipos de fibras que são habitualmente usadas na composição dos concretos e argamassas com fibras.

1.2) Tipos e propriedades das fibras usadas para reforçar matrizes de cimento

Portland

1.2.1) Fibras de aço

As fibras de aço são o tipo de fibra mais usada como adição dos materiais cimentícios depois do amianto, e seu uso mais comum é na adição aos concretos que exigem um incremento de sua resistência à tração, da tenacidade e da ductilidade, tais como nos usados em pistas de aeroportos, pisos industriais e pavimento de rodovias.

O teor de adição típica deste tipo de fibra é de cerca de 50 kg/m^3 de concreto e estas têm as formas onduladas ou com suas extremidades formando pequenos ganchos, o que representa um menor consumo se comparado às lisas. A figura 1.3 mostra um feixe de fibras metálicas.

Figura 1.3 – Feixe de fibra metálica. Em destaque, suas extremidades. (fonte: www.belgomineira.com.br/produtos)

Em relação à durabilidade dos compósitos de cimento Portland com fibras de aço, Bentur e Mindess (1990, p. 205)^{ix} afirmam que as fibras podem sofrer algum tipo de corrosão na superfície, mas sem comprometer o desempenho mecânico do elemento em si. Porém, os autores fazem a seguinte ressalva: “se o ambiente onde o concreto será empregado for muito agressivo, devem ser tomados cuidados especiais”.

Ressalta-se que as fibras de aço estão sujeitas aos ataques químicos típicos das barras de aço, dependendo do número e da abertura das fissuras no concreto e da possibilidade de despassivação⁶ deste em decorrência da carbonatação.

1.2.2) Fibras sintéticas

Comentou-se anteriormente que, para o reforço poder incrementar a resistência do compósito como um todo, esse deve ter um módulo de elasticidade (E) maior que o da matriz de cimento e essa condição dificulta o uso das fibras sintéticas como reforço dos compósitos cimentícios.

Analisando-se a tabela 1.1, é possível notar que, para uma fibra incrementar resistência ao concreto ou à argamassa, ela deve ter um módulo de elasticidade (E) maior que

⁶ Chama-se *camada de passivação* do aço uma camada delgada de óxido que adere fortemente a este aço e proporciona uma proteção completa contra reação com o oxigênio e com a água, isto é, contra a corrosão ou a formação de ferrugem. A preservação da passivação é condicionada por um pH alto (segundo alguns autores, >9,5).

o da matriz de cimento, portanto, o módulo de elasticidade das fibras usadas no reforço deve ser superior a 25 GPa.

Tabela 1.1 – Algumas características mecânicas dos concretos e argamassas de cimento Portland

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento na ruptura (%)
Concreto	30 a 40	1 a 4	0,005 a 0,015
Argamassa	25 a 35	2 a 4	0,005 a 0,015

(fonte: TEZUKA, 1989)

Por outro lado, a adição de fibras de pequeno módulo de elasticidade aos compósitos de cimento Portland propicia uma considerável melhora na tenacidade, resistência ao impacto e no controle de fissuração. Assim, pode-se dividir as fibras sintéticas em dois grupos distintos: *fibras de pequeno módulo de elasticidade* e *fibras de grande módulo de elasticidade*. A figura 1.4 traz um fluxograma mostrando os tipos de fibras sintéticas usadas para o reforço de matrizes cimentícias divididas em baixo e alto módulo.

Figura 1.4 - Fluxograma mostrando os tipos de fibras sintéticas usadas em matrizes cimentícias e sua classificação segundo o módulo de elasticidade.

a) Fibras sintéticas de pequeno módulo de elasticidade

Em relação às fibras de módulo de elasticidade menor do que o da matriz de cimento, elas pouco incrementam a resistência à tração dos compósitos, mas aumentam a capacidade dos compósitos de absorverem grandes energias e, portanto, possibilitam uma grande resistência ao impacto e tenacidade (GOMES e FERREIRA, 2004)^x. As fibras de baixo módulo de elasticidade destinam-se predominantemente a melhorar o desempenho dos compósitos no estado pós fissurado, frente à ações dinâmicas. É o caso das fibras de Polipropileno (PP), com E variando de 1 GPa e 8 GPa e a resistência à tração varia entre 300 MPa e 400 MPa, ou a fibra de Poliamida (Nylon), com E de 6 GPa e resistência de 800 MPa a 1300 MPa (SAVASTANO, 2000)^{xi}. Mehta e Monteiro (1994, p. 445) afirmam que, mesmo fibras de baixo módulo tais como nylon e polipropileno, foram eficientes na produção de elementos de concreto pré-moldados submetidos a impacto severo.

b) Fibras sintéticas de alto módulo de elasticidade

- **Fibra de Carbono**

Essas fibras são obtidas por meio de dois processos de fabricação distintos, a partir de um poliácrlonitila (fibras de carbono tipo PAN⁷) ou do petróleo ou do carvão mineral (fibras de carbono tipo *pitch*⁸).

O grande atrativo das fibras de carbono são a sua resistência à tração, acima de 2500 MPa, enquanto a resistência do aço para concreto armado (CA-50 e CA-60) varia de 500 MPa a 660 MPa, e o módulo de elasticidade entre 250 GPa e 350 GPa (o módulo do aço para concreto é de 210 GPa). A tabela 1.2 traz as propriedades das fibras de carbono:

⁷ PAN é a abreviatura de **Poli**ácrlonitila.

⁸ Pitch pode ser entendido como sendo um tipo de piche, derivado do petróleo.

Tabela 1.2 – Propriedades das fibras de carbono.

Propriedade	PAN		Pitch
	Tipo I	Tipo II	
Diâmetro (μm)	7,0 a 9,7	7,6 a 8,6	18
Densidade (kg/m^3)	1950	1750	1600
Módulo de elasticidade (GPa)	390	250	30 a 32
Resistência à Tração (MPa)	2200	2700	600 a 750
Alongamento (%)	0,5	1,0	2,0 a 2,4

(fonte: BENTUR e MINDESS – 1990)

Os tipos I e II das fibras do tipo PAN referem-se ao valor do módulo de elasticidade e de resistência à tração destas. Já a fibra de carbono tipo *Pitch* foi desenvolvida no Japão e tem um preço relativamente pequeno, se comparado ao tipo PAN, além de propriedades mecânicas superiores às das fibras sintéticas de pequeno módulo e seu módulo de elasticidade é igual ou maior que ao da matriz de cimento (BENTUR e MINDESS, 1990). A figura 1.5 ilustra um tecido feito de fibra de carbono.

Figura 1.5 – Tecido unidirecional (direção longitudinal) de fibra de carbono comercializado no Brasil. (fonte: www.texiglass.com.br)

Atualmente, o grande consumo das fibras de carbono se dá em aplicações como balística e na indústria aeronáutica, tornando o seu preço elevado, com isso, na construção

civil, a aplicação da fibra de carbono tem sido restrita a situações especiais, tais como na recuperação de estruturas degradadas ou para aumentar a capacidade de carga de estruturas existentes. Há um predomínio do uso na forma de fios, tela ou tecido, uma vez que, a priori, o uso na forma de fibra picada, embora tecnicamente possível, fica inviabilizado pelo custo elevado do material.

Em relação à durabilidade, Bentur e Mindess (1990, p. 355) afirmam que “a resistência aos álcalis foi testada por imersão em água a 50°C e 75°C, em processo similar ao feito com os compósitos com fibra de vidro e em ciclos de gelo-degelo alternados com molhagem e secagem. Os resultados indicam que não se devem esperar significativos problemas de performance em relação ao tempo”.

- **Fibra de Aramida (*Kevlar*)**

A fibra de aramida foi a primeira fibra polimérica comercialmente desenvolvida com alta resistência e rigidez. Ela é correntemente conhecida por *Kevlar*, cujo nome comercial foi registrado pela DuPont. Seu desenvolvimento visou o mercado de pneus, mas, hoje, a maior parte de sua produção é voltada para aplicações semelhantes às da fibra de carbono, como indústria bélica, aeronáutica e no reforço estrutural.

A tabela 1.3 traz as propriedades mecânicas das fibras de aramida:

Tabela 1.3 – Propriedades mecânicas das fibras de aramida.		
Propriedade	Kevlar	HM - 50
Diâmetro (µm)	11,9	12,4
Densidade (kg/m ³)	1450	1390
Módulo de elasticidade (GPa)	125	77
Resistência à Tração (MPa)	2800 a 3600	3100
Alongamento (%)	2,2 a 2,8	4,2

(fonte: BENTUR e MINDESS – 1990)

Observação: A fibra *Kevlar* é produzida pela DuPont (USA) e a HM – 50 pela Teijin Ltda (Japão) com o nome comercial de Twaron.

A figura 1.6 ilustra um tecido feito de fibra de aramida.

Figura 1.6 – Tecido unidirecional (direção longitudinal) de fibra de aramida comercializado no Brasil. (fonte: www.texiglass.com.br)

As fibras de aramida, em contraste com as fibras de vidro e carbono, têm sua ruptura de forma dúctil, acompanhada de uma considerável diminuição de seção transversal e fibrilização. A fibra é composta de um *roving* formado por um fio de milhares de filamentos de 10 μ m a 15 μ m de diâmetro (BENTUR e MINDESS, 1990, p. 358).

Por ter um preço menor que a fibra de carbono, a fibra de aramida tem aplicações na forma de fibras picadas. As proporções de fibras adicionadas aos compósitos cimentícios giram entre 1% e 5% do volume e há um considerável ganho de resistência à tração e de tenacidade nos compósitos com fibras de aramida.

Para ilustrar a diferença no valor dos preços das fibras de carbono, aramida e vidro, a tabela 1.4 apresenta o preço de três tecidos com relação massa/área próximas formados por cada um dos tipos de fibras.

Tabela 1.4 - Preço de três tecidos com relação massa/área próximas formados por cada um dos tipos de fibras⁹

Tipo de fibra	US \$ / m²
Carbono	40
Aramida	22
Vidro AR	3

(fonte: Texiglass – setembro de 2007)

Em relação à durabilidade desse tipo de fibra, Bentur e Mindess (1990, p. 363) afirmam que, “depois de dois anos de envelhecimento e 180 dias imersas em água à 60°C e 75°C, a resistência à tração e a tenacidade foram preservadas, levando à conclusão de que este tipo de compósito não é susceptível a problemas de durabilidade”. Quanto ao ataque alcalino, os autores dizem que as fibras de aramida podem ser susceptíveis a algum ataque, embora os valores deste ataque sejam insuficientes para alterar a expectativa de vida do compósito. Uma restrição às fibras de aramida, quanto à durabilidade, diz respeito à suscetibilidade aos raios UV, mas essa restrição pode ser contornada com uso de pintura de acabamento.

Para facilitar a análise dos diversos tipos de fibra usados em matrizes cimentícias, a tabela 1.5 traz as propriedades mecânicas de alguns tipos de fibra.

Tabela 1.5 – Propriedades de alguns tipos de fibras usadas nos compósitos de cimento Portland.

Fibra	Diâmetro (µm)	Massa Específica (kg/m³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)	Durabilidade no meio alcalino do cimento Portland
Amianto	0,02 a 20	2550	3500	168	2 a 3	Boa
Polipropileno	4 a 30	910	300 a 400	6 a 8	8	Boa
Aço	5 - 500	7840	1000 – 3000	196 a 210	3 a 4	Boa
Vidro E	9 a 15	2550	2100 a 3500	77	2 a 3,5	Pobre
Vidro AR	10 a 20	2700	2000 a 2800	70 a 84	2 a 3	Razoável
Carbono	8	1900	2450 a 3150	230 a 315	1	Boa
Aramida	12	1450	2800 a 3600	125	2,2 a 2,8	Boa

(adaptado de TEZUKA – 1989 e BENTUR e MINDESS - 1990)

⁹ Valores fornecidos pela Texiglass em Junho de 2007. Para facilitar a compreensão da ordem de valores entre os produtos, pode-se adotar o valor da aramida e vidro como correspondendo a 50% e 10% do valor do carbono respectivamente.

1.3) A Fibra de vidro

Segundo Wicks¹⁰ (1986, apud OLIVEIRA, 1995^{xii}, p. 50) o vidro é um material amorfo porque não apresenta periodicidade atômica, ou seja, os seus átomos e moléculas não estão dispostos em longas estruturas organizadas. Entretanto, pode-se considerar que o vidro apresenta estruturas organizadas de pequena ordem, isto é, grupos atômicos com arranjo espacial definido e dimensão entre 2 Å e 10Å.

Oliveira (1995, p. 50) afirma que:

As unidades básicas do vidro são compostas por óxidos (SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , As_2O_3) com arranjo atômico em forma tetraédrica ou triangular. O dióxido de silício é a unidade básica mais comum usada para formação das estruturas vítreas. Na fase líquido-viscosa estes óxidos encontram-se totalmente desordenados, compondo um meio descontínuo. Se o resfriamento do líquido é lento, os átomos tendem a organizar-se segundo uma configuração de menor energia, ou seja, em uma estrutura cristalina, composta de longas cadeias ordenadas. Se o resfriamento for rápido suficientemente para impedir a formação de redes cristalinas, as unidades básicas se organizarão aleatoriamente no espaço, formando o vidro.

A estrutura típica do vidro consiste em uma rede amorfa de sílica-oxigênio, tal como a vista na figura 1.7, abaixo:

Figura 1.7 – Figura esquemática da estrutura do vidro. (fonte: BENTUR e MINDESS – 1990, adaptado)

¹⁰ WICKS, G. G. . Glass structure. Encyclopedia of materials science end engineering. v.3, 1986.

Segundo Oliveira (1995, p. 52), a maior resistência das fibras de vidro em relação ao vidro comum ocorre pelo fato delas possuírem um menor número de defeitos sub-microscópicos. A mesma autora afirma, ainda, que “estas falhas diminutas, responsáveis pelo enfraquecimento dos materiais, são naturalmente oriundas dos processos e condições de fabricação dos mesmos, e diretamente proporcionais às dimensões de peças produzidas”.

1.3.1) Produção das fibras de vidro

(Carvalho, 1993, p. 39)^{xiii} explica o processo de produção da fibra de vidro:

A matéria-prima é composta principalmente pela sílica em forma de areia, o componente básico para qualquer vidro, cerca de 50%. Os outros ingredientes são os boratos e pequenas quantidades de especialidades químicas. Os materiais são misturados numa grande quantidade, a granel (...) A mistura é então levada para o forno de fusão. Dentro do forno a areia e os outros ingredientes se dissolvem formando uma massa fundida em temperaturas que giram em torno de 1.550°C. A temperatura desta massa decresce gradualmente a partir da zona de fusão até os canais que alimentam as fieiras, no qual a temperatura alcança 1.250°C. Nesta temperatura, o vidro atinge a viscosidade mais favorável para a formação das fibras, permitindo a conformação das mesmas com baixo índice de quebra.

A massa fundida de vidro flui para bandejas de platina altamente resistentes ao calor, as quais possuem milhares de pequenas aberturas tubulares furadas com precisão, e que são chamadas de fieiras. As fieiras são placas metálicas retangulares com orifícios através do qual a massa fundida passa, originando os filamentos. Esta corrente fina de vidro fundido é puxada em um diâmetro preciso, e então resfriada por água e ar para garantir o diâmetro e criar um filamento. Logo após a sua formação, os filamentos são coletados e agrupados em mechas e feixes, e depois enrolados em bobinas.

Na manufatura, as fibras recebem, individualmente, um revestimento químico (sizing) que protege e lubrifica cada filamento, aumentando a resistência à abrasão e garantindo a integridade do feixe, visto que, sem este tratamento superficial, as fibras não serviriam de material de reforço. Uma outra função do tratamento superficial das fibras é torná-las compatíveis com a matriz a ser reforçada. Por último, as bobinas são aquecidas para secar o revestimento químico (sizing).

A figura 1.8 traz um esquema resumido do processo de produção das fibras de vidro:

Figura 1.8 - Esquema resumido do processo de produção das fibras de vidro (Adaptado de CARVALHO, 1993).

1.3.2) Tipos de fibra de vidro

a) As fibras contínuas (*roving*)

As fibras de vidro, produzidas como descrito anteriormente por Carvalho (1993), são milhares de filamentos de diâmetro em torno de 15 μm contínuos unidos, formando uma cordoalha, chamada *roving* (figura 1.9).

Figura 1.9 - Fibra de vidro em forma de cordoalha (*roving*). Tratam-se de milhares de filamentos de diâmetro em torno de 15 μm contínuos unidos formando a fibra. (fonte: www.owenscorning.com.br).

Do *roving*, as fibras de vidro podem ser transformadas em telas e mantas (figura 1.10), em empresas especializadas na tecelagem, num processo similar ao dos tecidos de algodão.

Figura 1.10 - Fibras de vidro transformadas em mantas a partir do *roving*. (fonte: www.texiglass.com.br).

b) A fibra picada

Essas fibras podem ser comercializadas no formato já picado ou em forma de *roving* para serem picadas concomitantemente à produção do compósito. A figura 1.11 traz uma fotografia da fibra de vidro já picada:

Figura 1.11 - Fibras de vidro picada a partir do *roving*.

A fabricação dos compósitos usando fibras difusas pode ser feita pelo *método da projeção de fibras* ou pelo *método da pré-mistura*.

No *método da projeção de fibras* há a projeção simultânea de material aglomerante e das fibras de reforço. No caso dos concretos e argamassas reforçadas com fibra de vidro (GRC ou GFRC)¹¹, projeta-se a pasta de argamassa de cimento e areia enquanto as fibras de vidro são cortadas e misturadas.

A pasta de argamassa é alimentada na pistola de projeção por uma bomba dosadora e é dividida em gotículas por meio de ar comprimido. O rolo de fibra de vidro é levado a um cortador/alimentador de fibra de vidro montado no cabeçote de projeção que corta a fibra em comprimentos pré-determinados, normalmente de 25 mm a 40 mm e injeta os fios cortados na projeção de argamassa de modo que um feltro contínuo de fibra e argamassa seja depositado no molde. A proporção de fibra para pasta é ajustada de modo que o composto resultante contenha cerca 5% peso de fibra de vidro (GRCA, 2006)^{xiv}. Este método de produção de compósitos é conhecido no meio técnico como *processo spray-up*.

A figura 1.12 traz uma fotografia da fabricação de uma placa cimentícia pelo processo *spray-up*:

Figura 1.12 - Fotografia que mostra a fabricação de um barco pelo processo *spray-up*. (fonte: Saint Gobain).

Outra forma de misturar a fibra de vidro picada às matrizes é pelo método da pré-mistura, também conhecido como *hand lay-up*.

¹¹ Aos concretos que recebem a adição de fibras de vidro em sua composição dá-se o nome de GRC ou GFRC. Esse sistema de reforço é conhecido na comunidade européia como GRC (*Glass fiber reinforced cement*) e nos Estados Unidos como GFRC (*Glass fiber reinforced concrete*).

O método da *pré-mistura* envolve a mistura de cimento, areia, água, aditivos e fios cortados de fibra de vidro num misturador antes de serem lançados nas fôrmas. Normalmente, para produzir uma pré-mistura de qualidade adequada é necessário misturar em dois estágios. O primeiro estágio destina-se a produzir uma pasta de alta qualidade que tenha a *trabalhabilidade* necessária e permita a incorporação uniforme de fibras. O segundo estágio é a mistura das fibras na pasta a uma velocidade reduzida (GRCA, 2006).

É importante ressaltar que a escolha de cada um dos dois tipos de mistura não é meramente processual, já que para cada tipo de mistura há uma certa quantidade de fibras picadas a serem incorporadas. Por exemplo, o processo *spray-up* permite a incorporação de cerca de 5% de fibra de vidro em volume, enquanto o processo *hand lay-up* possibilita a incorporação de cerca de 2% de fibra de vidro em volume, sem que haja uma perda considerável da *trabalhabilidade*.

Mesmo que os elementos construtivos sejam armados com barras ou telas de fibra de vidro, as fibras picadas têm uma função bastante importante para o seu desempenho, pois as fibras discretas atuam no controle das tensões impostas pela retração hidráulica ou pela exotermia da hidratação do cimento Portland, causadoras de fissuras, atuando no processo como *crack control*.

A figura 1.13 traz uma representação esquemática do processo de grampeamento de fissuras proporcionado pelas fibras:

Figura 1.13 - Representação esquemática do processo de grampeamento de fissuras pelas fibras.
(fonte: EKANE, 2000. adaptado)

Para adição do concreto com porcentagens economicamente viáveis de fibras, o ganho de resistência à tração e à flexão obtidos não devem ser considerados no cálculo da armadura, considerando-os apenas na resistência a impactos, na diminuição da retração e na ancoragem das partículas, impedindo a formação de fissuras muito pronunciadas, substituindo-as por um grande número de microfissuras, conferindo ganho na durabilidade do material (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

c) O processo de pultrusão

O termo pultrusão vem do inglês *pull-out*, que quer dizer tracionar. Dá-se este nome pelo fato das fibras contínuas (*roving* e/ou mantas) serem *puxadas* no processo de fabricação de perfis de diversos formatos. Esses perfis podem ser produzidos a partir de fibras de carbono, aramida ou vidro, impregnadas com resinas poliméricas (poliéster ou epóxi)¹².

A figura 1.14 traz uma representação esquemática do processo de pultrusão convencional.

Figura 1.14 – Esquema simplificado do processo de pultrusão convencional.

O princípio do processo de produção de perfis por pultrusão é bastante simples: uma certa quantidade de fios ou manta de fibra de vidro¹³ que é puxada de várias bobinas (1) por um tracionador (2), passando primeiro por uma imersão em resina polimérica (3), depois por uma boquilha (4) que tem a função de conformar a barra (cilíndrica, prismática, etc.) terminando em uma região aquecida (5) para proceder a cura térmica da resina. O processo é contínuo, as barras podem ser cortadas (6) nas dimensões desejadas e levadas ao depósito.

Atualmente, no Brasil, existem diversas empresas que fabricam esses perfis pultrudados, que têm aplicações variadas como: tracionamento de cabos de fibra ótica, fabricação de antenas automotivas, escadas, cruzetas de postes elétricos, pálites de armazenagem, etc. A figura 1.15 ilustra, por meio de fotografias, algumas aplicações dos pultrudados.

Figura 1.15 – Fotografias ilustrando exemplos de aplicação dos materiais pultrudados de GFRP. (A) Grades para piso. (B) Escada móvel. (C) Escada fixa. (Fonte: www.cogumelo.com.br)

Na construção civil, mais especificamente, as barras de GFRP têm o formato cilíndricos (em sua maioria) ou prismáticos. Mas as barras produzidas pelo processo de pultrusão convencional são extremamente lisas, não possibilitando que haja uma aderência adequada entre elas e a matriz de cimento.

¹² O uso de resinas termofixas tem sido mais comum na fabricação dos perfis, embora muitos pesquisadores sejam entusiastas do uso de resinas termoplásticas.

¹³ A produção de perfis reforçados com fibras de aramida e carbono segue o mesmo processo produtivo.

No Brasil, os materiais pultrudados aptos a serem usados na construção civil, com nervuras e tratamento superficial para propiciar uma aderência compatível à matriz de cimento, ainda estão em desenvolvimento, sendo ainda necessária a importação de GFRP dos Estados Unidos, Canadá ou do Chile. A figura 1.16 mostra fotografias de algumas barras de GFRP disponíveis no mercado mundial.

Figura 1.16 – Fotografia de algumas barras de GFRP disponíveis no mercado mundial. Em A a barra de GFRP de origem chilena, com mossas imitando as do aço. Em B a barra de origem americana, com um *roving* em hélice criando uma pequena saliência (indicada pela seta) e com a sua superfície recoberta por uma camada de areia e resina. Em C a barra de GFRP lisa.

1.4) A fibra de vidro e sua durabilidade frente ao meio alcalino do cimento Portland

As propriedades mecânicas dos concretos com fibras de vidro são: leveza, boa resistência à corrosão e ao fogo e a possibilidade de substituição dos fibrocimentos de amianto em inúmeras aplicações. Porém, o GRC sofre deterioração com o tempo, em decorrência do ataque químico dos álcalis do cimento, tendo suas propriedades mecânicas reduzidas (PARDELA e AGUILA, 1992).

Segundo Bentur e Mindess (1990, p. 222), a fibra de vidro convencional, quando exposta ao meio alcalino, sofre um rápido processo de deterioração de suas propriedades mecânicas com perda de resistência, perda de massa e redução do diâmetro dos filamentos. A deterioração das propriedades mecânicas das fibras de vidro convencionais pode ser atribuída à quebra das ligações $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$ na cadeia do vidro pelos íons OH^- que estão concentrados na

solução alcalina dos poros. A figura 1.17 apresenta a reação responsável pela degradação das propriedades mecânicas das fibras de vidro convencionais, quando expostas ao meio alcalino, segundo os autores.

Figura 1.17 - Reação responsável pela degradação das propriedades mecânicas das fibras de vidro convencionais quando expostas ao meio alcalino, segundo Bentur e Mindess (1990).

A quebra das ligações **Si – O – Si** leva à danificação da superfície do vidro (cavidades pronunciadas, por exemplo) e o produto da reação de corrosão pode se dissolver ou se acumular na superfície do vidro (BENTUR e MINDESS, 1990). Isso pode ser visto na figura 1.18, que mostra a superfície da fibra de vidro convencional (tipo E) removida de um compósito de cimento Portland após dois meses de envelhecimento acelerado em água a 20°C.

Figura 1.18 - Superfície da fibra de vidro convencional (tipo E) removida de um compósito de cimento Portland após dois meses de envelhecimento acelerado em água a 20°C. (fonte: Bentur e Mindess, 1990)

Diante dessa intensa degradação da fibra de vidro convencional, viu-se que não era possível usar as mesmas fibras de vidro que eram usadas em compósitos poliméricos e era necessário desenvolver uma fibra de vidro adequada ao uso no meio alcalino. Segundo Pardela e Del Aguila (1992, p. 65) “em 1967, A. J. Majundar, do Reino Unido, por meio de

seus estudos adicionou cerca de 16% de óxido de zircônio na composição do vidro¹⁴, obtendo uma fibra de vidro que representava uma considerável resistência ao ataque dos álcalis, que recebeu o nome comercial de CEM-FIL 1”

Bentur e Mindess (1990, p. 225) citam que

Majundar baseou-se em observações de que as fibras produzidas a partir de composições em sistema de $\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2 - \text{ZrO}_2$ são quimicamente mais estáveis em soluções alcalinas e foram desenvolvidas dando atenção aos dois aspectos seguintes:

- 1) Resistência química do vidro para que este tivesse boa performance no meio alcalino.
- 2) Propriedades físicas do vidro fundido para possibilitar a fabricação por um processo comercial.

O mecanismo pelo qual a modificação da composição do vidro, particularmente pela presença do ZrO_2 , incrementa a resistência da fibra aos álcalis foi extensivamente estudado. As ligações $\text{Zr} - \text{O}$, em contraste com a ligação $\text{Si} - \text{O}$, são levemente atacadas pelos íons $(\text{OH})^-$ e, então, a incorporação do ZrO_2 , como parte da cadeia, proporciona estabilidade à estrutura do vidro no meio alcalino, isto é, reduz consideravelmente a quebra das ligações. Isso pode dever-se à melhoria na estabilidade de todas as ligações do vidro quando o ZrO_2 está presente ou à formação de uma camada protetora de ZrO_2 quando algum SiO_2 é quebrado ou extraído. A camada rica em ZrO_2 formada permanece no vidro e pode servir como uma barreira de difusão para reduzir ainda mais a intensidade do ataque (BENTUR e MINDESS, 1990).

Segundo Pardela e Del Aguila (1992, p. 66), “com o desenvolvimento de uma nova geração de fibras AR, denominada comercialmente Cemfil 2, o GRC mostra um

¹⁴ MARTEN (1998) ressalta que quantidades de óxido de zircônio abaixo de 15% mostram progressiva perda da resistência química, e pequeno ou nenhum benefício adicional, quando usado acima de 20%. (fonte: MARTEN, B. – Glass fibres for cement & concrete. Concrete magazine. November /December. 1998)

comportamento com o tempo muito superior àquele observado na primeira geração de fibras AR, o problema (da degradação) foi reduzido, mas ainda está longe de ser resolvido”.

A deterioração com o tempo do GRC utilizando fibras AR não pode ser explicada apenas pelo ataque dos álcalis às fibras. Bentur e Mindess (1990, p. 222) afirmam que há coexistência de dois mecanismos de degradação do material composto (GRC), que teriam maior ou menor importância dependendo do tipo de fibras e de matriz:

- 1) ataque químico das fibras de vidro;
- 2) crescimento de produtos da hidratação do cimento entre os filamentos das fibras.

Pardela e Del Aguila (1992, p. 66) afirmam que o primeiro mecanismo, principal responsável pela degradação das fibras de vidro tipo E, segue subsistindo, mesmo com menor importância, quando se utilizam fibras AR. Mas o mecanismo predominante na degradação do compósito é o desenvolvimento e crescimento de produtos da hidratação do cimento, fundamentalmente cristais de hidróxido de cálcio, que envolvem os filamentos de vidro, fragilizando o material.

Purnell, Short e Majundar (2000) chegaram a conclusões idênticas às de Pardela e Del Aguila (1992) e ainda concluíram que o processo de corrosão da fibra de vidro AR pelo ataque alcalino do cimento é mínima, ou desprezível, creditando a causa da perda da tenacidade das fibras no GRC à densificação da matriz na interface fibra-matriz. Essa densificação é decorrente do acúmulo dos produtos da hidratação do cimento Portland entre os filamentos das fibras, tal como Bentur e Mindess (1990) haviam citado.

A figura 1.19 apresenta micrografias de fibra de vidro AR, primeiro (A) com fios retirados de um compósito cimentício ainda jovem (28 dias) e em (B) após envelhecimento acelerado evidenciando o depósito de cristais de CH entre os filamentos.

Figura 1.19 - Superfície da fibra de vidro AR removida de um compósito de cimento Portland na qual, em (A) se vê os espaços entre os filamentos nas fibras de vidro em um compósito cimentício aos 28 dias; (B) os espaços entre os filamentos nas fibras de vidro do compósito está preenchido por cristais de Ca(OH)_2 após envelhecimento acelerado. (fonte: BENTUR e MINDESS, 1990)

A figura 1.20 traz microscopias de fibra de vidro AR em compósitos cimentícios. A primeira microscopia (A) mostra a fibra de vidro AR em matriz de cimento Portland, sem sofrer processo de envelhecimento acelerado. Na microscopia (B) pode-se observar a fibra de vidro AR em matriz de cimento Portland, após 56 dias de envelhecimento acelerado à 65°C evidenciando o acúmulo de produtos da hidratação do cimento entre os filamentos, comprometendo a tenacidade do material. Nela, pode-se notar o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento Portland depositado entre os filamentos de fibra de vidro.

Figura 1.20 – Microscopia feita por Purnell et al (2000) em uma amostra de matriz cimentícia reforçada com fibra de vidro AR. Em (A) sem sofrer processo de envelhecimento acelerado e em (B), após 56 dias de envelhecimento acelerado à 65°C, na qual se pode identificar os produtos da hidratação do cimento Portland, principalmente o Ca(OH)_2 , depositados entre os filamentos das fibras causando perda de sua flexibilidade. (fonte: PURNELL; SHORT; MAJUNDAR, 2000)

Bartos e Zhu (1996)^{xv} já haviam proposto em sua pesquisa um tratamento da fibra de vidro AR com látex acrílico, como forma de aumentar a sua durabilidade frente ao meio alcalino do cimento Portland.

Das observações feitas por Benttur e Mindess (1990), Pardela e Del Aguila (1992), Purnell, Short e Majundar (2001), pode-se concluir que o problema da corrosão das fibras de vidro AR está resolvido. Porém, os autores afirmam que este fato ainda não possibilitou que se resolvesse o problema da perda de ductilidade e conseqüente aumento da fragilidade do compósito de cimento Portland reforçados com esse tipo de fibra.

Foi visto que a degradação das propriedades mecânicas dos compósitos com fibras de vidro AR se dá, principalmente, pelo acúmulo dos produtos da hidratação do cimento Portland entre os filamentos das fibras e as pesquisas desenvolvidas por Bartos & Zhu (1996) mostraram que a impregnação das fibras com um polímero (acrílico no caso) aumentou a durabilidade destes compósitos. Esses resultados apontam para o uso da impregnação das fibras de vidro com resinas poliméricas como a melhor solução para contornar a degradação das propriedades mecânicas das fibras.

Supõe-se que a melhoria do desempenho se dê pelo fato de o polímero ocupar o espaço entre os filamentos da fibra de vidro, impedindo o depósito dos produtos da hidratação do cimento Portland.

Uma vez que a impregnação das fibras de vidro AR com resina polimérica se faz necessária, é interessante estudar a durabilidade de fibras de vidro convencionais, frente ao meio alcalino do cimento Portland, impregnadas com resina polimérica e esta é uma das proposições desse trabalho.

CAPÍTULO 2

Painéis de vedação

2.1) Conceito

Os painéis cimentícios de vedação representam um caso de aplicação das fibras de vidro em concretos e argamassas de cimento Portland, pois esses painéis têm como principal propriedade a esbeltez e a leveza, necessitando de concretos ou argamassas mais dúcteis e tenazes.

Os painéis de vedação são aqueles que são projetados para substituir as alvenarias numa construção, podendo ou não ser autoportantes, isolantes acústicos, e isolantes térmicos, mas sempre têm de ser estanques à umidade e à chuva. Portanto, esses painéis surgiram para substituir a alvenaria como função de elemento vedante.

Os painéis de vedação podem ser classificados da seguinte maneira:

- quanto à vedação: interna ou externa;
- quanto ao material ou a matéria-prima dominante: gesso acartonado, poliestireno expandido, madeira, metálica ou cimentícia.

Os painéis cimentícios podem ser classificados como:

- Concreto pré-moldado;
- Concreto celular autoclavado;
- Placas cimentícias de concreto leve;
- Placas cimentícias de fibrocimento.

2.2) O sistema *drywall*

2.2.1) Princípio construtivo

As principais funções das vedações verticais são:

- compartimentar, separar e definir ambientes;
- proteger aqueles que se utilizam desses ambientes;
- controlar a ação dos agentes diversos (MEDEIROS e BARROS, 2005)^{xvi}.

Para que cumpram adequadamente essas funções, alguns requisitos de desempenho são exigidos dessas vedações, tais como:

- serem auto-sustentáveis;
- apresentarem segurança estrutural;
- proporcionarem conforto acústico;
- proporcionarem conforto térmico;
- proporcionarem higiene ao ambiente;
- serem duráveis.

As vantagens potenciais que a vedação vertical em placas esbeltas para o sistema *drywall* apresentam em relação às tecnologias tradicionais são:

- ganho de área;
- menor peso;
- facilidade de execução e de manutenção de instalações embutidas;
- desempenho acústico adequado a diferentes situações;
- superfície lisa e precisa;
- redução de prazo de execução;
- vantagens econômicas.

O termo *drywall*¹⁵ é empregado nos Estados Unidos e no Brasil para se referir às divisórias de gesso acartonado. Nesta tese, o termo *drywall* será usado para designar o método construtivo que, em contraponto ao método construtivo tradicional que edifica ligando blocos por meio de argamassa, os materiais utilizados encontram-se sob a forma de chapas e painéis.

¹⁵ O termo *drywall* é marca registrada pela Lafarge Gypsum (TANIGUTI – 1999)

Todo painel é caracterizado pela predominância de duas dimensões em relação a uma terceira. Por exemplo, a dimensão 1,20 m de largura por 2,40 m de comprimento é característica em placas cimentícias para o sistema *drywall*, com espessuras de 1,25 cm. A figura 2.1 ilustra as medidas tradicionais das placas de gesso acartonado e placas cimentícias.

Figura 2.1 - Medidas tradicionais das placas de gesso acartonado e das placas cimentícias. (fonte: www.decorlit.com.br)

A construção por meio de placas esbeltas pode servir para vedo externo e como para separação interna dos cômodos, mas, no Brasil, a maioria das obras que usam o sistema *drywall* com placas esbeltas o fazem de forma parcial: nas áreas externas usa-se o processo convencional de construção (alvenaria estrutural ou vigas, pilares e lajes e alvenaria de vedação) e a separação entre cômodos é feita com paredes do sistema *drywall*.

Para melhor estudar cada uma dessas situações serão analisados os seguintes casos:

- 1) Alvenaria convencional nas paredes externas e placas esbeltas para *drywall* nas divisões internas;
- 2) Placas esbeltas para *drywall* em todas as paredes.

A figura 2.2 traz uma planta baixa de um apartamento hipotético que será usado para exemplificar cada uma das situações estudadas.

Figura 2.2 - Planta baixa de um apartamento hipotético com vedo externo e interno executado pelo sistema convencional (alvenaria em blocos).

As figuras 2.3 (a, b e c) trazem fotografias do sistema construtivo convencional.

Figura 2.3 – a) alvenaria estrutural em blocos cerâmicos; b) alvenaria estrutural em blocos de concreto e c) alvenaria de vedação em estrutura formada por vigas, lajes e pilares.

A figura 2.4 traz uma planta baixa mostrando uma construção em processo misto: alvenaria convencional nos vedos externos e *drywall* nas divisões internas.

Figura 2.4 - Planta baixa de um apartamento hipotético com veda externo de alvenaria convencional e interno executado com placas do sistema *drywall*

As figuras 2.5a e 2.5b trazem fotografias do sistema construtivo misto: nas paredes externas alvenaria convencional e o sistema *drywall* nas divisórias internas.

Figura 2.5 – Na foto a estão destacadas as paredes externas em alvenaria convencional e em b os montantes metálicos para receber as placas esbeltas do sistema *drywall* para divisões internas.

A figura 2.6 traz uma planta baixa mostrando uma construção usando placas esbeltas para o sistema *drywall* nas divisões internas e externas.

Figura 2.6 - Planta baixa de um apartamento hipotético com vedo externo e interno executado pelo sistema drywall

A figura 2.7 traz uma fotografia de uma edificação estruturada em perfis metálicos usando placas para *drywall* nas divisões externas e internas.

Figura 2.7 - Fotografia de uma edificação estruturada em perfis metálicos usando placas para *drywall* nas divisões externas e internas. (fonte: Useplac)

2.2.2) Tipos de placas esbeltas usadas no sistema *drywall*

a) Placas de gesso acartonado

A placa de gesso acartonado é composta de placas de gesso revestidas com folhas de papelão em ambos os lados (figura 2.8), formando um conjunto resistente à tração e à flexão e, para sua fixação, utilizam-se montantes e guias de aço ou de madeira e parafusos (KRÜGER, 2000 ^{xvii}).

Figura 2.8 – Placas de gesso acartonado usados no sistema drywall. (fonte: www.placo.com.br)

b) Placas cimentícias

Segundo Krüger (2000) esse sistema de vedação se assemelha muito com o gesso acartonado, sendo mais utilizado para vedação externa ou em ambientes expostos à ação de água, tais como banheiros, cozinhas, etc..

Uma vez que o sistema é parecido com o do gesso acartonado, os principais fabricantes das placas cimentícias seguem os padrões de dimensões de produto semelhante aos usados nas de gesso acartonado, tornando assim, os dois produtos intercambiáveis e suplementares. A figura 2.9 mostra uma fotografia de uma placa cimentícia sendo instalada.

Figura 2.9 – Exemplo de placa cimentícia sendo instalada. (fonte: Knauf)

O mercado brasileiro produz dois tipos diferentes de placas cimentícias para o sistema *drywall*: as placas fabricadas em fibrocimento, pelo processo Hatcheck¹⁶ e a que é feita usando-se microconcretos leves, moldados em fôrmas metálicas.

i) A placa de fibrocimento

O processo industrial para fabricação destas placas é idêntico ao da fabricação das telhas de fibrocimento, sofrendo apenas pequenas alterações na composição dos materiais constituintes. Embora no Brasil o uso da fibra de amianto ainda não tenha sido proibido, as placas cimentícias para o sistema *drywall* são livres de amianto. Os materiais básicos para formação das mantas são: o cimento Portland, o filer calcáreo, as fibras de celulose (que tem a função de formar as mantas) e fibras de polipropileno e/ou PVA (que exercem a função de reforço do compósito no estado endurecido).

As principais vantagens deste tipo de placa é a grande resistência à tração, a alta ductilidade e o preço mais competitivo que as placas cimentícias moldadas de microconcreto. Porém, as fibras celulósicas são responsáveis pela elevada variação dimensional (aproximadamente 2,5%) das placas cimentícias fabricadas com estes materiais – principalmente quando exposta à ambientes úmidos – ocasionando fissuras entre as juntas¹⁷.

ii) A placa de microconcreto leve

¹⁶ Esse processo de produção foi desenvolvido por L. Hatcheck, na Austrália, em 1900, para a fabricação de chapas de amianto. O processo, usado ainda hoje pelas indústrias, consiste em formar mantas a partir de uma suspensão de fibras diluídas de amianto (ou de celulose com polipropileno e/ou PVA) em água e material aglomerante como cimento e sílica ativa (dispersão conta com apenas cerca de 30% de material sólido). As mantas são formadas conforme a água da mistura é drenada por um feltro e ainda retirada continuamente por meio de cilindros e vácuo, restando apenas o compósito fibra-aglomerante. O processo de impregnação do feltro com a suspensão de fibras e aglomerantes e a posterior retirada da água se repete continuamente por várias vezes até se obter uma manta com a espessura desejada.

¹⁷ As placas do sistema *drywall* variam sua dimensão quando na presença de umidade ou pela variação da temperatura, necessitando de juntas com dimensão suficiente para absorver a variação dimensional.

Sendo os concretos, os microconcretos e as argamassas de cimento Portland materiais com ruptura frágil, para confeccionar placas esbeltas (cerca de meia polegada, ou seja, 12,5mm de espessura) com dimensões de 2,40m x 1,20m é necessário que a matriz cimentícia usada tenha um menor módulo de elasticidade possível. Para tanto, usa-se a argila expandida como agregado e adiciona-se látex à composição do concreto¹⁸.

A resistência à tração das placas é garantida por duas telas de fibra de vidro, colocadas em ambas as faces das placas, como pode ser visto nas figuras 2.10 e 2.11.

Figura 2.10 – Figura esquemática da placa cimentícia fabricada com microconcreto e telas de fibra de vidro

Figura 2.11 – Fotografia da placa cimentícia fabricada com microconcreto e telas de fibra de vidro nas faces.
(fonte: Spence, 1988^{xviii})

A principal vantagem deste tipo de placa cimentícia é que a sua variação dimensional é bastante pequena se comparada à da placa de fibrocimento, porém, em decorrência da necessidade do uso de tela de fibra de vidro nas duas faces e a menor

¹⁸ Rossignolo (2003) estudou os microconcretos leves com argila expandida modificados com látex Estireno-Butadieno e verificou uma considerável diminuição do seu módulo de elasticidade.

produtividade obtida no processo de produção, o preço do produto é menos competitivo que o de fibrocimento.

A tabela 2.1, abaixo, compara a variação dimensional entre os tipos de placas mais usados no sistema *drywall*.

Tabela 2.1 – Variação dimensional dos vários tipos de placas usadas no sistema *drywall*

Tipo de Placa	Variação dimensional (mm/m)
Gesso acartonado ^(*)	0,7
Cimentícia de microconcreto ^(**)	0,6
Cimentícia de fibrocimento ^(**)	2,0

(fonte: ^(*) Knauf, ^(**) www.useplac.com.br)

2.2.3) Susceptibilidade dos materiais à presença de água

As placas de gesso acartonado são susceptíveis à água. Porém, os fabricantes de placas de gesso acartonado têm uma versão de placas apropriadas para áreas úmidas: o gesso acartonado resistente à umidade (RU), mas a análise das qualidades da placa cimentícia RU não é o objetivo desta tese.

O uso da placa de gesso acartonado em *áreas secas* e de placas cimentícias em *áreas molhadas*, fazendo com que esses dois tipos de placa sejam considerados complementares, tem sido a opção adotada por muitos construtores. Assim, tomando a planta baixa do apartamento hipotético apresentada anteriormente, a figura 2.12 mostra a situação do apartamento com vedação mista, usando dois tipos diferentes de placas esbeltas.

Figura 2.12 - Apartamento hipotético com vedo externo de alvenaria convencional e interno executado com placas de gesso acartonado nas áreas secas e placas cimentícias nas áreas molhadas.

A figura 2.13 mostra a situação do apartamento com vedação toda feita em *drywall*, usando dois tipos diferentes de placas esbeltas.

Figura 2.13 - Apartamento hipotético com vedo externo e interno executado em *drywall*. As divisórias externas (sujeitas à intempéries) e de áreas molhadas são de placas cimentícias

2.2.4) Placas cimentícias no sistema *sanduíche* (WC's etc)

As placas cimentícias, além de servirem para vedação no sistema *drywall*, podem formar painéis no sistema sanduíche. Esses painéis consistem em usar duas placas cimentícias – nas faces externas – e ligá-las por um material que tem a função de servir de isolante térmico e acústico, além de preencher o espaço vazio entre placas, com a vantagem de reduzir a “sensação de oco”, que na maioria das vezes torna o consumidor brasileiro avesso ao sistema de construção seca.

A figura 2.14 mostra uma representação esquemática do *painel sanduíche* formado a partir de duas placas cimentícias.

Figura 2.14 – Representação esquemática do painel “sanduíche” formado com placas cimentícias

Um produto comercializado no Brasil, por exemplo, usa sarrafos de madeira colados e prensados a altas temperaturas na formação dos painéis, o que, além de acrescentar requisitos ligados ao conforto, os enrijecem. A figura 2.15 ilustra esse tipo de painel sanduíche.

Figura 2.15 - Pannel “sanduíche” de placas cimentícias usando sarrafos de madeira como preenchimento.
(fonte: www.decorlit.com.br)

A partir de *painéis sanduíche* de placas cimentícias, a *Pavi do Brasil* produz banheiros pré-fabricados, que já têm as instalações de água, esgoto e eletricidade executados bem como as pias, vaso sanitário, chuveiro e o revestimento das paredes internas prontos. Desta forma, o banheiro é fabricado na indústria, transportado ao local onde será instalado, posicionado na obra no local previsto em projeto e, a seguir, conectados às instalações hidráulicas e elétricas da edificação, ficando pronto para o uso.

Para a formação dos painéis, a empresa preenche o espaço vazio entre placas com concreto contendo esferas de EPS na formulação ou argila expandida como agregados. Mas é também possível que esse material de preenchimento possa ser de concreto celular ou espuma poliuretana.

As figuras 2.16 de **a, b, c, d e e**, mostram a seqüência de transporte e instalação dos banheiros e uma visão interna deles.

Figura 2.16 – As figuras a, b, c e d mostram a seqüência de transporte e instalação dos banheiros pré-moldados e em e uma visão interna destes.
(fonte: www.pavidobrasil.com.br)

No âmbito acadêmico, Schultz (2005) desenvolveu em suas pesquisas de mestrado diversas alternativas de núcleos de painéis sanduíche usando resíduos da indústria, somando às qualidades de conforto e resistência do sistema também vantagens de ordem ecológica. A pesquisadora estudou placas cimentícias com núcleos de borracha derivada de resíduos de pneus, raspa de couro curtido ao cromo e serragem de madeira, obtendo resultados satisfatórios¹⁹.

2.3) Painéis pré-moldados de concreto

São painéis produzidos a partir de concretos que usam fôrmas metálicas para moldagem, possibilitando a criação de diversos modelos, pois a superfície externa dos painéis (aquela face que ficará aparente) fica no fundo da fôrma, possibilitando o uso de texturas no acabamento, tais como: auto-relevo, cerâmicas, pastilhas, pigmentos, granilha, etc. (KRÜGER, 2000). A figura 2.17 ilustra os possíveis tipos de textura externa dos painéis moldados de concreto.

Figura 2.17 – Possíveis tipos de textura externa dos painéis moldados de concreto. (fonte: KRÜGER , 2000)

¹⁹ Maiores detalhes podem ser obtidos na dissertação de mestrado “*Painéis sanduíche constituídos de cimento reforçado com fibras (CRF) e compósito polimérico: pesquisa e desenvolvimento preliminar*”. EESC-USP. 2005.

A figura 2.18 mostra painéis moldados de concreto, primeiro (a) sem textura no pátio da fábrica e em (b) e (c) painéis com concreto pigmentado e texturizado sendo instalados.

Figura 2.18 – Exemplos de painéis moldados de concreto – Em (a) sem textura no pátio da fábrica e em (b) e (c) painéis com concreto pigmentado e texturizado sendo instalados. (fonte: www.pavidobrasil.com.br)

Uma propriedade importante deste tipo de painel é que eles requerem concretos ou microconcretos de resistência elevada, com grande consumo de cimento, com alto teor de argamassa e consistência fluida. Como consequência desse elevado teor de cimento, ou do uso de cimentos de alta resistência inicial²⁰ e da pouca proporção de agregados graúdos²¹, os painéis têm a tendência de apresentar variação dimensional elevada e alto grau de fissuração em decorrência do processo de hidratação do cimento. Para contornar esses problemas, as indústrias fabricantes de painéis de concreto adicionam fibras picadas à composição dos

²⁰ Na fabricação de produtos pré-moldados de concreto, para agilizar a produção, costuma-se usar o cimento tipo CP V ARI, que garante resistências elevadas aos 7 dias, mas que libera um calor de hidratação elevado.

concretos, sendo a fibra de vidro AR a mais usada. Além da fibra de vidro na forma discreta para controle da fissuração do concreto, alguns fabricantes de painéis ainda costumam estruturá-los usando tela de fibra de vidro.

²¹ Os agregados com maiores dimensões têm o efeito benéfico de controlar a estabilidade dimensional e a fissuração originada do processo de hidratação do cimento Portland.

CAPÍTULO 3

Outras aplicações da fibra de vidro no cimento Portland

3.1) Preâmbulo

Como visto no capítulo 2, o uso de fibra de vidro em painéis cimentícios é consagrado no mundo inteiro, seja como fibra picada ou na forma de tela. Neste capítulo, serão analisadas algumas outras aplicações mais recentes das fibras de vidro, ou que, ainda são objeto de estudo.

O primeiro caso é a aplicação das placas cimentícias com função estrutural, como painel cimentício para o sistema de *piso elevado*. Um segundo caso é o uso de telas de fibra de vidro no tratamento de juntas do sistema *drywall* e no encontro de vigas, pilares e lajes com a alvenaria, que são regiões nas quais há grande probabilidade de ocorrência de fissuras. O terceiro caso é em substituição ao aço quando o ambiente é agressivo, ou se necessita de uma estrutura mais leve ou com *transparência magnética*²².

3.2) Placas cimentícias para piso elevado

3.2.1) O sistema de piso elevado

O sistema de piso elevado surgiu na segunda metade do século 20 e consiste em criar um “entre piso” (acima do piso ou laje original) pelo qual devem passar tubulações ou dutos com fios, ar condicionado, etc. Pelas suas características, o sistema é mais adequado para ser usado nos edifícios de escritórios, pois nestes locais há grande quantidade de instalações (cabeario ótico, elétrico, telefonia, informática, ar condicionado, detectores de fumaça e tubulações hidráulicas, entre outras instalações) e a necessidade de se ter uma maior

²² Entende-se por *transparência magnética* a propriedade que os materiais têm de não serem condutores de eletricidade (maus condutores) e não se magnetizarem na presença de campo magnético. Um exemplo de aplicação são as salas para equipamentos de raio x e microscopia eletrônica de varredura (MEV), telecomunicações, etc.

flexibilização dos ambientes de trabalho. A figura 3.1 ilustra o sistema de piso elevado e a figura 3.2 traz fotografias mostrando a aplicação do sistema.

Figura 3.1 – Representação esquemática que ilustra o sistema de piso elevado

Figura 3.2 – Exemplos de aplicação do sistema de piso elevado em escritórios. (fonte: www.tate.com.br)

De modo geral, os pisos elevados devem absorver as ações de peso próprio e as variáveis normais, mas, porém, nos locais onde possa ocorrer concentração de cargas com

características pontiformes, como cofres, estantes ou equipamentos pesados, pode ser necessário um reforço adicional.

Nas áreas internas, os principais tipos de materiais usados para as placas do sistema de piso elevado são: o de aço com miolo de concreto celular, o policarbonato, laminados de madeira e plásticos. Nos pisos elevados para áreas externas, tais como jardins, piscinas, etc., há a predominância do uso das placas de concreto. Essas placas são pré-moldadas, com dimensões 60cm x 60cm x 4cm ou 80cm x 80cm x 4cm e usam composições convencionais de concreto (cimento, água, areia e brita), com alto teor de argamassa e com resistência à compressão em torno de 20 MPa na sua composição. A armadura é constituída por uma tela de aço na face inferior da placa (aquela que será tracionada).

O sistema de apoio das placas cimentícias usadas nos estudos deste doutorado é composto por apoios cilíndricos de PVC, preenchidos com areia para transmitir as ações ao solo e absorver impacto. Na figura 3.3 pode-se ver o sistema piso elevado com placas de concreto e os cilindros de apoio.

Figura 3.3 – Placas cimentícias para piso elevado apoiadas nos cilindros de PVC com areia.
(fonte: www.concretif.com.br)

Como se viu, as placas cimentícias têm apenas quatro centímetros de espessura, assim, a camada de cobrimento de concreto da armadura metálica é muito pequena, podendo

comprometer a durabilidade do painel. A figura 3.4 ilustra a situação da espessura da camada de cobrimento da armadura:

Figura 3.4 - Situação da placa cimentícia para piso elevado relacionada à espessura da camada de cobrimento da armadura.

Nesse caso, a substituição da armadura metálica por tela de fibra de vidro seria uma forma de contornar o problema da pequena durabilidade das placas em decorrência da pequena espessura da camada de cobrimento da tela de aço.

3.2.2) Requisitos a serem cumpridos pelas placas

Segundo a ABNT EB – 2101: Pisos Elevados^{xix} as placas de piso podem ser de madeira aglomerada de alta densidade, madeira aglomerada de alta densidade encapsulada em aço ou em formada exclusivamente de aço. Ou seja, a norma não cita as placas cimentícias, porém, na ausência de uma norma específica, os fabricantes de placas cimentícias para piso elevado têm tomado as determinações da EB – 2101 como especificações a serem cumpridas.

O item 4.2.1.2 - *Dimensões das placas acabadas*, da EB – 2101, diz que as placas - tanto as de madeira quanto as de aço - devem ter as seguintes dimensões: 600 mm x 600 mm ou 625 mm x 625 mm, ambas com tolerância de $\pm 0,5$ mm.

A tabela 3.1 traz um resumo das exigências que a EB – 2101 faz em relação às cargas e flecha máxima admissíveis.

Tabela 3.1 - Resumo das exigências que a EB – 2101 em relação às cargas e flecha máximas admissíveis.

Tipo de Material que compõe a placa	Espessura (mm)	Carga concentrada admissível (N)	Flecha (mm)
Madeira aglomerada de alta densidade	30	1500	2,0
	40	4400	2,6
Madeira aglomerada de alta densidade encapsulada em aço		4400	3,6
Aço		4400	3,6

OBS.: O coeficiente de segurança a ser usado é 3.

3.3) Uso de tela de fibra de vidro no tratamento de juntas de alvenaria - concreto

3.3.1) As deformações da alvenaria

Medeiros (1999)^{xx} afirma que a *deformabilidade* das alvenarias pode ser entendida como a capacidade que elas possuem de manterem-se íntegras ao longo do tempo, distribuindo as tensões internas sem apresentarem perda de desempenho.

Outro fator responsável pelas deformações nas alvenarias é a variação da temperatura, pois todos os materiais, componentes e elementos de uma construção estão sujeitos a estas variações, permitindo que ocorram variações dimensionais dos mesmos, proporcionando movimentos de dilatação e contração.

As principais movimentações diferenciais ocorrem:

- em função da junção de materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica;
- exposição de elementos a diferentes solicitações térmicas naturais;
- gradiente de temperatura ao longo de uma parte da edificação.

A figura 3.5 traz uma fotografia de uma parede que apresenta uma fissura de origem térmica.

Figura 3. 5 - Parede com fissuras evidenciando a dilatação térmica da laje de cobertura.
(fonte: LIBÓRIO & MELLO^{xxi})

As ligações entre a estrutura e as paredes de vedação representam pontos passíveis de fissuração pela diferença de coeficiente de dilatação entre o concreto ou aço e o coeficiente dos componentes dos blocos. Da diferença de coeficiente de dilatação entre os materiais surgem tensões que podem causar fissuras. Uma vez que a probabilidade de ocorrerem fissuras nas alvenarias e nos encontros destas com as estruturas é grande, deve-se tomar medidas que visem prevenir a sua ocorrência.

A figura 3.6 mostra exemplos de locais onde há grande probabilidade de ocorrência de fissuras: Em (a) no encontro alvenaria-viga, alvenaria-pilar e em janelas; em b) uma sacada em balanço.

Figura 3.6 - Exemplos de locais onde há grande probabilidade de ocorrência de fissuras: Em (a) no encontro alvenaria – viga, alvenaria pilar e em janelas; em (b) uma sacada em balanço.

3.3.2) Etapas para execução do reforço nos encontros da alvenaria com lajes e vigas

Thomaz (2001, p. 236)^{xxii} afirma que, nas regiões onde há grande probabilidade da ocorrência de fissuras em decorrência das propriedades térmicas entre o concreto estrutural e o material constituinte dos blocos da alvenaria, os gradientes térmicos nas fachadas, dimensões dos panos e a flexibilidade da estrutura, deve-se reforçar a ligação com a inserção de tela metálica na argamassa de revestimento. O tratamento da ligação pilar – alvenaria pode ser vista na figura 3.7.

Figura 3.7 - Exemplo de aplicação de tela para reforço do encontro da alvenaria com pilares.
(fonte: THOMAZ, 2001, p. 221)

Para execução dessa ligação Thomaz (2001, p. 221) propõe que sejam seguidas as seguintes etapas:

- 1) Aplica-se uma camada de chapisco no substrato (concreto ou bloco);
- 2) No encontro pilar – parede fixa-se a tela de fibra de vidro com pregos ou grampos, deixando uma faixa de no mínimo 20 cm em ambos os lados, além da largura do pilar;
- 3) Aplica-se camada de emboço (ou de massa única) e faz-se a regularização.

Thomaz (2001) ainda afirma:

“reforços com telas metálicas galvanizadas devem ser previstos nas regiões das paredes sujeitas a impactos, nos encontros com platibandas, no fechamento de *shafts*, em regiões de tubulações de grande diâmetro embutidas nas paredes e em outras seções com eventuais enfraquecimentos. Nas fachadas submetidas a intensas solicitações térmicas, ou nas estruturas relativamente flexíveis, constitui uma boa prática a inserção de telas nos vértices inferiores das aberturas de janelas e nas ligações das alvenarias com a estrutura.”

3.3.3) Análise dos tipos de materiais usados para reforço

Como visto, Thomaz (2001) ressalta a importância do reforço com tela metálica galvanizada, mas alguns aspectos devem ser analisados quanto à opção por este tipo de material. Um fator importante a se ressaltar é que, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994, p. 173 e 148), a durabilidade do aço embutido no concreto ou na argamassa é garantida por meio de dois mecanismos:

- barreira;
- condição de alcalinidade.

Quanto ao mecanismo de **barreira** salienta-se que a argamassa é um material poroso por natureza. Quando se usa a tela de aço para o reforço da argamassa esta pode sofrer corrosão, ocasionada pela água e pelos gases oriundos do ambiente externo. A alcalinidade elevada (em argamassas e concretos o valor do pH é em torno de 12 ou 13) garante a criação de uma camada de óxidos em torno da armadura, chamada de *passivação*. Quando esta **condição de alcalinidade** é quebrada o aço fica exposto à corrosão, chamado de *despassivação do aço* (MEHTA e MONTEIRO, 1994, p. 160 e 170).

A perda de alcalinidade do concreto pode ocorrer em virtude de:

- lixiviação dos compostos alcalinos presentes no concreto ou argamassa como consequência da circulação de águas (infiltração por exemplo),

- reações dos compostos básicos presentes no concreto ou argamassas com os compostos ácidos presentes no meio de exposição como o dióxido de carbono (CO_2), o dióxido de enxofre (SO_2) e gás sulfídrico (H_2S).

O processo de perda de alcalinidade mais comum é a reação dos compostos básicos presentes na fase aquosa do concreto com o CO_2 presente no ar e de forma mais intensa em ambientes urbanos.

Ou seja, o hidróxido de cálcio se transforma em carbonato de cálcio, reduzindo a alcalinidade, deixando a armadura exposta à corrosão (MEHTA e MONTEIRO, 1994, p. 151).

Pelo exposto acima a tela de fibra de vidro²³ passa a ser uma opção melhor que a tela metálica no que se refere à possibilidade de corrosão e, ainda apresenta algumas outras vantagens tais como:

- facilidade de corte uma vez que pode ser feito com tesoura comum;
- a tela de fibra de vidro pode ser comercializada em rolo, mas sem precisar ser retificada, depois de cortada, como acontece com as telas de aço.

A figura 3.8 mostra a sequência das etapas para o tratamento do encontro viga-alvenaria: em (a) tem-se o encontro entre a viga e a alvenaria; (b) colocação da tela de fibra de vidro; (c) impregnação com argamassa (neste caso argamassa colante); (d) encontro viga-alvenaria já com acabamento de reboco.

²³ A tela de fibra de vidro para este tipo de aplicação deve receber proteção contra os álcalis do cimento Portland ou ter características AR.

Figura 3.8 - Seqüência das etapas para execução do reforço do encontro viga-alvenaria: em (a) tem-se o encontro entre a viga e a alvenaria; (b) colocação da tela de fibra de vidro; (c) impregnação com argamassa (neste caso argamassa colante); (d) encontro viga-alvenaria já com acabamento de reboco.
(fonte: texiglass)

3.4) Substituição das armaduras de aço em ambientes agressivos

As fibras de vidro têm grande potencial na substituição das armaduras de aço em estruturas de concreto armado, e estão sendo usadas na forma de telas ou como barras pultrudadas (GFRP).

Tavares (2006), afirma que, dentre as principais aplicações, destaca-se o uso de GFRP em vigas de suporte onde há um contato direto com a água (figura 3.9 a); como armadura de tabuleiro de pontes, mediante a grande agressividade do meio a que as pontes estão sujeitas devido o sal colocado sobre a neve (figura 3.9 b).

Figura 3.9 – Exemplos de aplicação das fibras de vidro em ambientes agressivos. (a) estrutura em contato com água; (b) Rebars usados em tabuleiros de pontes (EUA). (Fonte: ACI 440.1R-03^{xxiii})

Embora a fibra de vidro tenha uma resistência à tração maior que a do aço, há um fator muito importante a ser levado em conta é que o módulo de elasticidade (E) dos *rebars*, bem como das telas de fibra de vidro, que gira em torno de 40 GPa, representando uma deformação bem superior àquela apresentada pelo aço. Nesta tese se discute mais detalhadamente essa questão nos capítulos seguintes e, por meio de verificação experimental, estudou-se de que forma a armadura de aço CA-50 se relaciona com a armadura de fibra de vidro.

Outra aplicação importante para as telas e barras pultrudadas de fibra de vidro, quanto à durabilidade, é em situações nas quais o cobrimento da armadura metálica não pode ser obtido, em decorrência da pequena espessura dos elementos construtivos. Esse tipo de situação já foi discutido há pouco, quando se analisou as placas cimentícias para piso elevado, mas tem maior relevância quando se trata do sistema construtivo em *argamassa armada*. No capítulo seguinte se analisa o princípio construtivo da *Argamassa Armada*, sua relevância na construção civil, seu histórico (breve) e as variáveis que interferem na sua durabilidade.

CAPÍTULO 4

A argamassa armada

4.1) Preâmbulo

Segundo Agnesini (1988)^{xxiv}, a argamassa armada, cuja origem é o ferrocimento, material criado por Joseph Louis Lambot, na França, foi introduzida no Brasil no início dos anos 60, como uma tecnologia alternativa ao concreto armado e protendido e às estruturas de aço.

Uma definição bastante simplificada, porém precisa, do que vem a ser a *argamassa armada* é de que se trata de uma associação de argamassa (cimento, areia, água, aditivos e/ou adições), com uma armadura de aço constituída por fios de pequeno diâmetro e pouco espaçados entre si, tais como as telas eletrosoldadas.

O princípio que norteia os projetos de estruturas em argamassa armada é de que as paredes destas devem ser esbeltas, para garantir leveza, mas com rigidez adequada, que deve ser obtida por meio de formatos geométricos com grande inércia. Hanai(1992)^{xxv}, descreve de maneira bastante didática este princípio, usando com exemplo uma folha de papel.

Uma folha de papel apresenta resistência suficiente para ser manipulada, sem rasgar. Entretanto, não tem rigidez suficiente para suportar cargas perpendiculares ao seu plano. Para ganhar rigidez, ela deve ser dobrada ou encurvada, e, além disso, receber ajuda de elementos de travamento ou de limitação de deformações que possam alterar sua forma. As folhas dobradas ganham rigidez e podem sugerir formas estruturais a serem aplicadas, por exemplo, em coberturas de elementos delgados de argamassa armada.

Os elementos de argamassa armada, pela sua pequena espessura e versatilidade, podem adaptar-se a diferentes formas, sendo usados desde em grandes estruturas como cascas

de coberturas e lajes nervuradas, ou ainda, como abrigos para passageiros no transporte urbano, caixas d'água, mobiliário, piscinas, piso elevado e pré-moldados diversos.

As figuras 4.1 de **a** a **d** trazem fotografias de edificações que usam elementos delgados de argamassa armada.

Figuras 4.1 (de a a d) – Fotografias que ilustram a grande versatilidade das formas da argamassa armada. Em sentido horário: cobertura e paredes de uma escola infantil, cobertura industrial, sanitário público e em um reservatório de água. (Fonte: HANAI, 1992)

4.2) Importância da leveza dos componentes da construção civil

A construção civil, para ser competitiva no mercado contemporâneo, deverá romper alguns paradigmas que a prendem a um modo de produção extrativista e artesanal. A industrialização de elementos estruturais e de vedação é um caminho que pode levar a construção civil a condições de produtividade que só são obtidos por meio da produção em

série. Desta forma, o local onde a edificação será criada (obra) passará a ser apenas um pátio de montagem de peças pré-fabricadas que serão transportadas da fábrica até esse local.

Por outro lado, dependendo das dimensões e do peso dos elementos que comporão a edificação, o transporte da fábrica ao local de montagem pode se tornar bastante difícil e, muitas vezes, impossível. Dependendo das dimensões das peças, o transporte pode requerer carretas longas a tal ponto que a manobra em vias estreitas ou com curvas de raio pequeno seja quase, senão impossível, de ser feita. Ou ainda, dependendo do peso próprio destes elementos, torna-se necessário o uso de equipamentos de grande porte (e normalmente dispendiosos) para seu içamento. Pelo exposto, evidencia-se que é desejável que os elementos construtivos industrializados tenham dimensões e peso que permitam um transporte econômico.

A fase de projeto passa a ser preponderante na viabilização dessa industrialização, pois é durante essa fase que se deve tomar partido da rigidez e resistência obtida por meio de uma geometria e de formas de estrutura adequadas.

A argamassa armada é um sistema construtivo que toma partido de uma forma bastante intensa da geometria das peças estruturais, para obter elementos com elevada rigidez e resistência, embora use espessuras bastante pequenas, girando em torno de 20 mm. O sistema é composto de placas que proporcionam praticidade ao sistema, pois a leveza dos componentes aliada à possibilidade de industrialização do material propicia rapidez em todo o processo de construção, desde a fabricação, passando pelo transporte, até a montagem.

4.3) Breve histórico da argamassa armada

Em 1824, Joseph Aspdin patenteou o aglomerante mais popular do mundo: o cimento Portland. Nas mãos de Lambot (1856) o cimento ganhou a forma de *fercement* ou ferrocimento, material com o qual se podia produzir componentes construtivos pré-fabricados,

capazes de substituir a madeira, segundo a sua idéia inicial. Posteriormente, Monier aproveita aquelas propriedades do ferrocimento na produção seriada de componentes pré-fabricados para pequenas obras, dando origem ao desenvolvimento do concreto armado (CAMPOS, 2002^{xxvi}).

Depois de Lambot, contribuíram para a retomada do uso do conceito de argamassa armada, as notáveis obras de Pier Luigi Nervi, na Itália, a partir de 1943 (GIONGO, 1990)^{xxvii}.

As figuras 4.2 e 4.3 ilustram duas obras emblemáticas em argamassa armada, por ele projetadas.

Figura 4.2 - Pavilhão de exposições em Turin, Itália, projetado por Pier Luigi Nervi em 1948.
(Fonte: HANAI, 1992)

Figura 4.3 - Palacete de esportes - Nervi Palazzo, em Roma, Itália, projetado por Pier Luigi em 1957.
(Fonte: HANAI, 1992)

A partir do início dos anos 60, o uso das estruturas laminares de concreto ou ferrocimento foram declinando no cenário europeu, motivado pela elevação dos custos de

mão-de-obra para armaduras, escoramentos e fôrmas, resultando em custos incompatíveis aos obtidos nas estruturas armadas convencionais, mais simples, embora pesadas e igualmente funcionais (CAMPOS, 2002).

Em 1960, Dante Martinelli e Frederico Schiel desenvolveram projetos de coberturas para edificações no *campus* da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, usando telas de fios de aço entrelaçados. A partir daí, diversas pesquisas se realizaram, destacando-se as lajes de Lafael Petroni em 1971 e vigas de argamassa armada por Machado Junior em 1980, além de piscinas e reservatórios (GIONGO, 1990).

Com isso, consolidou-se o que se tornou conhecido como *Grupo de São Carlos*, com a contribuição de engenheiros pesquisadores tais como João Bento Hanai, Mounir El Debs, Marcos Agnesini, José Samuel Giongo, Laércio Ferreira e Silva, Jéferson Libório, Ângelo Rubens Migliore Junior e Osny Pellegrino Ferreira.

O *Grupo de São Carlos* buscou adaptar às condições locais o conceito de ferrocimento original de Nervi, empregando taxas de armadura entre 250 kg/m^3 e 300 kg/m^3 e um consumo de cimento nos concretos de aproximadamente 700 kg/m^3 , ao invés de taxas de armadura em torno de 500 kg/m^3 e consumo de cimento de aproximadamente 1000 kg/m^3 adotado por Nervi (CAMPOS, 2002).

Paralelamente ao Grupo de São Carlos, destacam-se os trabalhos de João Filgueiras Lima (Lelé) que usou a argamassa armada em larga escala no Brasil. Por volta de 1980, com a cooperação de Frederico Schiel, da EESC, Lelé estabeleceu os primeiros parâmetros para industrialização da argamassa armada. Posteriormente, empregou com grande êxito, a argamassa armada na produção de escolas e de infra-estrutura urbana no Rio de Janeiro, tornando-se seu maior divulgador no Brasil (AGNESINI, 1988; CAMPOS, 2002).

Em 1989 o Brasil ganhou sua norma técnica para projeto e execução em argamassa armada, a ABNT NBR 1259.

Foi no início dos anos 90 que a argamassa armada ganhou dimensão nacional, na implantação pelo governo federal dos CAIC 's – Centro de Assistência Integrado à Criança - em todo o território nacional, tendo como ponto de partida os projetos de Lelé. O projeto inicial previa que cada CAIC deveria ter cerca de 4.000 m² de área construída, reunindo escola, creche, centro médico e ginásio (CAMPOS, 2002). A figura 4.4 apresenta uma fotografia do ginásio de esportes dos CAIC's em construção.

Figura 4.4 – Foto da construção do ginásio de esportes dos CAIC's (Centro de Assistência Integrado à Criança) usando argamassa armada. (Fonte: HANAI, 1992)

Ainda, segundo CAMPOS (2002), em março de 1992, o arquiteto João Filgueiras Lima e sua equipe abandonaram o programa, alegando problemas de natureza política, numa altura em que dezenas de grandes fábricas de argamassa armada já estavam em vias de funcionamento no país. Para restabelecer rapidamente a credibilidade técnica do programa frente à opinião pública, o governo federal convocou os professores e especialistas do *Grupo de São Carlos*, para dar suporte técnico com auditoria e consultoria. Porém, “aqueles que representavam o maior centro de excelência em argamassa armada do país, o Grupo de São Carlos, (...) desaprovaram a escolha de uma tecnologia única para o programa a ser implantado num país com as dimensões continentais como o Brasil” (CAMPOS, 2002).

Desta forma, o programa estatal que deveria ser o grande difusor da tecnologia da argamassa armada no Brasil – os CAIC's – valeu para contra indicar o sistema no meio técnico, pela falta de planejamento e do uso da tecnologia correta.

Finalmente, o mesmo sistema construtivo foi usado na construção de todos os CAIC's em todo território brasileiro, sem respeitar as condições climáticas, disponibilidade de material e mão-de-obra especializada, sem levar em consideração as ressalvas feitas por diversos especialistas em argamassa armada, entre eles o *Grupo de São Carlos* (CAMPOS, 2002). Como conseqüências, vieram as patologias inerentes às condições de produção inadequadas e a falta de conhecimento técnico e de controle, tornando o sistema de argamassa armada sinônimo de pequena durabilidade.

Hoje, o resgate do conceito de argamassa armada no Brasil tem sido feito unindo o conhecimento adquirido pelo *Grupo de São Carlos* e pelo arquiteto João Filgueiras Lima e os novos conhecimentos sobre os materiais, bem como novos produtos disponíveis tais como os aditivos superplastificantes, os látexes poliméricos, a sílica ativa, as fibras sintéticas, de vidro e de aço. Os autores e pesquisadores precursores do sistema na atualidade têm usado os microconcretos de alta resistência, com pequenas relações água/cimento (a/c) – a NBR 1259: 1990 - Projeto e execução de argamassa armada^{xxviii} recomenda traços com relação $a/c \leq 0,45$) adicionam polímero, sílica ativa que conferem a estes maiores resistências mecânicas, mas, principalmente, maior durabilidade.

4.4) A argamassa armada e a durabilidade

O aspecto mais relevante que pode tornar os elementos estruturais em argamassa armada susceptíveis à corrosão é o pequeno cobrimento da armadura. Enquanto, para execução de estruturas convencionais de concreto armado, a NBR 6118:2003 – *Projeto de Estruturas de Concreto*^{xxix}, preconiza cobrimentos que vão de 20 mm (concreto armado de

laje em classe de agressividade I para agressividade fraca e risco de deterioração da estrutura insignificante) até 50 mm (concreto armado de vigas e pilares com classe de agressividade IV para agressividade muito forte e risco de deterioração da estrutura elevado²⁴), a argamassa armada trabalha com espessuras de cerca de 20 mm. Então o cobrimento de uma armadura metálica na argamassa armada gira em torno de 10 mm.

Assim, as pequenas fissuras de retração hidráulica, a carbonatação e o ataque da armadura por cloretos ou sulfatos seriam patologias danosas, deteriorando em pouco tempo as estruturas com armadura metálica com camada de cobrimento pequeno. Porém, o *estado da arte* sobre a durabilidade do concreto preconiza que não é a presença de um ambiente agressivo que determina o ataque à estrutura do concreto armado e sim a possibilidade destes agentes agressivos atacarem o concreto e sua armadura, pois a porosidade do concreto está diretamente ligada a esta durabilidade.

Os concretos com uma relação a/c muito alta, superior a 0,5, é considerado um concreto com muitos vazios e com uma microestrutura muito aberta e que possibilita a penetração dos agentes agressivos ao seu interior, podendo atingir a armadura metálica (AİTCIN, 2000).

Em relação à carbonatação, para um concreto usual com uma relação a/c de 0,60, uma profundidade de carbonatação de 15 mm é atingida após 15 anos, enquanto a mesma profundidade só seria atingida após 100 anos caso o concreto tenha relação a/c de 0,45 (NEVILLE, 1997)^{xxx}.

Rossignolo (2003)^{xxxi}, estudando concretos leves de alto desempenho modificado com polímero estireno-butadieno (SB), pôde comprovar que as amostras que foram modificadas com o polímero apresentaram menor absorção de água, maior resistência à

²⁴ Não se considera aqui o concreto protendido, cujo cobrimento chega a 55 mm, pois este está fora do escopo deste trabalho.

penetração de cloretos e resistência aos ácidos sulfúrico, clorídrico e acético, comparadas àquelas que não receberam o polímero em sua composição.

A sílica ativa, as cinzas volantes e os fileres podem tornar o concreto mais durável e resistente, uma vez que estes, pelo seu pequeno diâmetro, preenchem os espaços existentes entre os produtos da hidratação do cimento, tornando-o mais denso e, conseqüentemente, menos permeável. Porém, Silva (2002, p. 119)^{xxxii} afirma que “apesar da adição de sílica ativa provocar uma descontinuidade nos poros, reduzindo a permeabilidade dos concretos e argamassas, verifica-se que todos os compostos com adição de sílica ativa apresentam coeficiente de carbonatação maiores que os composto sem sílica ativa.” Portanto, há que se ter cuidado em relação à quantidade de material com propriedades pozolânicas (cinza volante, sílica ativa ou metacaulinita) adicionadas, pois estes, reagindo com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , podem representar uma considerável diminuição do valor de pH do concreto, podendo despassivar a armadura.

Quanto à presença de microfissuras - em sua maioria causadas por um processo de cura inadequado, causando retração hidráulica do concreto - a adição de pequenas quantidades de fibras discretas (de 0,5% a 2% em volume) a estes concretos pode controlar esta patologia, requerendo, porém, que sejam seguidas de um processo de cura adequado.

Outra forma de viabilizar o uso da argamassa armada em ambientes agressivos, além do uso de microconcretos de alto desempenho, é por meio do uso de aço inoxidável ou outro material não susceptível à corrosão de agentes agressivos, armaduras não metálicas como, por exemplo, a fibra de vidro, nas formas de telas e barras de GFRP, sobre a qual versa este trabalho.

CAPÍTULO 5

Método utilizado no desenvolvimento do trabalho

5.1) Preâmbulo

A **primeira etapa** dos trabalhos experimentais tratou da análise da eficiência das telas de fibra de vidro impregnadas com resina PVC encontradas no mercado, para, a partir daí, estudar os requisitos a serem cumpridos pela tela impregnada desenvolvida no trabalho. Também foram analisadas as telas de fibra de vidro AR, verificaram-se as suas virtudes e deficiências para tomá-la como padrão.

Para isso ser possível, foi necessário adotar um processo de envelhecimento acelerado e o método escolhido foi o proposto por Litherland et al. (1981)^{xxxiii}, que será descrito mais à frente. A opção por esse método de envelhecimento acelerado deveu-se à facilidade de instalação e utilização do equipamento, mostrando-se ser adequado ao estudo do ataque alcalino às fibras de vidro. As virtudes desse método é que ele possibilita a verificação da intensidade da degradação do material por meio de observações de ordem macroscópica e, ainda, pelo fato do método ser referendado por pesquisadores no mundo todo que o utilizam no desenvolvimento de suas pesquisas²⁵.

É importante ressaltar que, no caso deste estudo, as perdas das propriedades mecânicas da fibra de vidro pelo ataque alcalino do cimento Portland não estão relacionadas às variáveis externas, tais como a incidência de vento, de raios U.V., ciclos de molhagem e secagem, por exemplo, e sim à degradação da fibra de vidro que se dá pela reação do Ca(OH)_2 com a sílica da fibra. Portanto, acelerar o envelhecimento significa aumentar a velocidade de formação da Portlandita e disponibilizar uma maior quantidade dela para reagir com a fibra.

Uma vez conhecidas as propriedades das fibras analisadas sob a ótica da degradação, passou-se a estudar as alternativas de aplicações para viabilizar o seu uso em

²⁵ As pesquisas de Litherland et al. foram utilizadas nos trabalhos de Purnell et al (1999 e 2000), Zhang et al. (1997), Bartos & Zhu (1996 e 1997), Pardela & Del Aguila (1992), entre outros, além de basear a redação da ASTM C 1185-96 e outras normas.

matrizes de cimento Portland, que representa a **segunda etapa** de experimentos. Ou seja, se na primeira etapa a variável analisada foi a durabilidade da fibra de vidro frente ao meio alcalino (porcentagem de degradação da fibra em relação à *amostra padrão*), na segunda etapa, a variável analisada foi o desempenho mecânico do elemento composto por uma matriz cimentícia com fibra de vidro, quando solicitado às ações às quais será submetido quando em uso.

A figura 5.1 traz um fluxograma que resume as etapas do desenvolvimento experimental.

Figura 5.1 – Resumo das etapas do desenvolvimento experimental do trabalho

5.2) Depuração estatística dos resultados

A depuração dos resultados obtidos experimentalmente foi feita usando-se o *critério de Chauvenet* no qual, para uma série de medidas, a probabilidade de ocorrência de um desvio de valor “x” é menor do que $1/2n$ (onde n é o número de medidas) (TAKEYA, 2000)^{xxxiv}. Por exemplo, se para avaliar a evolução da resistência mecânica das dosagens de concretos, forem usados seis corpos-de-prova por idade, cujos valores são dados pela tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Exemplo de depuração estatística do resultado de ensaio de seis corpos-de-prova de concreto pelo critério de *Chauvenet*.

Corpo-de-prova	Resistência (MPa)	Desvio (%)
1	25,6	3,8 <8
2	25,0	6,0 <8
3	25,9	2,6 <8
4	25,8	3,0 <8
5	32,0	20,3 >8
6	25,2	5,0 <8
Média	26,6	

Então, $n = 6$, portanto, $P_x = 1/(2 \times 6) = 1/12 = 0,08$ (desvio de $\pm 8\%$). Assim, rejeitam-se aqueles valores que tenham desvio máximo acima de $\pm 8\%$ em relação à média dos seis resultados, ou seja, o resultado obtido no corpo-de-prova nº 5 deve ser descartado. A nova média passará a ser calculada com cinco resultados ($n = 5$) e, portanto, altera-se o valor de P_x para 0,1 (1/10) o que representa um desvio máximo de $\pm 10\%$, como por exemplo na tabela 2.

Tabela 5.2 – Exemplo de depuração estatística do resultado de ensaio de cinco corpos-de-prova de concreto pelo critério de *Chauvenet*.

Corpo-de-prova	Resistência (MPa)	Desvio (%)
1	25,6	0,4 < 10
2	25,0	2,0 < 10
3	25,9	1,6 < 10
4	25,8	1,2 < 10
6	25,2	1,2 < 10
Média	25,5	

5.3) Primeira etapa do desenvolvimento experimental:

Análise da durabilidade da fibra de vidro frente ao meio alcalino do cimento Portland

5.3.1) Processo de envelhecimento acelerado

O processo de envelhecimento acelerado usado foi proposto por Litherland et al. (1981) que, após extensivos estudos, relacionou os resultados obtidos com amostras que haviam sido submetidas a envelhecimento sob exposição natural, nas condições climáticas do Reino Unido, com aqueles obtidos com amostras submetidas a vários gradientes de temperaturas (de 40°C a 80°C). Da comparação da resistência mecânica das amostras submetidas ao processo de envelhecimento natural com aquelas submetidas ao processo de envelhecimento acelerado, nas diversas idades, os autores puderam relacionar a correspondência existente entre o número de dias de envelhecimento acelerado a uma determinada temperatura e o número de anos de exposição ao ambiente natural.

Na pesquisa de LITHERLAND et al. (1981), os autores chegaram a propor, baseando-se nas condições climáticas de várias regiões do mundo (Bombaim, Texas, etc.), uma relação a ser usada para correlacionar o número de dias de envelhecimento acelerado, e o

número de anos de exposição natural dessas regiões. Nesta tese, viu-se por bem não adotar esta correspondência pelos seguintes motivos:

- 1) a correlação usada é válida apenas para a temperatura de 50°C, diferente do valor de temperatura adotada na realização dos procedimentos experimentais deste trabalho (65°C)²⁶;
- 2) das regiões relacionadas não havia nenhuma localizada no Brasil ou na América do Sul, ou com condições climáticas semelhantes às brasileiras;
- 3) a ASTM C 1185-96, que foi baseada nesses estudos, não faz a correlação entre dia de envelhecimento acelerado e tempo de exposição em ambiente natural. Ou seja, usa o número de dias de envelhecimento acelerado, a uma temperatura, para definir a susceptibilidade ou não de um material à degradação.

O equipamento usado no processo de envelhecimento acelerado é composto de uma caixa térmica de aço inoxidável, recoberta com uma camada de resina poliuretana e tampa com vedação. O aquecimento foi feito por uma ou mais resistências elétricas ligadas a um termostato regulado para estabilizar a temperatura em 65°C ($\pm 3^\circ\text{C}$), sendo o monitoramento feito por meio de termostatos e termômetros colocados em vários pontos da caixa. A figura 5.2 apresenta esquematicamente o equipamento de envelhecimento acelerado.

²⁶ Segundo Litherland et al (1981), cada dia de exposição ao processo de envelhecimento acelerado à temperatura de 65 °C corresponde a um ano de envelhecimento natural sob condições climáticas do Reino Unido.

Figura 5.2 – Representação esquemática do equipamento de envelhecimento acelerado usado na pesquisa

Cada amostra foi colocada em um recipiente de plástico e o aquecimento até a temperatura desejada foi feito por *banho maria*. Com esse procedimento, evitou-se o contato entre a água usada no processo de envelhecimento acelerado de um tipo de amostra com a de outro tipo, o que poderia ser caracterizado como uma *contaminação* das amostras e, conseqüentemente, uma interferência na qualidade dos resultados. A figura 5.3 apresenta, esquematicamente, as amostras colocadas dentro do equipamento de envelhecimento acelerado.

Figura 5.3 – Representação esquemática das amostras colocadas dentro do equipamento de envelhecimento acelerado

5.3.2) Tipos de fibra analisadas

Primeiramente, foram analisadas amostras de fibra de vidro disponíveis comercialmente no mercado nacional, procurando-se conhecer as qualidades e deficiências de cada um dos produtos. Para isso, usou-se uma tela cuja fibra de vidro tem propriedades AR e uma outra tela de fibra de vidro convencional impregnada com resina PVC (designada neste trabalho como *tela comercializada impregnada com PVC*).

As tabelas 5.3 e 5.4 trazem as propriedades das fibras de vidro AR e da fibra de vidro usadas na pesquisa:

Tabela 5.3 – Principais propriedades da fibra de vidro *AR*

Propriedade	Unidade	Vidro AR
Densidade	g/cm ³	2,68
Resistência à tração (filamento)	MPa	3500
Módulo de elasticidade	GPa	72
Alongamento na carga de ruptura	%	4,5

(Fonte: Vetrotex – Saint Gobain)

Tabela 5.4 – Principais propriedades da fibra de vidro *sem boro*²⁷ comparadas à fibra tipo E

Propriedade	Unidade	Sem boro	Vidro E
Densidade	g/cm ³	2,62	2,52 - 2,62
Resistência à tração (filamento)	MPa	3100 - 3800	3100 - 3800
Módulo de elasticidade	GPa	80 - 81	76 - 78
Alongamento na carga de ruptura	%	4,6	4,5 - 4,9

(Fonte: Owens Corning)

²⁷ A fibra de vidro sem boro, é uma versão diferente da fibra de vidro tipo E, sem características álcali-resistente, comercializada pela Owens Corning com o nome comercial de *Advantex*.

A partir dos resultados obtidos dos ensaios das telas com fibras AR e *tela impregnada com PVC comercializada*, desenvolveu-se um plastissol²⁸ de PVC nas dependências do Laboratório de Desenvolvimento de Produtos da *BRASKEN*, na cidade de São Paulo. Nesse desenvolvimento usou-se um *roving* de fibra sem boro com 600 TEX²⁹ com objetivo de obter os seguintes parâmetros: impregnação de PVC flexível, boa ligação fibra-resina, uma viscosidade que permita a imersão da fibra e a total impregnação dos filamentos e uma temperatura de cura baixa.

As amostras foram preparadas efetuando-se a impregnação das fibras com o plastissol (representando aproximadamente 60% do peso total), e tratamento térmico em estufa à 130°C por dois minutos. O plastissol foi submetido à câmara de vácuo até que as bolhas de ar maiores (incorporadas durante a mistura dos componentes) fossem retiradas.

Uma vez obtida a composição que satisfizesse os requisitos citados acima, foram produzidas amostras de fibra impregnadas para que estas pudessem ser ensaiadas.

5.3.3) Ensaios realizados

a) Ensaio à tração direta

i) Ensaio das telas de fibra de vidro

Os ensaios à tração direta (simples) das telas foram feitos no Laboratório de Geotextil do Departamento de Geotecnia da EESC-USP, segundo os procedimentos da ASTM D 6637^{xxxv}. A largura das amostras foi padronizada em 10 cm, independentemente do desenho

²⁸ Plastissol é a denominação dada às dispersões de resinas de PVC, obtidas pelos processos de polimerização em emulsão ou micro-suspensão, em líquidos orgânicos, notadamente plastificantes que, de acordo com a aplicação, podem ser formulados para se obter características como atoxicidade, resistência à água, óleos, fungos, entre outras. (RODOLFO Jr.; NUNES; ORMANJI. Tecnologia do PVC. Pro editores. São Paulo. 2002)

²⁹ TEX unidade usada na indústria de fibras e derivados que corresponde a um grama por quilômetro (g/km)

da tela de FV analisada, e o comprimento dessas amostras variaram entre 80 cm e 100 cm, dependendo do tamanho do lote recebido e da disponibilidade de material.

A garra utilizada nesse ensaio foi a de tipo rolete, na qual a tela permanece presa pelo atrito existente entre as superfícies das telas, obtido pela camada sobre camada das voltas do rolete. A força foi aplicada programando-se a máquina para uma velocidade de 25 mm/min.

A figura 5.4 traz a representação esquemática do dispositivo de ensaio de tração simples nas telas de fibra de vidro estudadas.

Figura 5.4 – Representação esquemática do dispositivo de ensaio de tração simples nas telas de fibra de vidro estudadas. (a) amostra da tela; (b) tela colocada na garra tipo rolete com n voltas; (c) vista frontal da tela colocada na garra rolete nas duas extremidades e (d) vista lateral da tela colocada na garra rolete nas duas extremidades.

A figura 5.5 mostra fotografias da realização do ensaio de tração simples das telas de fibra de vidro.

Figura 5.5 – Fotografia do dispositivo de ensaio de tração simples nas telas de fibra de vidro estudadas.

De cada tipo de tela estudada, separaram-se grupos de amostra da seguinte maneira:

- Dez exemplares sem sofrer envelhecimento acelerado, chamados de *Amostras padrão*;
- Trinta exemplares foram submetidos a processo de envelhecimento acelerado em solução saturada de hidróxido de cálcio, com pH entre 13 a 14, à 65°C (± 3), sendo retirados após sete dias de exposição dez exemplares que correspondiam à amostra *7 d*, o mesmo acontecendo aos quatorze e vinte e um dias, originando as amostras *14 d* e *21 d*.

Depois de retiradas da solução saturada de hidróxido de cálcio, cada amostra foi lavada em água corrente para que se retirasse a solução remanescente na sua superfície, ficando reservadas até o dia do ensaio.

ii) Ensaio dos fios de fibra de vidro

Os ensaios à tração direta nos fios foram feitos no laboratório da *Owens Corning do Brasil* e a realização deste tipo de ensaio foi de grande importância no momento em que se desenvolvia o plastissol de PVC para ser usado na impregnação das fibras. Assim, comprovada a eficiência da resina nos fios, foi fabricada a tela de fibra de vidro e impregnada com o PVC desenvolvido. Para esse ensaio, usou-se uma garra tipo caracol, que elimina o uso

de mordente e a concentração de tensão em arestas vivas que podem interferir na qualidade dos resultados obtidos. A figura 5.6 traz fotografias deste tipo de garra.

Figura 5.6 – Fotografias da garra caracol usada nos ensaios à tração simples das fibras de vidro.

Tal como realizado na análise das telas, as amostras dos fios estudadas foram separadas em vários grupos de amostras, divididos da seguinte maneira:

- dez exemplares sem sofrer envelhecimento acelerado (*Amostras padrão*);
- trinta exemplares submetidos ao processo de envelhecimento acelerado em solução saturada de hidróxido de cálcio, sendo retirados após sete dias de exposição dez exemplares que correspondiam à amostra *7 d*, o mesmo acontecendo aos quatorze e vinte e um dias, originando as amostras *14 d* e *21 d*.

O procedimento de lavar as fibras logo após serem retiradas da solução saturada de hidróxido de cálcio em água corrente, foi seguido tal como descrito para amostras de tela de fibra de vidro. A seguir as amostras foram ensaiadas à tração simples, com velocidade de aplicação de força de 50 mm/min.

b) Ensaio à flexão das placas delgadas

i) Moldagem das amostras

O processo de envelhecimento acelerado imergindo as fibras analisadas em solução de hidróxido de cálcio foi bastante importante para determinação da susceptibilidade destas fibras à degradação, mas julgou-se que seria interessante analisar a durabilidade das fibras de vidro no próprio ambiente alcalino do cimento Portland. Nesse ambiente, durante a hidratação do cimento Portland, a produção de Ca(OH)_2 se dá paulatinamente, ao mesmo tempo em que são produzidos os outros produtos da hidratação, tais como a etringita e o silicato hidratado de cálcio, bem como se dá a liberação de calor, mais ou menos intenso dependendo da fase de hidratação. Assim, pôde-se garantir que a fibra de vidro usada em matrizes de cimento Portland também fosse avaliada em relação ao seu desempenho frente a todos os fenômenos típicos da hidratação do cimento Portland.

Para cada tipo de tela moldaram-se placas cimentícias com as dimensões de 40 cm x 45 cm e 1,2 cm de espessura, recebendo uma tela em cada uma das faces: inferior e superior. A figura 5.7 mostra, esquematicamente, como cada placa foi produzida.

Figura 5.7 - Representação esquemática das placas cimentícias reforçadas com as telas analisadas

A figura 5.8 traz fotografias mostrando as etapas de moldagem das placas cimentícias.

Figura 5.8 - Fotografias mostrando as etapas de moldagem das placas cimentícias. (a) fôrma com a tela analisada ao fundo; (b) aplicação do microconcreto; (c) colocação da tela analisada na face superior na fôrma e (d) Placas cimentícias já com acabamento.

Nas placas cimentícias moldadas usou-se um microconcreto que tinha o seguinte traço

1 : 0,1 : 0,9 (em massa)

(cimento : areia quartzosa #0,15mm : areia quartzosa #4,8mm)

O microconcreto recebeu cerca de 1% da massa de cimento de aditivo superplastificante (SP) e relação água/aglomerante usada foi 0,4.

O cimento usado foi o CP V ARI, pelo fato deste ser composto quase que totalmente por clínquer, liberar grande quantidade de calor de hidratação e ter grande quantidade de C_3S em sua composição, fazendo com que ele produza uma grande quantidade de Portlandita na sua hidratação, representando, assim, o caso mais crítico em relação a durabilidade das fibras de vidro.

Após um período de sete dias de cura em câmara úmida, as placas foram cortadas, seguindo o determinado pela ASTM 947/89^{xxxvi}, em amostras de 5 cm x 35 cm, tomando-se seis delas como *amostra padrão* (sem envelhecimento acelerado) e as demais submetidas a processo de envelhecimento acelerado, sendo imersas em água comum que estavam em caixas plásticas separadas por tipo de amostra. As caixas plásticas contendo as amostras foram imersas à 65°C e retiradas, após sete dias de exposição, seis amostras chamadas *7 d*, o mesmo acontecendo aos quatorze e vinte e um dias, respectivamente, originando seis amostras *14 d* e seis amostras *21 d*. A seguir as amostras foram ensaiadas à flexão segundo os procedimentos descritos pela ASTM 947/89.

ii) Descrição do dispositivo de ensaio

A figura 5.9 traz uma representação esquemática do dispositivo para ensaio à flexão em quatro pontos de acordo com as especificações da ASTM C 947/89. A velocidade de aplicação de força foi de 5 mm/min.

Figura 5.9 – Representação esquemática do dispositivo de ensaio de flexão em quatro pontos segundo ASTM C 947/89 (neste trabalho $L = 33$ cm).

A figura 5.10 traz fotografias mostrando o dispositivo de ensaio à flexão das placas esbeltas segundo ASTM C 947/89.

Figura 5.10 – Fotografias mostrando o dispositivo de ensaio à flexão das placas esbeltas usado nos trabalhos segundo ASTM C 947/89.

A norma ASTM C 947/89, prevê o cálculo da tensão limite de proporcionalidade elástica, aqui chamada de **LOP (MPa)**, que é obtida pela seguinte fórmula:

$$\text{LOP} = F_e \cdot L / b \cdot d^2 \quad (5.1)$$

sendo:

F_e é a força obtida no ponto em que a curva força-deslocamento desvia de sua linearidade (N);

L é o maior vão do equipamento de ensaio (mm). (Na realização dos ensaios deste trabalho adotou-se $L = 320\text{mm}$);

b é a largura da amostra da placa (mm);

d é a espessura da amostra da placa (mm)

A norma também prevê o cálculo do módulo de ruptura, **MOR (MPa)**, que é obtida pela seguinte fórmula:

$$\text{MOR} = F_{\max} \cdot L / b \cdot d^2 \quad (5.2)$$

sendo:

$F_{\max}$ é a máxima força obtida pela amostra (N).

L é o maior vão do equipamento de ensaio (mm). (Nestes ensaios $L = 320\text{mm}$)

b é a largura da amostra da placa

d é a espessura da amostra da placa

Os pontos P_e e $P_{\max}$, que são usados nos cálculos, são obtidos a partir da *curva força – deformação* (ou força – deformação) traçada durante a realização do ensaio à flexão.

A figura 5.11 mostra a curva carga – deformação (ou carga – deflexão) típica e os pontos P_e e $P_{\max}$.

Figura 5.11 – Curva força - deformação característica segundo ASTM C 947/89

Como as amostras ensaiadas foram armadas com a tela de fibra de vidro, durante a realização dos ensaios foi possível distinguir claramente os seguintes pontos, da figura 5.12.

Figura 5.12 – Exemplo do comportamento da curva força – deslocamento e seus pontos importantes

Ponto 1 – resistência do sistema argamassa + fibra de vidro. O ponto 1 é exatamente o instante em que a argamassa fissa, em decorrência das propriedades de ruptura frágil dos materiais cimentícios, ou seja, neste ponto quem rompe é a matriz. É neste ponto que foi determinado o LOP.

Ponto 2 – após o ponto 1 a fibra de vidro atua “grampeando” a matriz fissurada.

Foi nessa situação que o desempenho mecânico da fibra de vidro após envelhecimento acelerado pôde ser analisado com maior clareza, pois aqui a fibra de vidro estava trabalhando à tração, sendo tracionada pelas duas partes da matriz surgidas com a fissura (figura 5.13):

Figura 5.13 – Desenho ilustrativo da fibra de vidro “trabalhando” à tração em uma fissura da matriz cimentícia.

Ponto 3 – neste ponto o compósito se rompe, ou seja, tanto a matriz cimentícia quanto a fibra de vidro não apresentam mais resistência.

No caso do exemplo visto na figura 5.12 o valor usado para o cálculo do MOR foi o ponto 2, que é o maior valor de força suportado pela amostra. Já, no caso da figura 5.14 o valor usado para o cálculo do MOR foi o ponto 1, portanto, aqui, MOR = LOP.

Figura 5.14 – Exemplo do comportamento da curva força – deslocamento cujo valor do ponto 1 é maior que os do ponto 2 e 3.

Neste trabalho, além do LOP e do MOR, convencionou-se o valor σ^* que representa o ponto de maior força resistida pela fibra de vidro após o LOP. Dessa maneira, pôde-se observar o desempenho mecânico da fibra de vidro que, afinal, era o material cuja degradação estava sendo analisada no desenvolvimento experimental.

c) Determinação do índice de tenacidade

Segundo Bentur e Mindess (1990), para definir a resistência à flexão é necessário avaliar as curvas tensão-deformação ou força-deslocamento, as quais mostram o efeito das fibras na tenacidade do compósito e o potencial controle *anti-crack*, uma vez que as propriedades do material à compressão são pouco afetadas pela adição de fibras. A figura 5.15 mostra uma curva força x deslocamento na qual é possível determinar a força na qual ocorre a primeira fissura (*first crack*) e a resistência à flexão.

Figura 5.15 - Interpretação das curvas em termo de módulo de elasticidade, a carga na qual ocorre a primeira fissura (*first crack*) e a resistência à flexão. (Fonte: BENTUR e MINDESS, 1990, p. 143)

Muitas vezes a **1ª fissura** pode não corresponder exatamente ao limite de proporcionalidade, mas pelo fato desses serem muito próximos, na prática, eles são adotados iguais, por muitos pesquisadores, no cálculo do módulo de elasticidade E . No caso dos

compósitos com fibras, a interpretação das curvas força-deslocamento após a fase elástica tem um interesse especial, pois representa a capacidade de deformação e a tenacidade do compósito.

Bentur e Mindess (1990, p.142), afirmam que essa capacidade de deformação e a tenacidade do compósito podem ser avaliadas por meio do cálculo da área sob a curva força-deslocamento. Porém, esse método apresenta a desvantagem dos parâmetros serem dependentes das dimensões das amostras, de sua geometria e seu significado físico é limitado, além dos valores de tenacidade serem influenciados pela qualidade da matriz e não servirem para mostrar propriedades que dependem apenas das fibras.

Para resolver esses problemas, foram criados os *índices de tenacidade* que são obtidos dividindo-se as áreas sob a curva em pontos de deflexão pré-determinados pela área sob a curva até o deslocamento para o qual se deu a **1ª fissura**.

“A ASTM C-1018 determina os pontos de deslocamento 3; 5,5 e 15,5 vezes o ponto no qual ocorreu a 1ª fissura, ou seja, 3δ ; $5,5\delta$ e $15,5\delta$. Esses pontos são chamados de índices de tenacidade 5, 10 e 30 respectivamente, ou, I_5 ; I_{10} e I_{30} . Para um material ideal com propriedade de ruptura elasto-frágil, o índice deve ser 1” (BENTUR e MINDESS, p. 144).

A figura 5.16 traz em **A** a curva esquemática com os parâmetros relativos aos índices de tenacidade e em **B** a curva elasto-plástica ideal de referência de acordo com o ASTM C1018.

Figura 5.16 - Curva esquemática com os parâmetros relativos aos índices de tenacidade de acordo com o ASTM C1018. Em (A) as características importantes da curva força-deslocamento e em (B) a curva elasto-plástica ideal de referência. (fonte: BENTUR e MINDESS, 1990, p. 143)

Assim, pela figura 5.16 tem-se:

$$I_5 = \text{área } 0ACD / \text{área } 0AB$$

$$I_{10} = \text{área } 0AEF / \text{área } 0AB$$

$$I_{30} = \text{área } 0AGH / \text{área } 0AB$$

d) Análise microestrutural

Embora os ensaios à tração simples nas fibras de vidro e os ensaios de flexão nas placas cimentícias - comparando-se as amostras envelhecidas com aquelas que não sofreram envelhecimento - pudessem comprovar ou não a eficiência da impregnação das fibras em

resina de PVC no controle da degradação, viu-se por bem realizar observações da microestrutura das fibras de vidro analisadas.

A observação da microestrutura foi realizada por meio do uso da *microscopia eletrônica de varredura (MEV)* do Departamento de Química da IQSC – USP.

O princípio de funcionamento do MEV consiste basicamente em realizar o varrimento da superfície de uma amostra com um feixe eletrônico finamente focado, em sincronismo com o varrimento de um monitor de visualização, modulando o brilho em cada ponto pela intensidade de um sinal emitido pela amostra. Obtém-se, desse modo, uma correspondência, ponto a ponto, entre a imagem e a região observada da amostra, que depende da natureza da informação, do tipo de sinal registrado e do detector utilizado (ROSSIGNOLO, 2003).

5.4) Segunda etapa do desenvolvimento experimental:

Análise do desempenho dos elementos estruturais ou não estruturais compostos por matriz de cimento Portland com fibra de vidro

5.4.1) Descrição das telas de fibra de vidro impregnadas com PVC desenvolvidas

Uma vez obtida uma formulação de PVC³⁰ que proporcionou uma maior durabilidade da fibra de vidro convencional no meio alcalino do cimento Portland por meio dos ensaios de envelhecimento acelerado, citados anteriormente, o passo seguinte foi o desenvolvimento de “desenhos” de telas que pudessem ser usados nos concretos e argamassas. Para isso ser possível, usaram-se os seguintes critérios para nortear esse desenvolvimento:

- 1º) A tela de fibra de vidro deve ter o desenho tal que proporcione um produto com preço mais acessível possível;
- 2º) O desenho das telas deve possibilitar seu uso em peças estruturais e não estruturais, sejam elas compostas por argamassas ou microconcretos.

Para o cumprimento do primeiro critério a empresa fabricante da fibra de vidro indicou as fibras de vidro *Advantex* com 400 TEX e 1600 TEX como as mais convenientes economicamente. Já em relação ao segundo critério, a tela de abertura de 10 mm x 10 mm, aqui chamada de *dez por dez* (10 x 10) é adequada para o uso em placas cimentícias e de a tela com abertura 40 mm x 40 mm, chamada de *quarenta por quarenta* (40 x 40) é adequada para o uso em placas de piso elevado e peças de argamassa armada.

A figura 5.17 mostra o desenho da tela de fibra de vidro 10 x 10 desenvolvida e a figura 5.18 mostra o desenho da tela de fibra de vidro 40 x 40.

³⁰ Segundo descrito no item 5.3.2 desta tese.

(Fibra de vidro de 400 TEX nas duas direções - medidas em mm)

Figura 5.17 - Desenho da tela de fibra de vidro 10 x 10 usada nos experimentos

(Fibra de vidro de 1600 TEX nas duas direções – medidas em mm)

Figura 5.18 - Desenho da tela de fibra de vidro 40 x 40 usada nos experimentos

5.4.2) Aplicação 1 - Placa cimentícia para o sistema *drywall*

a) Descrição das amostras

Na indústria de painéis cimentícios para vedação do sistema *drywall* (exceto as placas cimentícias do tipo fibrocimento) as placas cimentícias são compostas por um microconcreto de agregado leve e por duas telas de fibra de vidro colocadas nas faces superior e inferior das placas. Essas placas têm dimensões 1,20m x 2,40m e espessura em torno de meia polegada (12,5 mm) e a leveza dessas placas é garantida pela argila expandida usada como agregado.

Foram ensaiados dois tipos de placas cimentícias:

- 1º) amostras feitas por um fabricante de placas cimentícias, usando o traço de microconcreto que habitualmente é utilizado na sua fabricação pela empresa, armadas com a tela de fibra de vidro impregnada com PVC desenvolvida nesse trabalho;
- 2º) amostras desenvolvidas no Laboratório de Construção Civil (LCC) da EESC-USP.

b) Materiais utilizados

i) Armação das placas

Tanto as placas cimentícias produzidas na indústria quanto as moldadas em laboratório usaram telas de fibra de vidro impregnadas com PVC de 10 x 10 nas duas faces.

ii) Microconcreto

As placas cimentícias moldadas nas dependências do LCC – EESC - USP eram compostas por microconcreto com o seguinte traço:

1 : 0,1 : 0,91 : 1 (a/c = 0,3) (em massa)

(cimento : areia #0,15mm : areia #4,8mm : argila expandida #4,8)

Adicionou-se 0,9% de aditivo incorporador de ar e 20% em relação à massa de cimento de látex estireno-butadieno.

c) Ensaios realizados

i) Ensaio à flexão segundo ASTM C 947/89

As placas foram cortadas em amostras de 5 cm x 35 cm, tal como mostrado na figura 5.7, e ensaiadas à flexão segundo ASTM C 947/89. Foram ensaiadas quatro amostras para cada caso.

ii) Determinação da resistência ao impacto

O método utilizado para determinação da resistência ao impacto consistiu na queda livre de uma esfera de massa conhecida sobre o centro de uma amostra da placa cimentícia analisada assentada em uma base de areia. A resistência ao impacto da amostra (R_i) é determinada em função da energia necessária para produzir a primeira fissura na face inferior e/ou a ruptura da amostra. A resistência ao impacto é expressa em Joules (J) e é dada segundo a expressão:

$$R_i = m \cdot g \cdot h \quad (5.3)$$

Sendo:

m = massa da esfera (kg);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

h = altura de queda (m).

Foram moldadas placas cimentícias com microconcreto com a seguinte composição:

1 : 0,1 : 0,91 : 1 (a/c = 0,3) (em massa)

(cimento : areia #0,15mm : areia #4,8mm : argila expandida #4,8)

As amostras de placas cimentícias dimensão de 22 cm x 22 cm e tiveram a seguinte variação em relação às telas de fibra de vidro: placas sem uso de tela, placas com tela 1 x 1 nas faces externas e placas com telas 4 x 4 nas faces externas.

Ensaaiaram-se três exemplares para cada um dos casos e foi utilizada uma esfera de aço com massa 0,90 kg para o impacto. A caixa de areia tinha dimensões de 15 cm de altura, 50 cm de comprimento e 50 cm de largura. A altura de queda variou de 2 cm de incremento, a partir da altura inicial de 4 cm. Após cada queda da esfera, o corpo-de-prova foi retirado da base de areia para a verificação do aparecimento de fissuras e para nivelar a superfície da caixa de areia.

A figura 5.19 apresenta uma ilustração do procedimento utilizado na determinação da resistência ao impacto.

Figura 5.19 - Ilustração do equipamento utilizado na determinação da resistência ao impacto

5.4.3) Aplicação 2 - Placa para o sistema de piso elevado

a) Descrição das amostras

As placas cimentícias moldadas tinham a dimensão de 60 cm x 60 cm e espessura de 4 cm (dimensões cujas placas são comercializadas) e com tela de fibra de vidro na face inferior que é a zona tracionada da peça. Foram estudados dois tipos de amostras:

- 1º) moldada por um fabricante de placas cimentícias para piso elevado (1 amostra);
- 2º) a placa desenvolvida no laboratório (3 tipos de amostra).

b) Materiais utilizados

i) Armadura das placas

Tanto as placas cimentícias moldadas pela indústria quanto as desenvolvidas no LCC – EESC - USP usaram telas de fibra de vidro impregnadas com PVC de 40 x 40.

ii) Microconcreto

As amostras foram moldadas pelo fabricante com o concreto convencional cuja formulação é usada na fabricação dos produtos destinados à venda, já as amostras moldadas nas dependências do LCC - EESC-USP eram compostas por microconcreto de acordo com a seguinte formulação:

1 : 1,17 : 1,17 : 0,67 (a/c = 0,36) (em massa)

(cimento : areia #0,15 : areia #4,8 : pedrisco)

Usou-se 10% de aditivo superplastificante em relação à massa de cimento.

c) Ensaio para determinação da resistência

Os ensaios realizados nas placas seguiram a recomendação da NBR MB-3385: 1991 - *Determinação da resistência às cargas verticais concentradas*^{xxxvii}, cujos procedimentos são descritos a seguir:

i) Sistema de aplicação de força

Usou-se um macaco hidráulico com controle mecânico de incremento de força e foram usados três relógios comparadores com resolução de 0,01 mm para medida dos deslocamentos, posicionados segundo a figura 5.20. A figura 5.21 traz algumas fotografias do dispositivo de ensaio segundo descrito na NBR MB-3385:1991.

Figura 5.20 - (a) Posição do relógios comparador para realização dos ensaios nas placas, (b) ponto de aplicação da carga

Figura 5.21– Placas cimentícias para piso elevado sendo ensaiadas. Em (a) pode-se notar os apoios usados pelo fabricante de placas; em (b) as posições dos relógios comparadores e em (c) a célula de carga acoplada ao macaco hidráulico.

A aplicação de força foi em etapas de 500 N, deixou-se a força aplicada pelo intervalo de um minuto e mediram-se os deslocamentos; a seguir retirou-se a carga, aguardou-se um minuto e mediram-se os deslocamentos residuais; repetindo-se o procedimento sucessivamente.

5.4.4) Aplicação 3 - Substituição de armadura metálica por tela de fibra de vidro e barras de GFRP em peças de argamassa armada

5.4.4.1) Considerações iniciais

Além das aplicações em peças de matriz cimentícia como painel de vedação ou como piso elevado, como visto na análise bibliográfica, a fibra de vidro tem grande potencial para substituir a armadura metálica em situações em que essas sejam passíveis de corrosão ou naquelas em que se requeira transparência magnética.

Também foi visto no capítulo 4, a grande importância que o sistema de argamassa armada representa para construção civil brasileira e seu declínio ocorrido pela pequena durabilidade que o sistema apresentou quando usado de forma intensa na construção dos Caic's. Porém, os novos materiais de construção desenvolvidos desde aquela ocasião até hoje permitem uma retomada do sistema, pois a durabilidade pode ser garantida por meio do uso de argamassas ou microconcretos com relações água/aglomerante pequenas, pelo uso de fibras poliméricas no controle da fissuração de origem térmica ou o uso de armaduras não metálicas.

Objetivando apontar os caminhos para futuros estudos com argamassa armada com armadura não metálica que poderão ser seguidos, nesse trabalho, realizaram-se experimentos exploratórios, porém de grande importância, tais como:

- Análise da *aderência das barras* de GFRP encontradas no mercado e comparação desses resultados com o valor da aderência da barra de aço;
- comparação do *comportamento mecânico das barras* de GFRP em relação ao do aço CA-50.

5.4.4.2) Adaptação de método de ensaio à aderência do GFRP

a) Preâmbulo

Na bibliografia encontram-se várias propostas de métodos para ensaio da aderência entre as barras de FRP e a matriz cimentícia, a maioria delas adaptadas de ensaios

de aderência do concreto com o aço. Mas, usou-se o método proposto por Katz et al. (1999)^{xxxviii} nos estudos descritos no artigo “*Effect of Hight Temperature on Bond Strength of FRP Rebars*”, com algumas adaptações que julgaram-se serem necessárias para trazer maior adequação à situação real de aderência entre concreto e FRP.

A primeira adaptação feita, talvez a mais importante, foi adotar um corpo-de-prova cilíndrico com o mesmo concreto a ser usado nos elementos estruturais em uma das extremidades da barra e, na outra extremidade um *concreto padrão* de grande resistência à compressão, com boa aderência, garantida pela adição de sílica ativa e a modificação com látex. Segundo o proposto por Katz et al. (1999), a barra de GFRP deve ser tracionada por uma garra com mordentes da própria máquina de ensaio. Como o GFRP não tem boa resistência na direção diametral, a barra pode sofrer esmagamento. A figura 5.22 mostra o dispositivo de ensaio de aderência proposto por Katz et al. (1999).

Figura 5.22 – Dispositivo de ensaio de aderência entre FRP e concreto usado no trabalho de Katz et al. (1999).

Outro procedimento usado foi o de inserir a barra analisada nos 10 cm de altura do cilindro com *concreto padrão* aumentando a área de contato nesta extremidade, enquanto a outra extremidade da amostra ser introduzida em cinco vezes o diâmetro (5Ø), tal com

proposto por Katz et al. (1999). As figuras 5.23 e 5.24 mostram o dispositivo de ensaio de aderência para GFRP proposto nesse trabalho.

Figura 5.23 – Dispositivo de ensaio de aderência entre FRP e concreto proposto nesse trabalho

Figura 5.24 – Amostras preparadas para o ensaio de aderência entre FRP e concreto segundo procedimentos propostos neste trabalho.

A figura 5.25 apresenta uma fotografia do cilindro de concreto utilizado no ensaio de aderência proposto nesse trabalho, e a figura 5.26 traz uma fotografia mostrando o ensaio de aderência proposto sendo executado:

Figura 5.25 – Fotografia mostrando o cilindro de concreto para ensaio de aderência com a barra da HBrothers

Figura 5.26 – Fotografia mostrando o ensaio de aderência entre FRP e concreto proposto neste trabalho.

b) Propriedades mecânicas das barras de GFRP usadas nos ensaios

A tabela 5.5 mostra as propriedades das barras GFRP usadas neste estudo, fornecidas pelo fabricante do produto.

Tabela 5.5 - Propriedades das barras de GFRP fornecidas pelo fabricante (fonte: HBrothers)

Diâmetro da barra (mm)	Área (mm ²)	Diâmetro Nominal (mm)	Resistência nominal à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
6	33,23	6,35	825	40,8
9	84,32	9,53	760	40,8
13	144,85	12,70	690	40,8
16	217,56	15,88	655	40,8
19	295,50	19,05	620	40,8
22	382,73	22,23	586	40,8
25	537,90	25,40	550	40,8
29	645,00	28,65	517	40,8
32	807,34	31,75	480	40,8

Tavares (2006) ensaiou as barras de 6,35 mm de GFRP e os resultados são mostrados na tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Propriedades determinadas por Tavares (2006) para as barras de GFRP

Propriedades	Ø 6,35 mm
Diâmetro mínimo medido (mm)	6,8
Módulo de Elasticidade (GPa)	37,17
Resistência Última (MPa)	598,04
Deformação Última (mm/m)	17,08

Comparando-se a resistência à tração e o módulo de elasticidade nominais da barra de 6,35mm de diâmetro (tabela 5.5) com as determinadas por Tavares (2006) (tabela 5.6) verifica-se que há uma considerável diferença nos valores, mas Tavares (2006) faz a ressalva de que “[...] a influência da garra no rompimento do corpo-de-prova é inegável, uma vez que o dano nesta região é aparente”. A figura 5.27 traz fotografias que mostram rupturas das barras de GFRP.

Figura 5.27 - Ruptura típica dos corpos-de-prova de GFRP ensaiados à tração por Tavares (2006)

c) Materiais

O *concreto padrão* usado era composto por cimento CP V ARI, sílica ativa, areia média e pedrisco e o traço, em massa, usado foi:

$$1 : 0,1 : 1 : 1 \quad (a/c = 0,3) \quad (\text{em massa})$$

(cimento : sílica ativa : areia média : pedrisco)

Adicionou-se 10% em relação à massa de cimento de látex estireno-butadieno. A adição de látex e de sílica ativa teve como principal propósito o incremento da aderência GFRP e concreto. A cura do concreto foi feita nas próprias fôrmas, sem adição de água, uma vez que a composição recebeu adição de látex.

d) Cálculo da Resistência Nominal de Aderência (τ)

A resistência nominal de aderência foi calculada segundo procedimentos feitos nos trabalhos de Katz et al. (1999), pela seguinte relação:

$$\tau = F_{\max} / \pi \cdot D \cdot L \quad (5.4)$$

Sendo:

τ é a resistência nominal de aderência (MPa)

$F_{\max}$ é a força máxima obtida (N)

D é o diâmetro nominal (mm)

L é o comprimento de aderência da barra com o concreto, ou seja, 5ϕ , (mm).

Observação: os valores habituais da resistência nominal de aderência τ giram em torno de 15 MPa.

5.4.4.3) Análise do comportamento mecânico dos GFRP e da tela de fibra de vidro impregnada com PVC em comparação com o aço

a) Preâmbulo

Para verificar o comportamento mecânico da tela de fibra de vidro e das barras de GFRP no reforço do concreto usaram-se as fôrmas cuja geometria seguiu o determinado pela NBR 12142:91: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos^{xxxix}, com dimensões 15 cm x 15 cm x 50 cm. Sabe-se que esses prismas são usados para determinar a resistência à tração na flexão de concretos sem armadura. Mas, nesse caso, os prismas receberam armaduras, podendo ser considerados como vigas de concreto, ainda que seu comprimento seja de apenas meio metro.

Optou-se por esse tipo de geometria pelo fato de ela representar uma facilidade quanto à execução, pois no Laboratório de Construção Civil da EESC-USP, dispunha-se da quantidade necessária de fôrmas para realização do ensaio, uma vez que, era importante moldar todos os corpos-de-prova usando um mesmo concreto evitando-se assim a

probabilidade de ocorrer uma maior dispersão dos resultados obtidos, em decorrência da variação do tipo de concreto.

A figura 5.28 traz as dimensões usadas nas vigas, o detalhe da armação adotada e o dispositivo de ensaio à tração na flexão. A figura 5.29 traz fotografias mostrando o dispositivo de ensaio à flexão em quatro pontos usado na análise das vigas.

Figura 5.28 - Dimensões das vigas, barras usadas e dispositivo de ensaio à tração na flexão adotado

Figura 5.29- Fotografias mostrando o dispositivo de ensaio à flexão em quatro pontos usado na análise das vigas.

b) Tipos de vigas ensaiadas

Foram realizados dois estudos de caso:

1º) analisaram-se os prismas armados com duas barras de aço CA-50 com $\varnothing = 6,3$ mm e compararam-se os resultados obtidos com os prismas reforçados com duas barras de GFRP, fabricada pela HBrothers, de diâmetro com $\varnothing = 6,3$ mm. Para isso, foram moldadas três vigas para cada caso.

2º) analisaram-se os prismas usando armadura de GFRP variando de uma até seis barras com diâmetro nominal de $\varnothing = 6,3$ mm. As barras de GFRP foram colocadas apenas na zona tracionada das vigas (face inferior), na armadura superior de todas as amostras foram colocadas duas barras de aço CA-50, com $\varnothing = 6,3$ mm e, para resistir à cortante, usou-se a tela de fibra de vidro 40 x 40. Dessa maneira, a única variável nas amostras foi a armadura longitudinal na zona tracionada. A sequência de fotos da figura 5.30 mostra as armaduras de algumas amostras com GFRP na face inferior, em (a) com 1 barra de GFRP, em (b) com 2 barras, em (c) com 3 barras e em (d) com 4 barras.

Figura 5.30 - Fotografias mostrando as armaduras de algumas amostras com GFRP na face inferior, em (a) com 1 barra de GFRP, em (b) com 2 barras, em (c) com 3 barras e em (d) com 4 barras.

Também foram moldadas amostras usando a armadura de aço CA-50 com $\varnothing = 6,3$ mm, com duas barras na face superior e uma barra na face inferior das vigas, como pode ser visto na figura 5.31. Assim, uma vez que o concreto usado foi o mesmo para todas as amostras, analisando-se o comportamento de cada uma quando submetida à flexão, pôde-se correlacionar o número de barras de GFRP que corresponderiam a um comportamento análogo ou próximo ao de uma barra de aço CA-50 de mesmo diâmetro.

Figura 5.31 - Fotografia mostrando a armadura de aço CA 50 com $\varnothing = 6,3$ mm

c) Composição do concreto usado

O concreto usado nos prismas foi feito em uma única mistura, em quantidade suficiente para se moldar as nove vigas prismáticas e os corpos-de-prova cilíndricos para determinação da resistência à compressão e teve o seguinte traço:

1 : 0,1 : 1 : 1,1 : 1,2 (a/c = 0,35) (em massa)

(cimento : sílica ativa : areia fina : pedrisco)

Usou-se o correspondente a 10% da massa de aglomerantes (cimento + sílica ativa) de látex estireno-butadieno e 1% de aditivo superplastificante. O processo de cura do

concreto foi feito nas próprias fôrmas, sem adição de água, uma vez que a composição tinha a adição de látex.

d) Parâmetros analisados

Como consequência da grande diferença existente entre os módulos de elasticidade do aço CA-50 ($E = 210 \text{ GPa}$) e da barra de GFRP ($E = 40,8 \text{ GPa}$, segundo fabricante e $E = 37,17 \text{ GPa}$, segundo Tavares, 2006), já era esperado que a barra de GFRP não rompesse. A análise dos valores da flecha destas vigas é difícil, pois o seu comprimento é pequeno frente a sua altura. Então, foram analisados os seguintes parâmetros:

- 1º) força e deslocamento nas quais ocorreu a primeira fissura do concreto;
- 2º) força última obtida no ensaio e o deslocamento correspondente.

CAPÍTULO 6

Resultados Obtidos

6.1) Primeira etapa do desenvolvimento experimental:

Análise da durabilidade da fibra de vidro frente ao meio alcalino do cimento Portland

6.1.1) Análise do desempenho das telas de fibra de vidro encontradas no mercado

Para analisar os produtos que já estão disponíveis no mercado nacional, as amostras das telas de fibra de vidro impregnadas com PVC e as telas de fibra de vidro AR foram submetidas ao processo de envelhecimento acelerado.

6.1.1.1) Resultados dos ensaios com as telas impregnadas com PVC já comercializadas

a) Ensaios das telas à tração simples

A tabela 6.1 traz os resultados dos ensaios à tração simples da amostra encontrada no mercado da tela de fibra de vidro impregnada com PVC.

Tabela 6.1 – Resultado do ensaio à tração simples na tela de fibra de vidro comercializada impregnada com resina PVC

Tipo de amostra	Resistência (Mpa)	Δ Resistência (%)
Padrão	678,5	-
7 d	413,4	-39%
14 d	328,8	-51,5%
21 d	229,9	-66,1%

Pela tabela 6.1 pode-se notar que o desempenho da fibra de vidro comercializada impregnada com PVC é insatisfatório frente ao meio alcalino do cimento Portland, pois, aos 7 dias a queda na resistência à tração foi de cerca de 40% e aos 14 dias de 52%.

b) Ensaios à flexão nas placas cimentícias armadas com telas comercializadas impregnadas com PVC segundo ASTM C 947/89

O concreto usado na moldagem das placas tinha resistência à compressão de 42 MPa aos sete dias. A tabela 6.2 traz os resultados obtidos no ensaio à tração na flexão das placas cimentícias armadas com fibra de vidro comercializada impregnada com PVC, para amostras padrão (sem envelhecimento acelerado) e amostras 7d, 14d e 21d.

Tabela 6.2 - Resultados do ensaio à flexão de placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro comercializada impregnada com resina PVC

Tipo de Amostra	LOP (MPa)	MOR (MPa)	σ^* (MPa)	Δ Resistência (%) (Em relação a σ^*)
Padrão	6,3	6,3	5,0	
7 d	5,2	5,2	2,2	-56,0
14 d	6,5	6,5	2,0	-59,3
21 d	5,8	5,8	1,7	-65,3

Os resultados à flexão mostrados na tabela 6.2 confirmam a intensa degradação das propriedades mecânicas das fibras de vidro comercializada impregnadas com PVC, verificada na tabela 6.1.

A figura 6.1 à esquerda apresenta as curvas força (N) x deslocamento (mm), bem como as curvas tensão (MPa) x deslocamento (mm) à direita, obtidas no ensaio à flexão segundo ASTM C 947/89, para placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro comercializada impregnada com resina PVC.

Figura 6.1 – Curvas força x deslocamento e tensão x deslocamento para amostras de placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro comercializada impregnada com PVC

6.1.2) Análise da tela de fibra de vidro álcali-resistente (AR)

a) Ensaio à tração simples nas telas

A tabela 6.3 traz os resultados obtidos no ensaio à tração simples das fibras de vidro com propriedades álcalis - resistente (AR):

Tabela 6.3 – Resultado do ensaio à tração simples na tela de fibra de vidro AR

Tipo de amostra	Resistência (MPa)	Δ Resistência (%)
Padrão	552,0	-
7 d	550,8	-0,2
14 d	389,3	-29,5
21 d	319,2	-42,2

Pode ser notado na tabela 6.3 que a fibra de vidro AR tem melhor desempenho que a fibra de vidro comercializada impregnada com PVC, embora, aos 14 dias de envelhecimento acelerado, tenha perdido cerca de 30% de sua resistência mecânica.

b) Ensaios à flexão nas placas cimentícias armadas com telas AR segundo ASTM C947/99

O concreto usado na moldagem das placas tinha resistência à compressão de 45 MPa aos sete dias. A tabela 6.4 traz os resultados obtidos no ensaio à tração na flexão das placas cimentícias armadas com fibra de vidro AR com espaçamento de 1 cm x 1 cm, com dimensões 5 cm x 35 cm x 1,2 cm, para amostras padrão (sem envelhecimento acelerado) e amostras 7d, 14d e 21d.

Tabela 6.4 - Resultados do ensaio à flexão das placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro AR

Tipo de Amostra	LOP (MPa)	MOR (MPa)	σ^* (MPa)	Δ Resistência (%) (Em relação a σ^*)
Padrão	4,6	4,6	2,4	
7 d	3,9	4,4	1,9	-19,8
14 d	3,5	3,5	2,2	-10,4
21 d	2,9	2,9	1,0	-58,3

Uma análise da tabela 6.4 mostra que as fibras AR perderam cerca de 60% de sua resistência mecânica aos 21 dias.

A figura 6.2 traz as curvas força (N) x deslocamento (mm) à esquerda, bem como as curvas tensão (MPa) x deslocamento (mm) à direita, obtidas no ensaio à flexão segundo ASTM C 947/89 para placas cimentícias com tela de fibra de vidro AR.

Figura 6.2 – Curvas força x deslocamento e tensão x deslocamento para amostras de placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro AR.

OBS.: As curvas força x deslocamento ou tensão x deslocamento cujas linhas passam a ser verticais próximo dos 17 mm de deslocamento, representam aquelas amostras que tiveram um deslocamento maior que aquela cuja resolução do LVDT³¹ possibilitava, sendo, a partir dessa etapa, registrado apenas o valor da força.

6.1.3) Desenvolvimento da tela de fibra de vidro impregnada com PVC

6.1.3.1) Desenvolvimento do Plastissol de PVC para impregnação das fibras

Diante do pequeno desempenho das *fibras de vidro comercializadas impregnadas com PVC* da degradação das propriedades mecânicas das fibras de vidro ARO frente ao meio alcalino do cimento Portland, evidenciados pelo processo de envelhecimento acelerado, desenvolveu-se um novo plastissol de PVC para impregnação das fibras de vidro convencionais.

Esse novo plastissol foi desenvolvido pelo autor desta tese nas dependências do Laboratório de Desenvolvimento de Produtos da BRASKEN, na cidade de São Paulo. A tabela 6.5 traz a formulação deste plastissol de PVC desenvolvido.

Tabela 6.5 – Formulação do Plastissol desenvolvido neste doutorado no laboratório da Brasken

Produto	PCR (porcentagem de resina)
Resina PVC	100
DOP (Plastificante)	70
Líquido estabilizante para PVC flexível à base de Ba, Cd e Zn	2
Óleo de soja epoxidado (OSE)	5
Agente de aderência poli – isocianeto	2%

³¹ LVDT - *Linear Variable Differential Transformer* . São sensores para medição de deslocamento linear.

Todos os componentes foram homogeneizados por um misturador com 60 rpm durante dez minutos com a aplicação concomitante de vácuo de 18m³/h de sucção, e o processo de cura térmica tiveram duração de cerca de um minuto a uma temperatura de 180 °C.

6.1.3.2) Análise dos fios impregnados com a formulação de PVC desenvolvida

Para verificar a adequação da fórmula do plastissol desenvolvida, analisou-se a resistência à tração de fios, pois, desta maneira, foi possível realizar a impregnação e a cura do plastissol no próprio Laboratório de Construção Civil – EESC – USP.

a) Ensaios à tração simples nos fios de fibra de vidro impregnados

A tabela 6.6 traz os valores obtidos no ensaio à tração de um único fio.

Tabela 6.6 - Resultados do ensaio à tração simples dos fios de fibra de vidro impregnados com PVC desenvolvido na pesquisa e porcentagem de queda de resistência mecânica devido ao processo de envelhecimento acelerado.

Tipo de Amostra	Resistência (MPa)	Δ Resistência (%)
Padrão	2076,0	
7 d	1840,0	-11,4
14 d	1595,5	-23,1
21 d	1591,4	-23,3

Uma vez verificada a eficiência do plastissol desenvolvido quanto ao ataque alcalino por meios dos ensaios à tração simples dos fios de fibra de vidro impregnados com PVC, foi tecida uma tela de fibra de vidro e impregnada com o plastissol desenvolvido.

b) Ensaios à tração simples nas telas de fibra de vidro impregnadas

A tabela 6.7 traz os resultados obtidos no ensaio à tração simples da tela de fibra de vidro impregnada com PVC desenvolvido na pesquisa.

Tabela 6.7: Resultados do ensaio à tração simples da tela de fibra de vidro impregnada com PVC desenvolvido na pesquisa e porcentagem de queda de resistência mecânica em decorrência do processo de envelhecimento acelerado.

Tipo de Amostra	Resistência (MPa)	Δ Resistência (%)
Padrão	863,2	
7 d	848,3	-1,7
14 d	842,6	-2,4
21 d	689,7	-20,1

A tabela 6.7 com os resultados à tração das telas submetidas ao envelhecimento acelerado, comparadas com a *padrão*, comprovam a eficiência da impregnação com o plastissol desenvolvido na proteção das fibras de vidro convencionais frente ao meio alcalino do cimento Portland, uma vez que a queda na resistência à tração das fibras foi cerca de 20% aos 21 dias de EA..

c) Ensaios à flexão nas placas cimentícias armadas com telas segundo ASTM 947/89

O concreto usado na moldagem das placas tinha resistência à compressão de 40 MPa aos sete dias.

A tabela 6.8 traz os resultados dos ensaios à flexão das placas cimentícias armadas com a tela de fibra de vidro 10 x 10 impregnadas com a resina PVC desenvolvida na pesquisa.

Tabela 6.8: Resultados do ensaio à flexão para placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro 10 x 10 impregnada com resina PVC desenvolvida na pesquisa

Tipo de Amostra	LOP (MPa)	MOR (MPa)	σ^* (MPa)	Δ Resistência (%) (Em relação a σ^*)
Padrão	5,1	7,2	6,8	
7 d	5,2	5,6	6,5	-3,9
14 d	6,9	5,9	6,5	-4,1
21 d	6,3	7,2	6,3	-7,5

A figura 6.3 traz as curvas força x deslocamento e tensão x deslocamento das placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro impregnada com resina PVC desenvolvida na pesquisa.

Figura 6.3 – Curvas força x deslocamento e tensão x deslocamento para amostras de placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro 10 x 10 impregnadas com PVC desenvolvido nesta pesquisa

Os resultados dos ensaios à flexão mostrados na tabela 6.8 evidenciam a eficácia da impregnação das fibras de vidro com o PVC desenvolvido e as curvas da figura 6.3 mostram que as placas cimentícias armadas com essa tela apresentaram um comportamento dúctil.

d) **Determinação do *índice de tenacidade* das placas cimentícias reforçadas com telas**

A partir das curvas força x deslocamento, obtidas nas amostras submetidas ao ensaio à flexão, foi possível calcular os índices de tenacidade I_5 , I_{10} e I_{30} considerando todos os tipos de fibras analisadas e, assim, verificar a influência da degradação das fibras de vidro em decorrência do ataque alcalino do cimento Portland, na tenacidade do compósito.

A tabela 6.9 traz o resultado da análise do *índice de tenacidade* das amostras de placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro 10 x 10 comercializada impregnada com resina PVC:

Tabela 6.9: Resultado da análise do *índice de tenacidade* das amostras de placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro 10 x 10 comercializada impregnada com resina PVC

Tipo de Amostra	I_5	ΔI_5	I_{10}	ΔI_{10}	I_{30}	ΔI_{30}
Padrão	2,67		4,9		15,69	
7 d	1,81	-32,2%	3,2	-34,7%	5,36	-65,8%
14 d	1,93	-27,7%	2,77	-43,5%	5,67	-63,9%
21 d	1,92	-28,1%	2,92	-40,4%	5,08	-67,6%

Os *índices de tenacidade* da amostra de placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro 10 x 10 comercializada impregnada com resina PVC, evidenciam a intensa perda de tenacidade do compósito já aos 7 dias com queda de 32% no I_5 , 35% no I_{10} e 66% no I_{30} .

A tabela 6.10 apresenta o resultado da análise do *índice de tenacidade* das amostras de placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro AR.

Tabela 6.10: Resultado da análise do *índice de tenacidade* das amostras de placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro AR

Tipo de Amostra	I ₅	Δ I ₅	I ₁₀	Δ I ₁₀	I ₃₀	Δ I ₃₀
Padrão	2,75		5,29		17,24	
7 d	2,27	-17,5%	3,4	-35,7%	8,88	-48,5%
14 d	3,84	39,6%	7,21	36,3%	21,82	26,6%
21 d	3,1	12,7%	5,02	-5,1%	6,97	-59,6%

As amostras reforçadas com a fibra AR apresentaram queda no I₅, I₁₀ e I₃₀ aos 7 dias de envelhecimento acelerado e um ganho de tenacidade aos 14 dias, para todos os *índices de tenacidade*. Aos 21 dias teve uma queda de tenacidade intensa para o I₃₀.

A tabela 6.11 traz o resultado da análise do *índice de tenacidade* das amostras de placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro 10x10 impregnada com resina PVC desenvolvida

Tabela 6.11: Resultado da análise do *índice de tenacidade* das amostras de placas cimentícias armadas com tela de fibra de vidro 10x10 impregnada com resina PVC desenvolvida

Tipo de Amostra	I ₅	Δ I ₅	I ₁₀	Δ I ₁₀	I ₃₀	Δ I ₃₀
Padrão	3,35		4,91		11,92	
7 d	2,63	-21,5%	3,51	-28,5%	7,42	-37,8%
14 d	3,07	-8,4%	3,62	-26,3%	6,14	-48,5%
21 d	2,52	-24,8%	3,35	-31,8%	5,91	-50,4%

Os *índices de tenacidade* dos compósitos cimentícios armados com a tela de fibra de vidro desenvolvida apresentaram uma diminuição, em relação à amostra padrão, em todas as idades de envelhecimento acelerado. Esse resultado se contrapõe com aqueles obtidos nos ensaios à tração dos fios, das telas e de σ^* .

6.1.4) Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

6.1.4.1) Micrografias das amostras de *fibra de vidro convencional* sem impregnação

A figura 6.4 mostra uma sequência de micrografias da fibra de vidro convencional sem impregnação, com aproximação de três mil vezes.

Figura 6.4 - Micrografias das fibras de vidro convencional, sem impregnação, obtidas por meio de MEV nas várias idades de envelhecimento acelerado

A figura 6.5 traz uma micrografia da fibra de vidro convencional sem impregnação, com aproximação de sete mil vezes.

Figura 6.5 - Micrografia da fibra de vidro convencional sem impregnação com aproximação de sete mil vezes.

6.1.4.2) Micrografias das amostras de *fibra de vidro impregnadas encontradas no mercado*

A figura 6.6 mostra as micrografias obtidas por MEV das amostras de *fibra de vidro impregnadas encontradas no mercado*:

Figura 6. 6 - Micrografias das fibras de vidro impregnada encontrada no mercado, obtidas por meio de MEV nas várias idades de envelhecimento acelerado

A figura 6.7 traz uma micrografia da fibra de vidro impregnada encontrada no mercado, com aproximação de dezessete mil vezes.

Figura 6.7 - Micrografia da fibra de vidro impregnadas encontradas no mercado com aproximação de dezessete mil vezes.

6.1.4.3) Micrografias das amostras de *fibra de vidro AR*

A figura 6.8 mostra uma sequência de micrografias da fibra de vidro convencional sem impregnação com aproximação de três mil vezes.

Figura 6.8 - Micrografias das fibras de vidro AR, obtidas por meio de MEV nas várias idades de envelhecimento acelerado

A figura 6.9 traz uma micrografia da fibra de vidro AR com aproximação de sete mil vezes.

Figura 6.9 - Micrografia da fibra de vidro AR com aproximação de sete mil vezes.

6.1.4.4) Micrografias das amostras de *fibra de vidro impregnada desenvolvida*

A figura 6.10 mostra as micrografias obtidas por MEV das amostras de fibra de vidro impregnadas, desenvolvida neste trabalho.

Figura 6.10 - Micrografias das fibras de vidro impregnadas desenvolvidas, obtidas por meio de MEV nas várias idades de envelhecimento acelerado

6.2) Segunda etapa do desenvolvimento experimental:

Análise do desempenho dos elementos estruturais ou não estruturais compostos por matriz de cimento Portland com fibra de vidro

Uma vez comprovada a eficiência da tela de fibra de vidro impregnada com PVC desenvolvida nos trabalhos deste doutorado em relação à durabilidade frente ao meio alcalino do cimento Portland, a etapa seguinte dos trabalhos foi estudar a aplicação do produto em elementos estruturais e não estruturais da construção civil.

Foram feitos dois estudos de aplicação:

- 1º) na substituição da tela de 100 x 100 TEX com abertura de 1 mm x 1 mm usada nas placas cimentícias para o sistema *drywall* pela tela 10 x 10 desenvolvida nesse trabalho;
- 2º) na substituição da tela de aço nos pisos elevados de concreto por tela de fibra de vidro.

6.2.1) Primeiro caso de aplicação: Substituição da tela de fibra de vidro anteriormente usada (1 cm x 1cm de abertura) em placas cimentícias pela tela 10 x 10 desenvolvida

a) Ensaio à flexão segundo ASTM C 947/89

No estudo foram analisadas placas cimentícias produzidas pela própria indústria fabricante de painéis cimentícios para o sistema *drywall* e placas moldadas no próprio Laboratório de Construção Civil da Escola de Engenharia de São Carlos.

i) Placa produzida na indústria

A figura 6.11 apresenta as curvas tensão x deslocamento para as placas produzidas na indústria com tela anteriormente usada (abertura de 1 mm x 1mm), submetidas ao ensaio de flexão, segundo ASTM 947/89.

Figura 6.11 - Curvas tensão x deslocamento para a placa cimentícia produzida pela indústria com tela anteriormente usada submetida a ensaio de flexão.

O fabricante de placas cimentícias, para efeito de comparação, também moldou placas usando a sua própria dosagem de microconcreto e a tela 10 x 10 desenvolvida neste trabalho. A figura 6.12 mostra as curvas tensão x deslocamento das amostras da placa cimentícia produzida pela indústria com tela 10 x 10 submetidas a ensaio de flexão, segundo ASTM 947/89.

Figura 6.12 - Curvas tensão x deslocamento para a placa cimentícia produzida pela indústria com tela 10 x 10 submetida a ensaio de flexão.

ii) Placa produzida em laboratório

A figura 6.13 traz as curvas tensão x deslocamento para amostras da placa desenvolvida no LCC – EESC – USP. O concreto usado na confecção das placas tinha resistência à compressão de 40 MPa aos sete dias.

Figura 6.13 - Curvas tensão x deslocamento para a placa cimentícia desenvolvida no LCC com tela 10 x 10 submetida a ensaio de flexão.

Analisando as curvas da figura 6.13 é possível notar que, embora apresentem valores de tensão superiores, as amostras da placa cimentícia armada com a tela 10 x 10 apresentaram dois grandes picos, enquanto as amostras produzidas pela indústria usando a mesma tela (figura 6.12) apresentaram vários pequenos picos (cerca de 6). Os dois grandes picos mostrados nas curvas da amostra desenvolvida em laboratório representam a ruptura da matriz cimentícia e a conseqüente transferência das tensões às fibras, pois, conforme se produz concretos com menor resistência à compressão, reduz-se o módulo de elasticidade.

Na figura 6.12, observa-se que o primeiro pico da curva se dá em um valor de tensão próximo a 7,0 MPa, enquanto a ruptura da fibra ocorreu em torno de 10 MPa. Já para a placa desenvolvida em laboratório (figura 6.13), o primeiro pico ocorreu em valores de tensões por volta de 13 MPa e a ruptura da fibra em 15 MPa na média. Uma vez que se trata da mesma fibra em ambas as placas, uma moldada na indústria, a outra, no laboratório, variando-se apenas as composições dos microconcretos, acredita-se que haja uma melhor interação tela - microconcreto para aquele usado pela indústria, confirmando que a resistência e o módulo do microconcreto têm grande influência no comportamento da placa cimentícia como um todo.

As curvas da figura 6.14 comparam as curvas resistência x deslocamento das placas produzidas na indústria com tela anteriormente usada (1 cm x 1 cm) e a tela 10 x 10, submetidas ao ensaio de flexão.

Figura 6.14 - Curvas tensão x deslocamento para as placas produzidas na indústria com tela anteriormente usada e a tela 10 x 10, submetidas ao ensaio de flexão.

As curvas da figura 6.14 evidenciam que o comportamento mecânico das placas cimentícias armadas com ambas as telas são similares.

O diâmetro máximo do agregado leve usado no microconcreto foi de Ø 4,8mm, portanto, menor que a abertura da tela 10 x 10 (#10mm), possibilitando que o agregado passasse pela abertura, fazendo com que a face externa das placas ficasse com textura rugosa. Para contornar esse problema, colocou-se uma camada de véu não-tecido poliéster, com gramatura de 25g/m², entre o fundo da forma e a tela de FV, como pode ser visto na figura 6.15.

Figura 6.15 – Fotografias ilustrando a colocação do véu de poliéster na face externa da placa cimentícia com a função de regularizar o acabamento externo desta.

A figura 6.16 mostra as curvas tensão x deformação das amostras de placa cimentícia desenvolvida no LCC, que receberam véu de poliéster nas faces externas das placas, atuando com a função de regularizar a superfície externa das placas, mas, como pode ser notado, sem alterar o comportamento mecânico destas.

Figura 6.16 - Curvas tensão x deslocamento para as placas produzidas em laboratório usando tela de FV 10 x 10 e véu de poliéster submetidas a ensaio de flexão.

b) Ensaio de resistência ao impacto

i) Placas sem armação de tela de fibra de vidro

O concreto usado na moldagem das placas de 22 cm por 22 cm tinha resistência à compressão de 50 MPa aos sete dias. A tabela 6.12 traz os resultados do ensaio de impacto de corpo duro das amostras de placas cimentícias sem tela de fibra de vidro (padrão):

Tabela 6.12 – Resultados do ensaio de impacto de corpo duro das placas cimentícias padrão

Amostra	H (m)	R _i (J)
1	0,72	5,0
2	0,70	4,9
3	0,72	5,0
4	0,70	4,9
Média	0,71	5,0

A figura 6.17 mostra uma fotografia da placa cimentícia padrão, após a realização do ensaio de impacto de corpo duro, evidenciando a ruptura com características frágeis da matriz cimentícia.

Figura 6.17 – Placa cimentícia padrão evidenciando ruptura com características frágeis

ii) Placas armadas com tela de fibra de vidro 1 x 1

A tabela 6.13 mostra os resultados obtidos no ensaio de impacto de corpo duro nas amostras de placas cimentícias armadas com a tela de fibra de vidro 1 x 1.

Tabela 6.13 – Resultados do ensaio de impacto de corpo duro das placas reforçadas com tela de fibra de vidro 1x1

Amostra	H (m)	R _i (J)
1	0,72	5,0
2	0,74	5,2
3	0,74	5,2
4	0,78	5,5
Média	0,75	5,2

A figura 6.18 mostra a placa cimentícia armada com tela de fibra de vidro 1 x 1, após a realização do ensaio de corpo duro, evidenciado a ruptura característica dúctil.

Figura 6.18 – Placa cimentícia com uma tela 1x1 evidenciando ruptura com característica dúctil

iii) Placas armadas com de tela de fibra de vidro 4 x 4

A tabela 6.14 mostra os resultados obtidos no ensaio de impacto de corpo duro nas amostras de placas cimentícias armadas com a tela de fibra de vidro 4 x 4.

Tabela 6.14 – Resultados do ensaio de impacto de corpo duro das amostras com tela de fibra de vidro 4x4

Amostra	H (m)	R _i (J)
1	0,76	5,3
2	0,80	5,6
3	0,82	5,7
4	0,84	5,9
Média	0,81	5,6

A figura 6.19 mostra a placa cimentícia com tela de fibra de vidro 4 x 4, após a realização do ensaio de corpo duro evidenciado a ruptura com característica dúctil, porém, o fato das fibras que compõem a tela 4 x 4 serem mais espessas (usam fios de 1600 TEX enquanto a tela 1 x 1 usa tela de 400 TEX) fez com que a fissura se dê na direção longitudinal dos fios.

Figura 6.19 – Placa cimentícia com reforço de tela 4x4, evidenciando ruptura com característica menos frágil

6.2.2) Segundo caso de aplicação: Placas cimentícias para piso elevado

As placas cimentícias foram moldadas em uma indústria de placas cimentícias para piso elevado e um outro lote foi feito no Laboratório de Construção Civil, em ambos casos as dimensões era 60 cm x 60 cm x 4 cm ; foram ensaiadas segundo descrito na NBR MB-3385: Determinação da resistência às cargas verticais concentradas que, além da força de ruptura, determina o deslocamento sofrido pela placa durante a aplicação do carregamento.

i) Placa produzida na indústria

A tabela 6.15 traz os resultados do ensaio da placa de piso elevado produzida pela indústria, usando **uma tela** de fibra de vidro 40 x 40 impregnada com PVC desenvolvido, na face inferior.

OBS.: Por limitação das células de carga utilizadas no ensaio, a deflexão das placas pôde ser lida até o carregamento de 4,5 kN, mas o valor da carga máxima pôde ser verificado.

Tabela 6.15 - Resultados do ensaio da placa de piso elevado *produzida pela indústria* usando o reforço de uma tela de fibra de vidro 40 x 40

Força (kN)	Deslocamento (mm)	Residual (mm)
0	0,00	0,00
0,50	0,12	0,20
1,00	0,42	0,28
1,50	0,69	0,42
2,00	0,92	0,54
2,50	1,14	0,68
3,00	1,35	0,80
3,50	1,55	0,93
4,00	1,75	1,03
4,50	1,87	1,17

OBS.: O colapso da placa ocorreu em 5,62 kN

ii) Placas produzidas em laboratório

O concreto usado na moldagem das placas tinha resistência à compressão de 50 MPa aos sete dias. A tabela 6.16 traz os resultados do ensaio da placa de piso elevado produzida em laboratório sem reforço de tela.

Tabela 6.16 - Resultados do ensaio da placa de piso elevado *desenvolvida em laboratório* sem tela de fibra de vidro.

Força (kN)	Deslocamento (mm)	Residual (mm)
0,00	0,00	0,00
0,50	0,20	0,16
1,00	0,27	0,20
1,50	0,31	0,23
2,00	0,53	0,34
2,50	0,87	0,58
3,00	1,50	0,70
3,50	1,83	0,75
4,00	1,90	0,80
4,50	1,95	0,95

OBS.: O colapso da placa se deu a 6,22 kN

A tabela 6.17 traz os resultados do ensaio da placa de piso elevado produzida em laboratório, armada com **uma tela** de fibra de vidro 40 x 40, na face inferior.

Tabela 6.17 - Resultados do ensaio da placa de piso elevado *desenvolvida em laboratório* reforçada com uma tela de fibra de vidro.

Força (kN)	Deslocamento (mm)	Residual (mm)
0,00	0,00	0,00
0,50	0,10	0,09
1,00	0,24	0,15
1,50	0,30	0,22
2,00	0,33	0,3
2,50	0,37	0,32
3,00	0,52	0,47
3,50	0,90	0,49
4,00	1,00	0,54
4,50	1,11	0,60

OBS.: O colapso da placa se deu a 7,66 kN

A tabela 6.18 traz os resultados do ensaio da placa de piso elevado produzida em laboratório, armada com **duas telas** de fibra de vidro 40 x 40, na face inferior.

Tabela 6.18 - Resultados do ensaio da placa de piso elevado *desenvolvida em laboratório* armada com duas telas de fibra de vidro.

Força (kN)	Deslocamento (mm)	Residual (mm)
0,00	0,00	0,00
0,50	0,03	0,05
1,00	0,10	0,10
1,50	0,23	0,16
2,00	0,34	0,23
2,50	0,45	0,28
3,00	0,54	0,33
3,50	0,62	0,38
4,00	0,70	0,42
4,50	0,76	0,45

OBS.: O colapso da placa se deu em uma força de 7,66 kN

A figura 6.20 traz fotografias que ilustram as placas cimentícias para piso elevado após a realização dos ensaios:

Figura 6.20 - Fotografias ilustrando as placas cimentícias para piso elevado após a realização dos ensaios.

6.2.3) Resultados dos ensaios de aderência nas barras pultrudadas GFRP e aço

A existência de uma boa aderência entre a barra de GFRP e a matriz de concreto é de suma importância para o bom desempenho estrutural dos elementos estruturais, mas o fabricante das barras de GFRP usadas neste trabalho não forneceu o valor da aderência entre as barras e o concreto.

Como já foi comentado no capítulo 3 desta tese, o procedimento escolhido para a verificação da aderência matriz – GFRP foi aquele usado por Katz et al. (1999), fazendo-se algumas adaptações julgadas necessárias, e que lograram êxito, como se pode notar pela análise da tabela 6.19.

O *concreto padrão* usado tinha resistência à compressão de 78 MPa e o concreto cuja aderência com a barra estava sendo avaliada tinha resistência à compressão de 41 MPa aos 7 dias.

Tabela 6.19 - Resultados do Ensaio de Aderência, segundo procedimentos propostos neste trabalho, para barras de FRP dos fabricantes HBrothers e GFRP nacional e barra de aço como padrão

Amostra		F_{max} (N)	Diâmetro (mm)	L (mm)	Tensão (MPa)
Aço	1	9680	6,3	31,5	15,5
	2	11930	6,3	31,5	19,1
	3	11730	6,3	31,5	18,8
	4	11970	6,3	31,5	19,2
				Média	18,2
H Brothers	1	11800	6,3	31,5	18,9
	2	*	*	*	*
	3	11330	6,3	31,5	18,2
	4	9750	6,3	31,5	15,6
				Média	17,6
GFRP Nacional ³²	1	5400	6,0	30	9,6
	2	5120	6,0	30	9,1
	3	5190	6,0	30	9,2
	4	5230	6,0	30	9,3
				Média	9,3

* a amostra apresentou problema durante a execução do ensaio

Por meio da análise da tabela 6.19, pode-se notar que a diferença da tensão de aderência entre o aço CA-50 e a barra de GFRP da HBROTHERS foi de apenas 3%, enquanto comparando-se com a barra nacional a diferença foi de 49% em relação à aderência aço -

³² A barra de GFRP nacional foi usada no ensaio para se analisar o quão distante o produto nacional se encontra do produto da H Brothers em relação à aderência com a matriz.

matriz. Desta forma, pode-se concluir que a aderência das barras de GFRP usadas nesta pesquisa e o concreto era adequada.

6.2.4) Resultados dos ensaios de flexão de vigas prismáticas armadas com barras de aço e GFRP

a) Comparação entre GFRP e aço com a mesma área de armadura

O primeiro caso a ser ensaiado foram vigas prismáticas de concreto armadas com barras de aço ou barras de GFRP, usando a mesma área de um e outro material. A tabela 6.20 e as figuras 6.21 e 6.22 trazem os resultados dos parâmetros estudados nos ensaios das vigas prismáticas de concreto submetidos à flexão em quatro pontos.

Obs.: o concreto usado na moldagem das placas tinha resistência à compressão de 26 MPa aos 7 dias.

Tabela 6.20 - Resultados do ensaio à flexão das vigas de concreto armadas com 2 barras de GFRP e aço com $\varnothing = 6,3\text{mm}$

Tipo de amostra		VARIÁVEL	
		1ª fissura ³³	Carga máxima obtida
		força (kN) / deslocamento (mm)	Força (kN) / deslocamento (mm)
Aço 6,3 mm	1	44,7 / 0,22	48,6 / 0,25
	2	63,8 / 0,33	63,9 / 0,33
	3	52,4 / 0,56	52,4 / 0,56
GFRP 6,3mm	1	20,1 / 0,16	42,3 / 1,14
	2	20,7 / 0,17	52,0 / 1,40
	3	19,4 / 0,15	42,9 / 1,07

³³ A primeira fissura aqui referida diz respeito àquela apresentada pelos prismas quando sujeitos aos esforços de flexão.

Analisando-se a tabela 6.20 nota-se que a **1ª fissura** para as vigas armadas com GFRP ocorreu com um valor de força bem menor que as vigas armadas com aço. O valor de força máxima obtida para ambos tipos de armação estão na mesma ordem de grandeza, mas no caso das armadas com GFRP, o deslocamento foi muito maior.

A figura 6.21 traz as curvas força (N) x deslocamento (mm) para as amostras de vigas de concreto armadas com duas barras de aço CA-50 de $\varnothing = 6,3\text{mm}$ na face inferior.

Figura 6.21 – Curvas carga (N) x deflexão (mm) para amostras de vigas de concreto armadas com 2 barras de aço CA-50 de $\varnothing = 6,3\text{mm}$ na face inferior.

A figura 6.22 apresenta as curvas carga (N) x deflexão (mm) para amostras de vigas de concreto armadas com duas barras de GFRP da HBrothers de $\varnothing = 6,3\text{mm}$ na face inferior.

Figura 6.22 – Curvas força (N) x deslocamento (mm) para amostras de vigas de concreto armadas com 2 barras de GFRP da HBrothers de $\varnothing = 6,3\text{mm}$ na face inferior.

Numa análise das figuras 6.21 e 6.22 fica evidente o comportamento com maior ductilidade das vigas armadas com GFRP em relação àquelas armadas com aço.

A figura 6.23 mostra fotografias da realização de ensaio das vigas armadas com aço e GFRP.

Figura 6.23 – Fotografias mostrando os corpos-de-prova prismáticos ensaiados à flexão.

b) Comparação entre GFRP e aço variando o número de barras de GFRP

Nesse estudo foram ensaiadas vigas prismáticas de concreto armadas com uma barra de aço e outras armadas com barras de GFRP variando de uma até seis barras. A tabela 6.21 traz os resultados dos parâmetros estudados nos ensaios das vigas prismáticas de concreto submetidos à flexão em quatro pontos.

Obs.: o concreto usado nas placas tinha resistência à compressão de 27,5 MPa aos 7 dias.

Tabela 6.21 - Resultados do ensaio à flexão das vigas de concreto armadas com 1 barra de aço $\varnothing = 6,3\text{mm}$ e variando as barras de GFRP de 1 até 6 barras de $\varnothing = 6,3\text{mm}$

Tipo de amostra		VARIÁVEL	
		1ª fissura	Força máxima obtida
		força (kN) / deslocamento (mm)	Força (kN) / deslocamento (mm)
Aço 6,3 mm	1	47,3 / 0,82	64,8 / 1,43
GFRP 6,3mm	1 barra	15,2 / 0,09	53,6 / 1,45
	2 barras	34,1 / 0,83	46,0 / 1,21
	3 barras	30,9 / 0,30	64,7 / 1,05
	4 barras	47,0 / 0,59	88,8 / 1,43
	5 barras	50,0 / 0,57	84,3 / 1,26
	6 barras	56,7 / 0,68	88,7 / 1,11

A análise da tabela 6.21 indica que a **1ª fissura** da viga armada com aço ocorreu com um carregamento de 47,3 kN e uma flecha de 0,82 mm e que um comportamento semelhante foi obtido com a viga armada com quatro barras de GFRP, com a **1ª fissura** em 47 kN e uma flecha correspondente de 0,59mm.

A figura 6.24 traz as curvas força (N) x deslocamento (mm) para as amostras de vigas de concreto reforçadas com uma barra de aço $\varnothing = 6,3\text{mm}$ e variando de um até seis barras GFRP de $\varnothing = 6,3\text{mm}$.

Figura 6.24 – Curvas força (N) x deslocamento para amostras de vigas de concreto reforçadas com 1 barra de aço $\varnothing = 6,3\text{mm}$ e variando de 1 até 6 barras GFRP de $\varnothing = 6,3\text{mm}$ na face inferior.

CAPÍTULO 7

Análise dos resultados, perspectivas e conclusões

7.1) Quanto à durabilidade da fibra de vidro frente ao meio alcalino do cimento

Portland

Analisando-se as tabelas 6.1 e 6.2, bem como a figura 6.1, pode-se verificar um desempenho bastante insatisfatório das telas de *FV impregnadas com PVC comercializada*, pois aos 14 dias de envelhecimento acelerado (EA) a resistência mecânica caiu 50%, chegando a 66% aos 21 dias de EA, quando submetido à tração simples. No ensaio à flexão das placas cimentícias armadas com estas telas, aos 7 dias a ruptura já se mostrava frágil, em decorrência da incapacidade da tela de FV trabalhar após a ruptura do concreto.

Em relação às telas de *fibra de vidro AR*, cujos resultados são vistos nas tabelas 6.3 e 6.4 e na figura 6.2, nota-se que a *tela de fibra de vidro AR* apresenta uma queda de 29,5% aos 14 dias de EA e 42,2% aos 21 dias de EA, ou seja, embora apresente resultados mais satisfatórios que as telas de *FV impregnadas com PVC comercializada*, ainda apresentam uma considerável perda de resistência mediante o processo de EA. Quanto ao desempenho da tela nas placas cimentícias quando submetidas à flexão, as amostras com 21 dias de EA já apresentam pouca ou nenhuma tenacidade.

A tabela 6.6 mostra o bom desempenho da formulação de PVC desenvolvida quanto ao ataque químico dos álcalis, tendo uma queda de resistência mecânica de 11,4% aos 7 dias, 23,1% aos 14 dias e 23,3% aos 21 dias de EA, valores de queda de resistência consideravelmente inferiores aos outros dois tipos de tela estudados. Em relação aos ensaios à flexão, nota-se que, pelos valores da tabela 6.8 o LOP das amostras com *tela de fibra de vidro desenvolvida* teve um acréscimo com o passar do tempo de envelhecimento acelerado.

Uma primeira hipótese que se pode levantar para este fato é que, como o processo de envelhecimento acelerado usado trata-se de uma cura térmica, os grãos de cimento que

ainda não haviam se hidratado com a cura convencional, tenham feito com a cura térmica, incrementando resistência ao compósito. Mas, quando se observa os resultados obtidos para as amostras com a *fibra AR*, na tabela 6.4, sendo o mesmo concreto, com a mesma cura convencional e envelhecimento acelerado, o mesmo não ocorre. Então, credita-se esse melhor desempenho à maior durabilidade da *tela de fibra de vidro desenvolvida*, se comparada às demais.

Analisando-se a mesma tabela 6.8, pode-se notar que a queda no valor do σ^* (criado para avaliar a resistência à flexão da fibra do compósito) para a *tela de fibra de vidro desenvolvida* foi de 3,9% aos 7 dias de EA, 4,1% aos 14 dias de EA e 7,5% aos 21 dias de EA. Se comparados aos valores obtidos com as amostras *impregnadas com PVC comercializada* (56% aos 7 dias, 59,3% aos 14 dias e 65,3% aos 21 dias) e com as amostras com *fibras AR* (19,8% aos 7 dias, 10,4% aos 14 dias e 58,3% aos 21 dias) conclui-se, novamente, que a tela de fibra de vidro desenvolvida apresenta melhor desempenho.

Quanto ao comportamento das curvas força x deslocamento, pode-se verificar que, para aquelas armadas com *tela comercializada*, há o pico do LOP, um certo deslocamento e uma curva ascendente até o ponto no qual há a ruptura da fibra. Na tela AR o mesmo acontece, porém com picos de menor intensidade. Note-se que, em ambos os casos, os valores de força após a ruptura da matriz (após o ponto de LOP) nunca são superiores aos do ponto do LOP. Já a figura 6.3 mostra pelas curvas força-deslocamento que o valor do MOR geralmente é maior que o LOP, evidenciando que a *tela de fibra de vidro desenvolvida* tem um melhor durabilidade no meio alcalino do cimento Portland.

Os dados fornecidos nas tabelas 6.9, 6.10 e 6.11 referem-se ao Índice de Tenacidade das amostras nas diversas idades. Nelas, quanto maior o I_{30} maior a tenacidade do material estudado. Analisando, primeiramente, o I_{30} dos três tipos de amostra, tem-se os valores de 15,69 para *tela impregnada comercializada*, 17,24 para *tela AR* e 11,92 para a *tela*

desenvolvida. Conforme o processo de envelhecimento acelerado foi sendo aplicado, o valor do I_{30} foi diminuindo, mostrando que o ataque alcalino do cimento Portland reduziu muito a tenacidade dos compósitos, inclusive daqueles armados com a *tela desenvolvida*. Esse resultado é contraditório, pois a *tela desenvolvida* mostrou-se ter um melhor desempenho que as demais no que diz respeito à durabilidade.

Uma hipótese para explicar esse fato é que, a queda do índice de tenacidade da tela desenvolvida não está relacionada à durabilidade e sim a problemas de aderência entre a superfície da impregnação de PVC e a matriz cimentícia. Essa hipótese também pode explicar o menor valor do I_{30} obtido por esse tipo de fibra antes de envelhecida (padrão).

Outro fato importante que os resultados do envelhecimento acelerado mostraram é quanto o comportamento da fibra AR aos 14 dias. Na tabela 6.4, observa-se que o valor do σ^* aos 7 dias foi de 1,9 MPa e aos 14 dias 2,2 MPa, ou seja, o processo incrementou resistência à fibra. Fato parecido ocorre no índice de tenacidade (I_{30}) pela tabela 6.10, o valor de I_{30} para amostra aos 7 dias foi 8,88 e 21,82 para amostra com 14 dias de envelhecimento acelerado.

Esses casos indicam que, embora se tenha avançado em relação ao desempenho das fibras de vidro no cimento Portland quanto à durabilidade – a resina de PVC desenvolvida neste trabalho é um desses avanços – os métodos usados para analisar o desempenho das fibras de vidro em relação à durabilidade não têm sido adequados.

Pela análise das micrografias feitas pelo MEV, primeiramente, na figura 6.4, nota-se o agressivo processo de ataque químico que as *fibras de vidro convencionais* sofreram com o tempo. Comparando-se a micrografia da *amostra padrão* mostrando os filamentos íntegros e as amostras aos 14 e 21 dias, verifica-se o intenso processo de corrosão da superfície das fibras com o tempo.

As micrografias da figura 6.6, mostram os filamentos das *fibras de vidro impregnadas com PVC comercializado*. Nelas nota-se a presença de material depositado em

sua superfície, possivelmente o polímero, mas não se nota qualquer tipo de corrosão, em qualquer idade de amostra.

A figura 6.8 traz as micrografias das *fibras AR* nas quais é possível notar a presença de produtos da hidratação na superfície dos filamentos e entre estes. A micrografia da fibra aos 21 dias, com ampliação de 3.000 vezes, mostra haver uma certa alteração da superfície do filamento, podendo ser corrosão ou incrustação de material depositado. A figura 6.9 traz uma ampliação dessa fibra em 7.000 vezes, mostrando que se trata de depósito de produtos da hidratação do cimento. Ou seja, nenhuma das micrografias evidenciou qualquer tipo de corrosão.

Nas micrografias da *tela de fibra de vidro desenvolvida* vê-se o material depositado (possivelmente polímero) na superfície dos filamentos. A micrografia aos 21 dias mostra uma maior intensidade desse material depositado. Porém, não há qualquer evidência de corrosão na superfície das fibras.

Analisando-se todas as micrografias feitas, pode-se concluir que apenas a fibra de vidro convencional (sem tratamento) sofreu corrosão. A fibra de vidro AR, não evidencia corrosão, apenas o acúmulo de produtos de hidratação na sua superfície e entre os filamentos, com isso, pode-se atribuir a queda de resistência à tração e à flexão pelo processo de envelhecimento acelerado a esse acúmulo, tal como haviam sugerido Bentur e Mindess (1990), Pardela e Del Aguila (1992), Purnell et al. (2000). Mas, como explicar a grande queda de resistência mecânica da *fibra de vidro convencional impregnada com PVC comercializado*? As micrografias não evidenciam corrosão nem o acúmulo de produtos de hidratação em nenhuma idade e a durabilidade destas, frente ao meio alcalino, se mostraram bastante pequena nos ensaios macroscópicos.

Quanto às micrografias das superfícies das *fibras convencionais impregnadas com PVC desenvolvido* a dúvida continua, pois não há sinais de corrosão das fibras, mas há o

acúmulo de material mostrado na micrografia aos 21 dias, que se supõe ser polímero. Suponhamos que o material depositado no filamento visto na micrografia fosse produto da hidratação, como se poderia explicar que justamente esse tipo de fibra tenha apresentado uma menor suscetibilidade ao ataque químico pelos ensaios macroscópicos?

A partir do exposto, supõe-se que, além dos dois fenômenos estudados pelos autores citados na bibliografia (corrosão das fibras e acúmulo de produtos da hidratação do cimento sobre a superfície e entre os filamentos), haja um terceiro possível fenômeno causador da pequena durabilidade da fibra de vidro frente o meio alcalino do cimento Portland. Em relação a isso, recomenda-se um futuro estudo sobre o assunto.

7.2) Quanto aos casos estudados de aplicação das telas

Em relação à aplicação da tela de fibra de vidro 1x1 nas placas cimentícias para o sistema *drywall* os resultados mostraram que o uso da tela é tecnicamente possível e viável. A amostra estudada usando o véu de poliéster nas faces externas da placa, abriu uma nova perspectiva no que se refere ao acabamento das superfícies. Embora não houvesse nenhum incremento no desempenho mecânico das peças com a introdução do véu, a superfície das placas ficou bastante lisa, efeito que hoje só é obtido com o uso de concretos com altos teores de argamassa.

O ensaio de impacto de corpo duro mostrou-se bastante prático e com resultados bastante satisfatórios. Quanto ao ensaio das placas analisadas, foi possível verificar que não há incremento muito significativo na tenacidade destas com o uso da tela, pois passou de 5,0 Joules da amostra sem tela, para 5,2 Joules para amostra com tela 1x1 e 5,6 Joules para amostra com tela 4x4.

A maior virtude obtida com o uso da tela de fibra de vidro nas placas foi a mudança no tipo de ruptura. Passou-se de uma ruptura frágil das amostras de placas

cimentícias sem tela (padrão), para ruptura dúctil, quando se usa a tela de fibra de vidro na superfície.

Os resultados deste ensaio apontam para uma nova possibilidade do uso das telas de fibra de vidro, nas quais as peças cimentícias sejam solicitadas ao impacto, como as defensas de estradas (guard-rail), pisos industriais e de aeroportos, postes, etc..

Nos estudos da substituição do aço pela tela de fibra de vidro, no caso das placas cimentícias para piso elevado, a NBR EB – 2101 especifica um carregamento mínimo de 4400 N e uma flecha de 2,6mm e um coeficiente de segurança 3, para placas de 60cm x 60cm e espessura de 4cm. Então, os valores obtidos na placa armada com uma tela (5620 N na ruptura e flecha de 1,17 mm) não cumpriu o determinado pela norma. O mesmo ocorreu com a placa armada com duas telas (força de ruptura de 6220N e flecha de 0,95mm).

Acredita-se que seja possível obter melhores resultados usando uma tela formada por *rebars* (GFRP), que têm maior resistência que as telas impregnadas com PVC.

7.3) Quanto ao desempenho das barras de FRP em relação à aderência com o concreto

As barras pultrudadas da HBrothers, de procedência dos EUA, apresentou uma resistência de aderência de 17,6 MPa, cerca de 3% inferior a do aço CA-50, que apresentou uma resistência de 18,2 MPa, o que pode ser considerado satisfatório.

A barra de GFRP nacional usada no ensaio, já pelo seu próprio desenho demonstra ter uma menor aderência, pois, embora tenha mossas (*roving* formando uma hélice), elas não receberam camada de areia na superfície como ocorre com as barras da HBrothers. A aderência obtida foi de 9,3 MPa, ou seja, cerca de 50% da aderência da barra de aço e 47% da HBrothers.

Em relação à adaptação do ensaio de aderência, proposta neste trabalho, os resultados mostraram que o método é adequado, pois o escorregamento na garra ou

estrangulamento das barras analisadas deixaram de ser uma variável. Outro fato relevante é que, em todos os casos analisados, a perda de aderência do concreto com as barras se deu no cilindro contendo o concreto analisado, ficando o cilindro com o concreto padrão intacto.

7.4) Quanto à análise da correspondência área de FV x área de aço

Uma análise da tabela 6.20, que mostra os resultados dos ensaios das vigas de concreto armadas com duas barras de aço CA-50 de $\varnothing = 6,3\text{mm}$ e duas barras de GFRP de $\varnothing = 6,3\text{mm}$, mostra que a primeira fissura destas se dá em torno de 54 kN (média) para as armadas em aço e 20 kN para as armadas em GFRP. Considerando a diferença de módulo de elasticidade (E) existente entre os materiais ($E = 210\text{ GPa}$ para o aço e $E = 40\text{ GPa}$ para o GFRP) essa diferença de comportamento das vigas já era esperada.

Quando se analisa a força máxima obtida pelas vigas, nota-se que o valor médio desta fica em torno de 55 MPa para o aço e 46 MPa para o GFRP, portanto, dentro de uma mesma ordem de grandeza. O que diferencia o comportamento entre os dois materiais, nesse caso, é a flecha apresentada para essa força máxima: as vigas armadas em GFRP têm deslocamentos três vezes maiores que as armadas com barras de aço.

Observando as figuras 6.21 e 6.22 pode-se perceber que as vigas armadas em GFRP são muito mais dúcteis e tenazes que as armadas em aço.

Uma vez que a diferença existente entre os módulos E dos materiais (fibra de vidro e aço) impossibilita a substituição de uma certa seção de armadura de aço por uma outra de GFRP na mesma ordem de valor, procurou-se determinar empiricamente a correspondência *área de aço x área de GFRP*.

A tabela 6.21 mostra que a primeira fissura das vigas ocorre na mesma ordem de valor quando se usam quatro barras de GFRP em uma viga e uma barra de aço em outra. A força última obtida nesta viga (armada com 4 barras de GFRP) é de 88,8 kN apresentando

uma flecha de 1,25 mm, ou seja, uma força superior à viga armada com uma barras de aço, que foi de 64,8 kN.

A conclusão que se chega é que, para limitar a flecha excessiva das vigas armadas com GFRP, é necessário usar cerca de quatro vezes a área de armadura requerida para aquelas armadas em aço. Ressalta-se que esse valor serve apenas para dar uma *ordem de grandeza* do valor de armadura entre os materiais, pois, como já foi destacado no *estado da arte* desta tese, a resistência e o módulo de elasticidade das barras de GFRP, diferentemente do aço, variam conforme o diâmetro das barras, bem como variam com o tipo de fibra ou resina usadas, etc.. Para se obter, com precisão, a correspondência entre área de GFRP e aço necessários para armar um elemento estrutural, deve-se primeiramente ensaiar cada um dos materiais, obter a força de ruptura, o módulo de elasticidade e a deformação e, com esses dados calcular as estruturas seguindo as rotinas de cálculo de concreto armado.

Um fator muito importante a ser levado em conta é que a fibra de vidro tem ruptura frágil, sem apresentar patamar de escoamento ou deformação plástica. Esse fato faz com que o cálculo das estruturas armadas em fibra de vidro (barras ou telas) requeira maior cuidado por parte dos engenheiros quanto à adoção de coeficientes de segurança.

CONCLUSÕES:

- 1) A película de resina PVC desenvolvida neste doutorado proporciona uma efetiva durabilidade às fibras de vidro sem características álcalis resistente quando usadas no meio alcalino do cimento Portland;**
- 2) As fibras de vidro características álcalis resistente, quando impregnadas com a resina desenvolvida tem grande potencial para serem usadas em matrizes de cimento Portland, sendo que as telas de abertura 4 cm x 4 cm e 1cm x 1 cm são apenas um exemplo de formato a ser usado;**

- 3) As telas de fibra de vidro impregnadas com a resina PVC desenvolvida tem grande potencial para ser usada em peças esbeltas à base de cimento Portland juntamente com as barras de GFRP.**

CAPÍTULO 8

Potencialidade para o uso das fibras de vidro na construção civil

8.1) Quanto ao uso da fibra de vidro picada em matrizes cimentícias

No *estado da arte* desta tese foi analisada a questão do módulo de elasticidade das fibras e sua aplicação em matrizes cimentícias. Foi visto que os valores do módulo de elasticidade (E) dos concretos e argamassas convencionais adotados são, respectivamente, 30 GPa a 40 GPa e 25 GPa e 35 GPa, segundo TEZUKA (1989). Viu-se, também, que as fibras de vidro picadas são usadas de forma mais intensiva em duas situações: como adição de argamassas e concretos e para o controle da fissuração.

O uso das fibras picadas como adição esbarra em dois problemas relativos à durabilidade: a corrosão das *fibras convencionais* e o depósito dos produtos de hidratação entre os filamentos ou na superfície destes causando a perda de tenacidade, nas fibras AR, já que estas estão livres da corrosão. Então, diante do exposto, é possível concluir que, atualmente, não existe no mercado nenhum tipo de fibra de vidro que possa ser usado em matrizes cimentícias na forma picada, que tenha a sua durabilidade garantida, por mais de 14 anos³⁴. Talvez as fibras AR possam ser usadas em elementos construtivos que tenham uma expectativa de vida útil menor que esse.

Quanto ao uso das fibras de vidro picadas atuando no controle da fissuração das matrizes cimentícias, cabe a seguinte análise: sabe-se que o problema da fissuração está relacionado ao aumento de temperatura da matriz em decorrência da exotermia da hidratação do cimento Portland, ou da evaporação muito rápida da água que compõe o concreto/argamassa. Também é conhecido que o ganho de resistência à compressão das matrizes cimentícias se faz ao longo do tempo (mais intensamente nos 28 primeiros dias) e que o

³⁴ Lembrando que, segundo Litherland et al (1981), cada dia de exposição ao processo de envelhecimento acelerado à temperatura de 65 °C corresponde a um ano de envelhecimento natural sob condições climáticas do Reino Unido.

aumento do módulo de elasticidade destas acompanha o aumento da resistência. Então, como justificar o uso da fibra de vidro com função *anti-crack*? Pelo fato desta ter módulo de elasticidade maior que as fibras sintéticas comuns (polipropileno, nylon, poliéster, etc)? Mas, se a função da fibra *anti-crack* é atuar nos períodos em que a hidratação do concreto é mais intensa, então poderiam ser usadas fibras com menor E , uma vez que nesse período o módulo das matrizes cimentícias ainda está baixo.

8.2) Quanto ao uso da fibra de vidro em tela ou barra em matrizes cimentícias

Os resultados dos ensaios realizados mostraram que as fibras de vidro na forma de telas ou barras têm grande potencial de uso em matrizes cimentícias. Porém, é necessário que se garanta a durabilidade destas frente aos agentes causadores da degradação das propriedades mecânicas. Já se comentou que não é possível garantir que a fibra de vidro AR esteja imune à perda das propriedades mecânicas pelo ataque alcalino, nem se pode afirmar que toda a fibra que tenha a impregnação com resina polimérica tenha sua durabilidade garantida.

As telas de fibra de vidro têm uma limitação processual ligada à má qualidade da impregnação quando os fios da fibra de vidro são muito grossos. Com isso, as telas de fibra de vidro impregnadas não são adequadas para resistirem a valores de ações muito elevados, mas podem ser usadas junto com barras do tipo FRP, atuando como armadura de pele, por exemplo.

Ainda em relação às telas de fibra de vidro, devem ser realizados novos estudos no que diz respeito à aderência resina – matriz cimentícia, pois numa análise visual de algumas amostras de placas cimentícias ensaiadas, notou-se haver a possibilidade de ter ocorrido algum escorregamento da fibra impregnada.

Na análise dos resultados dos ensaios de envelhecimento acelerado comentou-se que deverão ser realizadas novas pesquisas de durabilidade, e este estudo deverá abranger

todos os tipos de fibra de vidro: tipo E, AR e impregnadas. Consultando a bibliografia sobre o assunto, foi possível notar que a questão da durabilidade das fibras de vidro ainda está longe de ser resolvida e, ainda, que se deve reavaliar o método de estudo do processo de degradação, pois eles ainda estão muito focados em ensaios macroestruturais e análise de micrografias do MEV, que muitas vezes conduzem a conclusões de ordem subjetivas. As micrografias do MEV das amostras de fibra de vidro convencional impregnadas com PVC encontradas no mercado são uma comprovação disso, pois nelas não se nota corrosão das fibras, nem depósito de produtos da hidratação, mas, sua durabilidade é muito pequena em matrizes cimentícias.

Em relação às barras de GFRP, o seu uso como armaduras de matrizes cimentícias parece ser bastante promissor, principalmente em ambientes de elevada corrosão ou onde se requer transparência magnética. Mas, para isso ser possível, é importante um estudo detalhado da distribuição da armadura na peça, pois, como mostrado nessa tese, o volume ocupado pela armadura será cerca de quatro vezes maior que aquele ocupado pelo aço. Em relação ao fato do custo dessa estrutura ser mais elevado que aquela estruturada em aço acredita-se que isso seja uma questão pouco relevante frente ao ganho na durabilidade frente aos meios agressivos.

A fabricação de armaduras em fibra de vidro tende a ser barateada em função do maior ganho da produção em escala, pelo aumento da demanda que se pode obter.

Por exemplo, a armação das amostras de placas cimentícias para piso elevado com grelhas feitas de barras de GFRP, seria um caso bastante interessante para ser estudado, com grande probabilidade de ter bom êxito. Outra aplicação para as grelhas feitas com GFRP seria em substituição das telas eletrosoldadas nas fundações tipo radier, quando o solo for agressivo.

Uma grande limitação para o uso das barras de GFRP é o fato de não ser possível fazerem-se curvas (dobras) de raio pequeno, tal como requerido nos ganchos e dobras de estribos para pilares e vigas. Essa impossibilidade reside no fato de se usar resinas termofixas (poliéster, epóxi, etc.) na fabricação das barras. Acredita-se que a preferência pelo uso das resinas termofixas está no fato destas serem mais resistentes ao ataque químico e suportarem maiores temperaturas. Porém, o uso de resinas termoplásticas poderia ser uma nova vertente de fabricação de FRP's.

8.3) Quanto ao uso da fibra de vidro em tela ou barra em elementos de argamassa armada

As limitações de uso das telas ou barras de fibra de vidro na argamassa armada são as mesmas já citadas para os outros elementos produzidos com o cimento Portland. Por outro lado, como visto na análise bibliográfica, as peças de argamassa armada exploram as formas geométricas para buscar rigidez e leveza já em sua própria filosofia de concepção, o que representa uma vantagem frente às placas planas, por exemplo.

Os resultados mostrados neste trabalho apontam para a necessidade de se fixar a flecha que a estrutura poderá apresentar quando carregada como limite de cálculo. Foi visto que, uma das formas de contornar a grande deformação que a armadura de fibra de vidro proporciona à estrutura, em decorrência de seu pequeno módulo de elasticidade, é aumentar a quantidade de armadura de fibra de vidro (cerca de quatro vezes mais que do aço). Porém, com o aumento da inércia da peça, é possível diminuir a flecha. A figura 8.1 ilustra esta possibilidade: em (A) uma viga prismática com sua altura aumentada possibilitando maiores valores de inércia e conseqüente menor valor de flecha para um dado carregamento; em (B) uma viga/ calha (peça típica da argamassa armada), tendo a altura de suas abas aumentada,

para possibilitar maior inércia. Note que nos exemplos a área da armadura de cada tipo de peça continuou constante.

Figura 8.1 – Exemplos de possibilidade de aumento da inércia alterando a geometria das peças: em (A) uma viga prismática; em (B) uma viga/ calha.

Em relação à durabilidade, o uso de armadura não metálica afastaria a possibilidade de menor desempenho frente à pequena espessura de cobrimento, ou à carbonatação do concreto, que são patologias recorrentes nesse tipo de estrutura. A adoção de relação a/c pequena, com adição de sílica ativa e a modificação com látex garantiriam, além de uma boa durabilidade do concreto, uma boa aderência com a armadura, possibilitando uma argamassa armada com qualidade e durabilidade.

Com isso, seria possível resgatar a tecnologia da argamassa armada que teve seu declínio atribuído à baixa durabilidade. Poderiam ser resgatados os estudos de Lelé relativos

às peças para canalização de córregos ou drenagem de água pluvial, bem como a construção de reservatórios de água, ou ainda, em tanques de tratamento de esgoto.

8.4) Quanto ao uso da fibra de vidro em obras de geotecnia

Nas obras de geotecnia há uma grande demanda para a utilização de produtos com estrutura na forma de grelha para serem usadas como reforço. Essas grelhas são fabricadas em polietileno (PE), polipropileno (PP) e poliéster (PET).

O Polietileno (PE) tem elevada resistência química e pequeno custo, mas é suscetível aos raios UV e apresenta elevada suscetibilidade à fluência; o Polipropileno (PP), que representa cerca de 83% dos geotexteis usados no Brasil, tem um custo relativamente pequeno, mas apresenta deformações na ordem de 12% e, embora tenha boa resistência aos álcalis, é suscetível aos raios UV. O PP também é bastante suscetível à fluência e à oxidação; o Poliéster (PET), que representa cerca de 14% dos geotexteis usados, são requisitados quando se necessita de geosintéticos com alta resistência à tração, mas o material apresenta deformações na ordem de 12% e pode sofrer degradação sob condições de acidez ou de elevada alcalinidade (VERTEMATTI, 2004)^(xI)

Pelo exposto conclui-se que, para esse tipo de aplicação, há uma grande possibilidade de usar as telas de fibra de vidro como geogrelhas, pois esta possui elevada resistência à tração e um módulo de elasticidade elevado (se comparado ao do PE, PP e PET), além de ter valores de deformação máxima na ordem de 2%, muito aquém das observadas nos materiais atualmente utilizados nas geogrelhas (12%). Mas, para ser usada nesse tipo de aplicação, as telas de fibra de vidro deverão ter algumas propriedades melhoradas, principalmente no que se refere aos chamados *esforços de instalação*, que são as solicitações relativas ao transporte, corte, colocação e compactação de camadas de solo ou brita, etc.. A experiência tem mostrado que as fibras de vidro sem impregnação, ou aquelas impregnadas com resina acrílica ou látex acrílico, não apresentam bom desempenho a esses esforços de

instalação. Mas, a impregnação das fibras com o PVC desenvolvido nesse trabalho pode representar melhor desempenho frente aos *esforços de instalação*, pois resultam em telas flexíveis e com menor tensão de cisalhamento entre os filamentos.

As possíveis aplicações para o produto poderia ser no reforço de aterros sobre solos moles e no reforço de muros e taludes de contenção (figura 8.2).

Figura 8.2 - Exemplo esquemático de solos reforçados com geossintéticos, em (a) um muro e em (b) talude íngreme. (Fonte: VERTEMATTI, 2004)

Outra aplicação possível das telas de fibra de vidro é como camada de reforço de base de pavimentos, controlando, ou reduzindo ao mínimo, manifestações patológicas provenientes da elasticidade dos pavimentos flexíveis, tais como o afundamento de trilha de roda ou as trincas por fadiga do revestimento. Além de evitar as patologias citadas, poderiam ser reduzidas as espessuras de projeto de camadas granulares. A figura 8.3 mostra o uso de geogrelhas como para reforço para pavimentos.

Figura 8.3 – Exemplo de aplicação da tela de fibra de vidro em pavimentos

Referências Bibliográficas

-
- ⁱ EKANE, E. B. **Estudo de fissuração em concreto armado com fibras e armadura convencional**. São Carlos: dissertação de mestrado. EESC - USP 1999.
 - ⁱⁱ MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Editora Pini, 1994.
 - ⁱⁱⁱ TEZUKA, I. **Concreto armado com fibras**. São Paulo: ABCP, 1989.
 - ^{iv} PARDELA, M. L. S. & DEL AGUILA, A. **El envejecimiento de las pastas de cemento reforzadas con fibras de vidrio**. Revista Materiales de Construcción, vol. 42. N. 226. Abril / mayo / junio, 1992.
 - ^v PURNELL, P.; SHORT, N.R.; PAGE, C.L.; MAJUNDAR, A.J. **Microstructural observations in new matrix glass reinforced cement**. Pergamon, Cement and Concrete Research, Vol 30, Agosto 2000.
 - ^{vi} PERUZZI, A. P. **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa**. São Carlos: dissertação de mestrado. EESC – USP, 2002.
 - ^{vii} SILVESTRE FILHO, G. D. **Comportamento mecânico do poliuretano derivado do óleo de mamona reforçado por fibra de carbono: contribuição para o projeto de hastes de implante de quadril**. São Carlos: dissertação de mestrado. EESC-USP, 2001
 - ^{viii} CALLISTER JR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002.
 - ^{ix} BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced cementitious composites**. Londres: Elsevier applied science. 1990.
 - ^x GOMES, C. E. M.; FERREIRA, O. P. **Utilização da fibra de poliamida como reforço de pastas de cimento Portland modificada com polímero**. Mendoza: XXXI Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural, 2004.
 - ^{xi} SAVASTANO JR, H. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para construção de baixo custo**. São Paulo: tese de livre docência, EPUSP, 2000.
 - ^{xii} OLIVEIRA, C. T. A. – **Desenvolvimento de um painel de gesso reforçado com fibras de vidro para vedação vertical**. Dissertação de mestrado, EPUSP, 1995.
 - ^{xiii} CARVALHO, A. – **Fibras de vidro**. São Paulo: EPUSP Simpósio Internacional sobre materiais reforçados com fibras para construção civil, anais, 1993.
 - ^{xiv} INTERNATIONAL GLASSFIBRE REINFORCED CONCRETE ASSOCIATION. **Specification for the manufacture, curing and testing of GRC products**. International Glassfibre Reinforced Concrete Association, Third edition, 2006.
 - ^{xv} BARTOS, P. J. M. & ZHU, W. **Effect on microsilica and acrylic polymer treatment on the ageing of GRC**. Cement & concrete composites ed. 18, 1996.
 - ^{xvi} MEDEIROS, R. C. F. & BARROS, M. M. S. B. **Vedações verticais em gesso acartonado – Recomendações para os ambientes úmidos**. São Paulo: EPUSP, boletim técnico, 2005.

-
- xvii KRÜNER, P. G. V. **Análise de painéis de vedação nas edificações em estrutura metálica**. Ouro Preto: dissertação de mestrado, UFOP, 2000.
- xviii SPENCE, W. **Installing & finishing drywall**. New York: Sterling publishing Co.. 1998.
- xix ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR EB 2101**. Pisos Elevados. Rio de Janeiro, 1990.
- xx Medeiros, J. S. **Prevenção de trincas em alvenarias através do emprego de telas soldadas como armadura e ancoragem**. São Paulo: EPUSP, 1999.
- xxi Libório, J. B. ; Mello, A. B. **Patologias das construções**. São Carlos: Notas de aula, EESC. USP,
- xxii Thomas, E. – **Tecnologia, gerenciamento e qualidade na construção**. São Paulo: Editora Pini, 2001.
- xxiii AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440. 1R-03**: Guide for the design and constructions of concrete reinforced with FRP bars. ACI, 2003.
- xxiv AGNESINI, M. V. C. **Sistema construtivo com elementos pré-fabricados de argamassa armada: uma alternativa para a execução de pontilhões rodoviários em zonas urbanas e estradas vicinais**. São Carlos: tese de doutorado, EESC-USP, 1988.
- xxv HANAI, J. B. **Construções de Argamassa armada: fundamentos tecnológicos para projeto e execução**. São Paulo: editora PINI, 1992
- xxvi CAMPOS, P. E. F. **Da argamassa armada ao microconcreto de alto desempenho: perspectivas de desenvolvimento para a pré-fabricação leve**. São Paulo: tese de doutorado, FAUUSP, 2002
- xxvii GIONGO, J. S. **Argamassa armada: dimensionamento de perfis submetidos à flexão: Fundamentos e experimentação**. São Carlos: tese de doutorado, EESC-USP, 1990.
- xxviii ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11173**. Projeto e execução de argamassa armada. Rio de Janeiro, 1990.
- xxix ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- xxx NEVILLE, A. M. **Propriedade do concreto**. São Paulo: Editora Pini, 2ª edição, 1997.
- xxxi ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos: dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. São Carlos: tese de doutorado, Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais – USP, 2003.
- xxxii SILVA, V. M. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa**. São Carlos: dissertação de mestrado, Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais – USP, 2002.
- xxxiii LITHERLAND, K. L.; OAKLEY, D. R.; PROCTOR, B. A. **The use of accelerated ageing produces to predict the long term of GRC composites**. Cement and Concrete, Concrete Magazine, November/ December, 1981.
- xxxiv TAKEYA, T. **Análise experimental de estruturas**. São Carlos: notas de aula, EESC-USP, 2000.
- xxxv AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-6637-01**. Standard test method for determining tensile properties of geogrids by the single or multi-rib test method. Philadelphia. 2001.

-
- ^{xxxvi} AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-947-89**. Standard test method for flexural properties of thin-section glass-fiber-reinforced concrete (using simple beam with third-point loading. Philadelphia. 1989.
- ^{xxxvii} ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR MB-3385**. Determinação da resistência às cargas verticais concentradas. Rio de Janeiro. 1991.
- ^{xxxviii} KATZ et al. **Effect of Hight Temperature on Bond Strength of FRP Rebars**. Journal of Composites for Construction, May, 1999.
- ^{xxxviii} TAVARES, D. H. **Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de FRP**. São Carlos: dissertação de mestrado, EESC-USP, 2006.
- ^{xxxix} ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**. Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1991.
- ^{xl} VERTEMATTI, J. C. **Manual brasileiro de geossintéticos**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2004.