

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE LAJE MISTA DE  
CONCRETO COM PERFIS PULTRUDADOS DE MATERIAIS  
COMPOSTOS AVANÇADOS

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, para a obtenção do Título de DOUTOR em Engenharia Civil.

ALMIR BARROS DA SILVA SANTOS NETO

Florianópolis, fevereiro de 2006

A Claudete,  
minha esposa, e Eduardo, meu filho,  
com todo o meu amor.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo exemplo e educação transmitidos.

A professora Henriette Lebre La Rovere, pela convivência agradável e amizade, ao longo destes anos. A quem devo o aprofundamento dos meus conhecimentos no campo da engenharia de estruturas.

A professora Evelise Chemale Zancan, coordenadora do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), pelo apoio e incentivo na realização deste trabalho.

Aos colegas Fernando Pelisser e Rodrigo da Mata, pelos valiosos auxílios na execução das etapas experimentais.

Aos Bolsistas César Bussolo e Gabriela Damo, pela cooperação na preparação e realização de alguns ensaios.

A UNESC, pela licença concedida para o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC que contribuíram para o enriquecimento deste trabalho.

À empresa ENMAC – Materiais Compostos, pela doação dos perfis pultrudados de PRFV.

À empresa SIKA, pelo fornecimento das resinas utilizadas no estudo da aderência.

À empresa TECNOCELL pela doação dos blocos de EPS utilizados na confecção das lajes.

A FAPESC (Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Estado de Santa Catarina) pelo aporte financeiro dado à pesquisa.

## SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	v
<b>Lista de Figuras</b>	viii
<b>Lista de Tabelas</b>	xiii
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b>	xv
<b>Lista de Símbolos</b>	xvi
<b>Resumo</b>	xvii
<b>Abstract</b>	xviii
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	
1.1. Considerações Iniciais	19
1.2. Justificativa	24
1.3. Objetivo Geral	25
1.4. Objetivos Específicos	26
1.5. Ineditismo	26
1.6. Contribuição Científica	27
1.7. Estrutura do Trabalho	28
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	
2.1. Introdução	30
2.2. Materiais Compostos Avançados	30
2.2.1. Generalidades	30
2.2.2. Constituição dos Materiais Compostos Avançados	33
2.2.2.1. Fibras (Fase Dispersa)	34
2.2.2.2. Matriz (Fase Contínua)	41
2.2.3. Fabricação dos Materiais Compostos Avançados	45
2.3. O PRF Aplicado na Engenharia Civil	50
2.3.1. Recuperação e Reforço Externo de Estruturas	51
2.3.2. Reforço Interno para Estruturas de Concreto	54
2.3.3. Desenvolvimento de Estruturas Novas em PRF	56
2.4. Bibliografia Consultada Ligada Diretamente ao Tema da Pesquisa	80
<b>3. ANÁLISE MICRO E MACROMECAÂNICA DOS COMPOSTOS</b>	
3.1. Análise Micromecânica dos Compostos	98
3.1.1 Modelos Semi-Empíricos	102
3.1.2 Resistência de uma Lâmina Unidirecional	103
3.2. Análise Macromecânica dos Compostos	104
3.2.1. Análise Macromecânica do Laminado	105
3.2.2. Forças e Momentos Resultantes no Laminado	107
3.3 Considerações Complementares	109
<b>4. RIGIDEZ À FLEXÃO DOS PERFIS PULTRUDADOS</b>	
4.1. Introdução	110
4.2. Teoria de Viga	112
4.3. Aspectos Teóricos do Ensaio de Flexão nos Perfis Pultrudados	114
4.4. Descrição dos Materiais e Preparação dos Ensaios	117



4.5. Realização dos Ensaios de Flexão nos Perfis de PRFV	120
4.6. Análise Numérica pelo Método dos Elementos Finitos	124
4.7. Comparação entre os Resultados Analíticos, Numéricos e Experimentais	125
4.8. Considerações Complementares	127
<b>5. INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO NA FISSURAÇÃO POR RETRAÇÃO PLÁSTICA</b>	
5.1. Introdução	129
5.2. O Concreto Reforçado com Fibras	131
5.2.1. Generalidades	131
5.2.2. Os Mecanismos de Ação das Fibras	131
5.3. Fissuração por Retração Plástica em Placas de Concreto	133
5.4. Programa Experimental	137
5.5. Resultados Experimentais	142
5.6. Análise Estatística dos Resultados Obtidos	147
5.7. Considerações Complementares	151
<b>6. ADERÊNCIA CONCRETO/PRF</b>	
6.1. Introdução	153
6.2. Estudo Experimental da Interface Concreto/PRF	156
6.3. Análise Numérica Preliminar do Ensaio de Aderência	158
6.4. Análise Experimental da Aderência Concreto/PRF	162
6.5. Análise dos Resultados da Aderência Concreto/PRF	172
6.6. Considerações Complementares	176
<b>7. DIMENSIONAMENTO E ENSAIOS DE FLEXÃO DA LAJE MISTA</b>	
7.1. Introdução	177
7.2. Laje Proposta em Concreto/PRFV	178
7.3. Análise Teórica	183
7.4. Critérios de Dimensionamento	185
7.5. Ensaio de Flexão a Quatro Pontos para Carregamento de Curta Duração	188
7.5.1. Introdução	188
7.5.2. Procedimento Experimental	190
7.5.3. Resultados dos Ensaios Experimentais	196
7.5.4. Análise Comparativa Entre os Resultados Experimentais, Teóricos e Numéricos	204
7.5.5. Considerações Complementares	208
7.6. Ensaio de flexão com carregamento uniformemente distribuído de longa duração	209
7.6.1. Introdução	209
7.6.2. Procedimento Experimental	209
7.6.3. Resultado do Ensaio Experimental	211
7.6.4. Considerações Complementares	213
<b>8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	
8.1. Introdução	214
8.2. Conclusões Sobre os Estudos dos Componentes da Laje Mista	214
8.2.1. Perfil Pultrudado de PRFV	214
8.2.2. Aderência Concreto/PRFV	215
8.2.3. Adição de Fibras Curtas de Polipropileno no Concreto	215
8.3. Conclusões Sobre os Ensaios à Flexão da Laje Mista e Análise Numérica	215
8.3.1. Flexão à quatro pontos	216
8.3.2. Ensaio de Fluência	216

---

8.4. Considerações Sobre a Aplicação dos PRF na Engenharia Civil	217
8.5. Recomendações para Trabalhos Futuros	218
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>219</b>
<b>ANEXOS</b>	
ANEXO A - Estimativa Carga de Ruptura no Ensaio de Flexão do Perfil H de 10cm de Altura.	230
ANEXO B – Valores Obtidos nos Ensaio para o Diagrama da Figura 4.11	232
ANEXO C – Propriedades Elásticas da Lâmina Unidirecional de Rovings - Resistência de um Laminado Unidirecional de PRFV (Fibra de Vidro - Poliéster) – Teoria Clássica de Laminação: Determinação das Propriedades do Laminado de PRFV.	233
ANEXO D - Valores obtidos nos ensaios de perda de massa e fissuração na retração.	240
ANEXO E – Definição Preliminar do Comprimento da Laje Unidirecional Concreto/PRF para o Estado Limite de Serviço.	241
ANEXO F – Análise Teórica – Estimativa Elástica da Laje Mista com Perfil H.	246

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Relação da importância de aplicação dos materiais ao longo do tempo.	32
FIGURA 2.2	Comparação entre algumas propriedades dos perfis pultrudados de PRF, tendo valores de referência perfis em fibra de vidro e resina poliéster.	34
FIGURA 2.3	Classificação das principais fibras contínuas de acordo com o JCI TC952 (1998).	35
FIGURA 2.4	Diagrama tensão-deformação de algumas fibras.	36
FIGURA 2.5	Relação entre resistência dos PRF, disposição e concentração das fibras.	37
FIGURA 2.6	Concepção dos materiais compostos.	37
FIGURA 2.7	Composto reforçado com fibras contínuas.	38
FIGURA 2.8	(a) Fibra de vidro na forma de filamentos ( <i>rovings</i> ); (b) Fibra de vidro na forma de manta de filamentos entrelaçados ( <i>woven rovings</i> ).	40
FIGURA 2.9	(a) Fibra de vidro na forma de manta de fios picados ( <i>chopped strand mat</i> ); (b) Fibra de vidro na forma de manta de fios contínuos ( <i>continuous strand mat</i> ).	41
FIGURA 2.10	(a) Fibra de vidro na forma de manta fina ou véu ( <i>surfacing mat ou veil</i> ); (b) Fibra de vidro na forma de tecido ( <i>cloth/glass fabric</i> ).	41
FIGURA 2.11	Polímero etileno.	42
FIGURA 2.12	Polímeros termoplásticos e termofixos.	43
FIGURA 2.13	Esquema do processo de pultrusão.	47
FIGURA 2.14	Esquema da seção de um perfil pultrudado. Sendo: A - Resina padrão; B - Véu; C - Manta de fios contínuos; D – Filamentos.	48
FIGURA 2.15	Seções transversais típicas dos perfis pultrudados.	49
FIGURA 2.16	Detalhe de reforço em uma coluna com PRF.	52
FIGURA 2.17	Reforços externos típicos utilizados em vigas de concreto armado para flexão e cisalhamento.	52
FIGURA 2.18	Reforço efetuado no pavimento térreo, no edifício de 5 pavimentos.	53
FIGURA 2.19	Reforços internos em PRF.	54
FIGURA 2.20	Reforço interno de um tabuleiro de ponte sujeito a ciclos de degelo com sal.	55
FIGURA 2.21	Torre construída com PRF no <i>Sun Bank Building</i> .	56
FIGURA 2.22	Edifício em PRF na Suíça: (a) em construção, (b) obra finalizada.	57
FIGURA 2.23	Edificação para escadas construída em PRF.	58
FIGURA 2.24	(a) fabricação e (b) instalação do tabuleiro da <i>ponte Chemung Country Bridge</i> , em Nova York.	61
FIGURA 2.25	Passarela <i>Antioch Composite Pedestrian Bridge</i> , localizada em Antioch, Illinois.	62
FIGURA 2.26	Recuperação da <i>LaSalle Street Bridge</i> , sobre o Rio Chicago, na cidade de Chicago, Illinois.	62
FIGURA 2.27	Instalação da ponte em composto sobre o rio <i>Laurel Lick</i> .	63
FIGURA 2.28	Instalação da ponte em composto sobre o rio <i>Wickwire run</i> .	64
FIGURA 2.29	Panorama da passarela <i>Popolopen Creek Footbridge</i> , em Nova York.	64
FIGURA 2.30	Panorama da ponte instalada na UMR.	65
FIGURA 2.31	<i>St. Francis Street Bridge</i> , instalada no Missouri.	65
FIGURA 2.32	Passarela construída no campus da UCSD.	66
FIGURA 2.33	Ponte de <i>Bonds Mill Lift</i> , localizada na Inglaterra.	66
FIGURA 2.34	Passarela <i>Aberteldy Bridge</i> , na Escócia.	67
FIGURA 2.35	Passarela com cabos estaiados em PRF na Dinamarca.	68
FIGURA 2.36	Instalação da ponte em PRF sobre o <i>Flaz River</i> em 1997.	68
FIGURA 2.37	Passarela na Alemanha em PRF.	69
FIGURA 2.38	Passarela em fibra de vidro construída na Espanha.	69
FIGURA 2.39	Passarela <i>Schwerin</i> em fibra de vidro, construída na Alemanha.	70
FIGURA 2.40	Casca de fibra de carbono preenchida com concreto.	71
FIGURA 2.41	Sistema modular de tubos híbridos.	71
FIGURA 2.42	Seção transversal da viga híbrida.	72
FIGURA 2.43	Geometria da <i>King Stormwater Channel Bridge</i> .	73
FIGURA 2.44	Layout da ponte <i>King Stormwater Channel Bridge</i> .	74
FIGURA 2.45	Detalhe da conexão das vigas longarinas com o tabuleiro de PRFV.	74

FIGURA 2.46	Desenho esquemático do viaduto estaiado I-5/Gilman em materiais compostos avançados.	75
FIGURA 2.47	Seção transversal da superestrutura do I-5/Gilman.	75
FIGURA 2.48	Ilustração dos elementos estruturais do viaduto I-5/Gilman.	76
FIGURA 2.49	Pier de <i>Noorfland Harbour</i> , na província de Zeeland.	77
FIGURA 2.50	Pier em Zurique, na Suíça.	77
FIGURA 2.51	Estação de Lindevang em Copenhagen.	78
FIGURA 2.52	(a) Panorama do posto de abastecimento de combustível; (b) detalhe construtivo de um dos nós da estrutura do posto.	78
FIGURA 2.53	(a) Panorama do pavilhão destinado à armazenagem de defensivos agrícolas; (b) detalhe da montagem do pavilhão.	79
FIGURA 2.54	Detalhe do laboratório de energia elétrica da Eletrobrás.	79
FIGURA 2.55	(a) Panorama interno e; (b) vista geral da torre de sinalização da Marinha do Brasil.	80
FIGURA 2.56	Exemplo dos tipos de construções sanduíche: (a) material de enchimento sólido; (b) material de enchimento celular.	81
FIGURA 2.57	Exemplos de tabuleiros para pontes construídos com perfis pultrudados: (a) Superdeck (Creative Pultrusions), (b) EZSpan (Atlantic Research), (c) DuraSpan (Martin Marietta Materials), (d) Square tube and plate deck (Strongwell).	82
FIGURA 2.58	Seção transversal 01 proposta para a utilização em tabuleiros de pontes.	84
FIGURA 2.59	Seção transversal 02 proposta para a utilização em tabuleiros de pontes.	84
FIGURA 2.60	Seções transversais propostas para a utilização em lajes de edifícios.	84
FIGURA 2.61	Placa da viga modular e seção transversal da viga.	85
FIGURA 2.62	Seções transversais de vigas construídas a partir de PRF combinado com concreto.	86
FIGURA 2.63	Esquema do tabuleiro e das vigas longarinas em PRF.	87
FIGURA 2.64	(a) Painel pultrudado; (b) e (c) Principais seções das vigas mistas.	88
FIGURA 2.65	Seção transversal do tabuleiro em PRF.	88
FIGURA 2.66	Seção transversal de tabuleiros em PRF com módulos pultrudados.	89
FIGURA 2.67	Características geométricas da laje mista concreto/PRFV.	90
FIGURA 2.68	Seção transversal da viga mista concreto/PRF.	91
FIGURA 2.69	Módulos de Tabuleiros de pontes com perfis pultrudados de PRFV.	92
FIGURA 2.70	Componentes do tabuleiro em PRF.	93
FIGURA 2.71	Seção transversal do perfil ASSET.	93
FIGURA 2.72	Inauguração da ponte rodoviária na Europa com o perfil da ASSET.	94
FIGURA 2.73	Representação esquemática da viga T.	94
FIGURA 2.74	Tabuleiro com quatro camadas de tubos retangulares pultrudados.	95
FIGURA 2.75	(a) Seção transversal do primeiro protótipo e (b) seção do segundo protótipo para os tabuleiros.	96
FIGURA 2.76	(a) Seção transversal do primeiro protótipo e (b) seção do segundo protótipo para os tabuleiros.	97
FIGURA 3.1	Representação esquemática de um composto unidirecional.	99
FIGURA 3.2	Representação esquemática do aumento de deformação em um composto unidirecional sujeito a um carregamento transversal.	102
FIGURA 3.3	Deformação do laminado no plano xz.	105
FIGURA 4.1	Flexão de uma viga de seção transversal H.	112
FIGURA 4.2	Configuração do ensaio de flexão a três pontos.	114
FIGURA 4.3	Dimensões da seção transversal do perfil H pultrudado de FRFV.	117
FIGURA 4.4	Esquema de ensaio para os perfis pultrudados submetidos à flexão a 3 pontos.	119
FIGURA 4.5	Ensaio à flexão dos perfis de PRFV: (a) valor de $(L/r)^2 = 400$ e; (b) valor de $(L/r)^2 = 100$ .	120
FIGURA 4.6	Diagrama carga–deslocamento para a relação $(L/r)^2 = 100$ .	121
FIGURA 4.7	Diagrama carga–deslocamento para a relação $(L/r)^2 = 200$ .	121
FIGURA 4.8	Diagrama carga–deslocamento para a relação $(L/r)^2 = 300$ .	121

FIGURA 4.9	Diagrama carga–deslocamento para a relação $(L/r)^2 = 400$ .	122
FIGURA 4.10	Diagrama carga–deslocamento para o ensaio de flexão dos perfis de PRFV, para os quatros valores de $(L/r)^2$ .	122
FIGURA 4.11	Diagrama obtido da aplicação da Expressão (4.7), nos resultados do ensaio de flexão dos perfis de PRFV.	123
FIGURA 4.12	Relação entre o módulo de elasticidade aparente e o módulo de elasticidade do PRFV em função do índice de esbeltez dos perfis.	124
FIGURA 4.13	Malha de elementos finitos, utilizada no perfil pultrudado de PRFV.	124
FIGURA 4.14	Configuração deformada do perfil pultrudado de PRFV.	125
FIGURA 4.15	Diagrama carga–deslocamento comparativo entre os valores fornecidos pelo ensaio experimental, método dos elementos finitos e teoria de viga, para a relação $(L/r)^2 = 100$ .	126
FIGURA 4.16	Diagrama carga–deslocamento comparativo entre os valores fornecidos pelo ensaio experimental, método dos elementos finitos e teoria de viga, para a relação $(L/r)^2 = 200$ .	126
FIGURA 4.17	Diagrama carga–deslocamento comparativo entre os valores fornecidos pelo ensaio experimental, método dos elementos finitos e teoria de viga, para a relação $(L/r)^2 = 300$ .	126
FIGURA 4.18	Diagrama carga–deslocamento comparativo entre os valores fornecidos pelo ensaio experimental, método dos elementos finitos e teoria de viga, para a relação $(L/r)^2 = 400$ .	127
FIGURA 5.1	Mecanismo da ação das fibras curtas.	132
FIGURA 5.2	Fôrma da placa de argamassa do programa experimental. Dimensões em (mm).	138
FIGURA 5.3	Detalhe 1: Seção transversal parcial da restrição imposta na placa.	139
FIGURA 5.4	Determinação da consistência na mesa <i>flow table</i> .	141
FIGURA 5.5	Nivelamento da placa de argamassa.	141
FIGURA 5.6	Vista do túnel de vento com o exaustor e a placa de argamassa.	142
FIGURA 5.7	Avaliação da redução do comprimento e do número das fissuras por retração plástica nas placas de argamassas.	144
FIGURA 5.8	Visualização das fissuras nas placas sem adição de fibras ( $V_f = 0,0\%$ ).	144
FIGURA 5.9	Visualização das fissuras nas placas com adição de fibras ( $V_f = 0,05\%$ ).	145
FIGURA 5.10	Visualização das fissuras nas placas com adição de fibras ( $V_f = 0,10\%$ ).	145
FIGURA 5.11	Visualização das fissuras nas placas com adição de fibras ( $V_f = 0,15\%$ ).	146
FIGURA 5.12	Perda de massa média nas misturas das argamassas, para os diferentes teores de fibras.	146
FIGURA 6.1	Ensaio de aderência para estruturas mistas aço/concreto.	156
FIGURA 6.2	Detalhe dos corpos-de-prova para o ensaio de aderência.	157
FIGURA 6.3	Layout do dispositivo para o ensaio de aderência na interface concreto/PRFV.	158
FIGURA 6.4	Malha de elementos para o cálculo das tensões na interface concreto/PRFV.	159
FIGURA 6.5	Tensão normal na direção transversal às fibras, na alma do perfil de PRFV, em MPa.	160
FIGURA 6.6	Tensão de cisalhamento no plano da alma do perfil de PRFV, em MPa.	161
FIGURA 6.7	Tensão de cisalhamento na interface do prisma de concreto/PRFV, em MPa.	161
FIGURA 6.8	Ensaio piloto de aderência concreto/PRFV: (a) dispositivo do ensaio e (b) ruptura do corpo-de-prova.	162
FIGURA 6.9	Resistência média à compressão para os três traços, aos 7 e 28 dias de idade do concreto.	163
FIGURA 6.10	Remoção da camada superficial de resina dos perfis de PRFV.	164
FIGURA 6.11	(a) Aplicação da camada de areia sobre o perfil, para a interface com Sikadur 32 Gel; (b) Cura dos corpos-de-prova no laboratório.	165
FIGURA 6.12	Aplicação da camada de Sikadur 31 sobre o perfil.	165
FIGURA 6.13	Panorama dos corpos-de-prova de aderência, para a resistência de 40MPa.	166
FIGURA 6.14	Corpos-de-prova de aderência após a etapa de desfôrma.	166

FIGURA 6.15	Ensaio de aderência para o estudo da interface concreto/PRF.	167
FIGURA 6.16	Diagrama carga x deslocamento para os corpos-de-prova com interface de Skadur 31, para as três resistências de concreto.	170
FIGURA 6.17	Diagrama carga x deslocamento para os corpos-de-prova com interface de Skadur 32 Gel, para as três resistências de concreto.	170
FIGURA 6.18	Ruptura típica dos corpos-de-prova sem tratamento na interface.	171
FIGURA 6.19	Ruptura típica dos corpos-de-prova com tratamento na interface com Sikadur 31.	171
FIGURA 6.20	Ruptura típica dos corpos-de-prova com tratamento na interface com Sikadur 32Gel	171
FIGURA 7.1	Arranjo da laje mista proposta em concreto/PRFV	179
FIGURA 7.2	Fatia representativa da laje mista concreto/PRFV.	180
FIGURA 7.3	Dimensões da seção dos blocos de EPS das lajes mistas.	181
FIGURA 7.4	Largura efetiva da laje.	182
FIGURA 7.5	Larguras efetivas da laje.	183
FIGURA 7.3	Esquema do ensaio de flexão a quatro pontos para a laje mista concreto/PRFV.	183
FIGURA 7.4	Resistência à flexão da seção transversal: (a) distribuição das deformações específicas; (b) distribuição simplificada das tensões; (c) distribuição exata das tensões.	186
FIGURA 7.5	Esquema para o ensaio de flexão das lajes mistas concreto/PRF.	189
FIGURA 7.6	Disposição dos <i>strain gages</i> , no centro do terço médio das lajes.	190
FIGURA 7.7	Preparação da laje mista para a concretagem.	191
FIGURA 7.8	Strain gages da interface concreto/PRF, com a aplicação de silicone.	192
FIGURA 7.9	Aplicação da resina Sikadur 31 sobre o perfil pultrudado.	192
FIGURA 7.10	Concretagem da laje mista concreto/PRFV.	193
FIGURA 7.11	Aplicação de uma camada de regularização de cimento e água na laje mista.	193
FIGURA 7.12	Laje mista preparada para o início do ensaio.	194
FIGURA 7.13	Detalhe da fixação do LVDT WI-10 para medição do deslocamento relativo concreto/PRFV e apoio da régua de alumínio.	195
FIGURA 7.14	Detalhe das placas de OSB e fixação dos LVDT's WA-100.	195
FIGURA 7.15	Strain gages fixados na capa de concreto, na face superior da laje mista.	196
FIGURA 7.16	Sistema de aquisição de dados em funcionamento durante ensaio da laje mista.	196
FIGURA 7.17	Ensaio da Laje Mista 01, com carregamento de 100kN.	197
FIGURA 7.18	(a) Ruptura na capa de concreto sobre a projeção dos perfis; (b) Descolamento da interface concreto/PRFV.	197
FIGURA 7.19	Ruptura da laje mista 01, na seção e na face inferior da capa de concreto, ao longo do comprimento da laje entre o apoio e o cutelo de carga.	198
FIGURA 7.20	Ensaio da Laje Mista 02, com carregamentos de 50kN e 100kN.	198
FIGURA 7.21	Ruptura na alma dos perfis pultrudados na laje mista 02.	198
FIGURA 7.22	Ruptura na alma dos perfis pultrudados na laje mista 02.	199
FIGURA 7.23	Ensaio da Laje Mista 03, com carregamentos de 50kN e 100kN.	199
FIGURA 7.24	Ruptura na alma de um dos perfis pultrudados na Laje Mista 03.	199
FIGURA 7.25	(a) vista da laje no ensaio; (b) fissura formada sob um perfil de PRFV.	200
FIGURA 7.26	Diagrama carga x deslocamento para as três lajes mistas (média dos valores obtidos nas leituras dos LVDT's).	200
FIGURA 7.27	Diagrama carga x deslizamento relativo para as três lajes mistas.	201
FIGURA 7.28	Diagrama carga x deformação específica na interface para as três lajes mistas.	202
FIGURA 7.29	Diagrama carga x deformação específica na interface para a Laje Mista 03.	203
FIGURA 7.30	Diagrama carga x deformação específica máxima de tração e compressão para as três lajes mistas.	203
FIGURA 7.31	Diagrama carga x deslocamento para a análise teórica, com diferentes propriedades dos materiais constituintes.	204
FIGURA 7.32	Malha de elementos finitos, utilizada nas análises de flexão da laje mista.	205
FIGURA 7.33	Configuração deformada do modelo numérico da laje mista.	205
FIGURA 7.34	Diagrama carga x deslocamento comparativo entre as análises em elementos finitos.	206
FIGURA 7.35	Diagrama comparativo carga x deslocamento entre os valores obtidos experimentalmente, numericamente e teoricamente.	206
FIGURA 7.36	Distribuição das tensões normais na direção longitudinal no perfil de PRFV, na laje mista, para um carregamento de 20kN.	207

FIGURA 7.37	Diagrama carga x deformação específica para os máximos valores de deformação encontrados no ensaio experimental, na análise teórica e elementos finitos.	207
FIGURA 7.38	(a) Vista externa e; (b) Vista interna da edificação “Casa Stella”.	209
FIGURA 7.39	Enchimento dos baldes com água para o carregamento de longa duração.	210
FIGURA 7.40	Relógio comparador para medição da flecha no ensaio de fluência.	211
FIGURA 7.41	Diagrama período x deslocamento para o ensaio de fluência.	212
FIGURA 7.42	Diagrama período x deformação específica (tração no perfil de PRFV) para o ensaio de fluência da laje mista.	212

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Propriedades mecânicas típicas de algumas fibras de carbono.	35
TABELA 2.2	Propriedades mecânicas típicas de algumas fibras.	38
TABELA 2.3	Comparação das propriedades do E-glass e S-glass.	39
TABELA 2.4	Descrição resumida das várias formas de fibras de vidro comercialmente disponíveis.	40
TABELA 2.5	Comparação entre algumas propriedades das resinas termofixas e termoplásticas, usadas nos materiais compostos.	44
TABELA 2.6	Métodos de fabricação e suas propriedades mecânicas típicas, para o reforço com fibra de vidro.	46
TABELA 2.7	Propriedades das barras de PRF, segundo o COMMITTEE ACI 440 (2001), a Norma Chilena NCh 2577 (2001) e CASTRO e CURCIO (1999).	55
TABELA 2.8	Situação Atual das Pontes Americanas.	59
TABELA 2.9	Dimensões dos tabuleiros de PRFV.	96
TABELA 3.1	Propriedades de resistência típicas de compostos unidirecionais, $V_f \approx 0,50$ .	104
TABELA 4.1	Distância entre os apoios dos perfis pultrudados no ensaio de flexão a três pontos, para os 4 valores de índice de esbeltez.	118
TABELA 4.2	Propriedades elásticas dos perfis pultrudados ensaiados.	123
TABELA 4.3	Valores resumidos para as rigidezes dos perfis pultrudados, encontrados na literatura.	123
TABELA 4.4	Propriedades elásticas das lâminas no perfil de PRFV.	125
TABELA 5.1	Proporções dos materiais e condições ambientais no momento da mistura.	140
TABELA 5.2	Caracterização física e mecânica das fibras de polipropileno, de acordo com o fabricante.	140
TABELA 5.3	Resultados obtidos nos ensaios das placas, em valores médios.	143
TABELA 5.4	Resumo estatístico para os quatro teores de fibras, para o número de fissuras nas placas de argamassa.	147
TABELA 5.5	Análise ANOVA para o número de fissuras nas placas de argamassa, para os quatro teores de fibras.	147
TABELA 5.6	Resumo estatístico para os quatro teores de fibras, para o comprimento das fissuras nas placas de argamassa.	148
TABELA 5.7	Análise ANOVA para o comprimento das fissuras nas placas de argamassa, para os quatro teores de fibras.	148
TABELA 5.8	Resumo estatístico para os teores de fibras, para o comprimento das fissuras nas placas de argamassa.	148
TABELA 5.9	Análise ANOVA para o comprimento das fissuras nas placas de argamassa, para os teores de fibras.	148
TABELA 5.10	Resumo estatístico para os teores de fibras, para o número de fissuras nas placas de argamassa.	149
TABELA 5.11	Análise ANOVA para o número de fissuras nas placas de argamassa, para os teores de fibras.	149
TABELA 5.12	Resultado para o Método de Duncan para a análise dos comprimentos médios das fissuras nas placas de argamassa, para os teores de fibras de: 0,05%, 0,10% e 0,15%.	149
TABELA 5.13	Resultado para o Método de Duncan para a análise o número de fissuras nas placas de argamassa, para os teores de fibras de: 0,05%, 0,10% e 0,15%.	150
TABELA 5.14	Valores médios da perda de massa, para os quatro teores de fibras.	151
TABELA 5.15	Resumo estatístico dos teores de fibra, no comportamento da perda de massa.	151
TABELA 5.16	Análise ANOVA para os teores de fibra, no comportamento da perda de massa.	151
TABELA 6.1	Características técnicas das resinas.	157
TABELA 6.2	Resistências mecânicas calculadas para um laminado fibra de vidro/poliéster, com $V_f=0,6$ .	160
TABELA 6.3	Traços utilizados na determinação da resistência à compressão do concreto.	163
TABELA 6.4	Características das resinas utilizadas, fornecidas pelo fabricante.	166



TABELA 6.5	Resumo com os carregamentos de ruptura e a tensão de aderência, para cada corpo-de-prova, nas três resistências do concreto.	169
TABELA 6.6	Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos utilizados no estudo de aderência.	172
TABELA 6.7	Análise da média com a distribuição $t$ , para os corpos-de-prova sem interface.	173
TABELA 6.8	Análise da média com a distribuição $t$ , para os corpos-de-prova com resina Sikadur 32Gel.	173
TABELA 6.9	Análise da média com a distribuição $t$ , para os corpos-de-prova com resina Sikadur 31.	173
TABELA 6.10	Médias das resistências para os ensaios de aderência concreto/PRFV.	174
TABELA 6.11	Resumo estatístico para as diferentes resistências do concreto.	174
TABELA 6.12	Análise ANOVA para as diferentes resistências do concreto.	174
TABELA 6.13	Resumo estatístico para as diferentes interfaces de aderência.	175
TABELA 6.14	Análise ANOVA para as diferentes interfaces de aderência.	175
TABELA 6.15	Teste $t$ , para as diferentes interfaces de aderência, com as resinas Sikadur 31 e Sikadur 32 Gel.	175
TABELA 7.1	Espessura mínima da capa de concreto.	181
TABELA 7.2	Valores médios obtidos dos ensaios de compressão nos corpos-de-prova de concreto.	194
TABELA 7.3	Valores obtidos dos ensaios de compressão nos corpos-de-prova de concreto.	210

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABRAPEX	Associação Brasileira do Poliestireno Expandido
A.C.	Antes de Cristo
ACI	American Concrete Institute
AFRP	Aramid Fiber Reinforced Polymer
ANOVA	Análise de Variância
APC	Advanced Polymer/Continuous Fiber Composite
ASTM	American Society of Testing Materials
ASSET	Advanced Structural SystEms for Tomorrow's Infrastructure
BRE	Bloco Retangular Equivalente
CEB-FIP	Committee Europeu du Béton - Fédération Internationale de la Précontrainte
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
CP	Corpo-de-prova
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
D.C.	Depois de Cristo
DOT	Departamento de Transporte dos Estados Unidos
ELS	Estado Limite de Serviço
EPS	Poliestireno Expandido
EPT	Estado Plano de Tensões
EUA	Estados Unidos da América
EUROCODE	European Committee for Standardization
FRP	Fiber Reinforced Plastics or Polymers
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
GIEM	Grupo Interdisciplinar de Estudos em Madeira
HDT	Alta Temperatura de Distorção
ISTEA	Intermodal Surface Transportation Efficiency Act
ISO	International Standards Organization
LAE	Laboratório de Análise de Estrutural
LEE	Laboratório de Experimentação em Estruturas
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LVDT	Transdutor Linear de Deslocamento
MEF	Método dos Elementos Finitos
MRI	Imagem por Ressonância Magnética
NBR	Norma Brasileira
NCh	Norma Chilena
OSB	Oriented Strand Board
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PMC	Polymers Materials Composites
PRF	Plástico Reforçado com Fibras
PRFC	Plástico Reforçado com Fibras de Carbono
PRFV	Plástico Reforçado com Fibras de Vidro
PVA	Polivinil Acetato
PVC	Poli Cloreto de Vinila
SAP2000	Structural Analysis Program
SCC	Casca de Carbono Preenchido com Concreto
STH	Sistema Modular de Tubos Híbridos
TCL	Teoria Clássica dos Laminados
Tg	Temperatura de Transição Vítreia do Polímero
Tm	Temperatura de Amolecimento
UCSD	Universidade da Califórnia, San Diego
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNESC	Universidade do Extremo Sul Catarinense

## RESUMO

Hoje em dia muitas estruturas encontram-se estruturalmente comprometidas, particularmente as superestruturas de pontes/viadutos construídas em concreto armado/protendido ou aço, devido à ação de agentes agressivos do meio-ambiente. Em virtude disto devem ser previstos nos projetos o uso de materiais com características mais adequadas às condições de utilização destas estruturas, bem como previsões para manutenção da construção de maneira a garantir a vida útil desejada. Neste contexto, tem aumentado nos últimos anos a aplicação dos materiais compostos avançados na indústria da engenharia civil, principalmente para construções de sistemas de infra-estrutura de pontes e passarelas. Este trabalho propõe um novo sistema de laje mista utilizando materiais compostos avançados para aplicação em passarelas. O sistema é composto de uma capa de concreto, na qual são adicionadas fibras curtas de polipropileno, e de perfis pultrudados de seção H, fabricados com polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV), sendo usados blocos de EPS para preenchimento entre os perfis. Realizaram-se inicialmente estudos preliminares experimentais para obtenção dos módulos de elasticidade dos perfis sob flexão e para se definir o volume de fibras na mistura cimentícia de concreto com adição de fibras curtas de polipropileno, necessário para reduzir os efeitos de fissuração por retração plástica. Realizaram-se em seguida ensaios experimentais de aderência entre concreto e perfil de PRFV considerando diferentes interfaces. A resina Sikadur 31 foi a interface que apresentou melhor desempenho, sendo então selecionada para ligação entre os dois materiais na laje mista. Após estes ensaios preliminares, passou-se ao programa experimental para investigar o comportamento estrutural da laje mista sob flexão. Foram ensaiadas três lajes mistas de 2800 mm de comprimento e seção 800 mm x 140 mm, submetidas a flexão a quatro pontos. Também realizou-se uma análise da laje sob flexão por meio da Teoria de Viga de Timoshenko, e uma análise numérica usando o Método dos Elementos Finitos. Nas análises admitiu-se comportamento elástico-linear dos materiais, sendo utilizados para as propriedades elásticas tanto valores obtidos experimentalmente como valores estimados, por equação contida na norma brasileira da ABNT para o concreto, e pela Teoria Clássica de Laminação (TCL) para os perfis de PRFV. As análises por elementos finitos foram realizadas por meio do programa computacional SAP2000. Na comparação do comportamento estrutural da laje, a partir de gráficos carga x deslocamento no meio do vão, os resultados das análises teórica e numérica apresentaram uma ótima correlação com os resultados experimentais dos ensaios de flexão. Por fim, para verificar o comportamento à fluência do sistema de laje mista proposto, realizou-se um ensaio de flexão de longa duração na laje mista, com carregamento uniformemente distribuído agindo por um período de 210 dias, monitorando-se a temperatura e a umidade ambiente. Ao final do trabalho foram extraídas conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## ABSTRACT

Nowadays many structures exposed to corrosive environment are in deterioration process, particularly the superstructures found in bridges and crosswalks made of steel or reinforced/prestressed concrete. In order to guarantee the quality and serviceability of the construction, it should be desirable to use more appropriate materials in the design of such structures, as well as to predict regular maintenance programs. In this context, the use of advanced composite materials in the civil engineering sector has been continuously increasing, especially in the construction of bridges and crosswalks. In this work, a composite slab made of advanced composite materials is proposed for crosswalk deck applications. The slab is composed of a concrete cover, with the addition of polypropylene fibers, and of pultruded profiles of wide-flange (WF) section, made of glass fiber reinforced polymers (GFRP) and filled with foam in between. Preliminary experimental studies were initially performed to obtain the elastic moduli of the profiles under bending and also to investigate the volume fraction of polypropylene fibers to be used in the concrete mixture, in order to reduce the effect of plastic shrinkage cracking on the concrete cover. Next, experimental bond tests were also performed to investigate different interfaces between the concrete and the GFRP profile. The Sikadur 31 resin showed the best bond characteristics and it was then selected for use in the composite slab. After these preliminary studies, an experimental program was conducted to investigate the flexural behavior of the composite slabs. Three specimens of 2800 mm length and of section dimensions 800 mm x 140 mm, were tested under four-point bending. The composite slab was also analyzed using the Timoshenko Beam Theory (TBT) and the Finite Element Method (FEM). In the analyses the materials were assumed to behave linear-elastically, and both experimental and estimated values of the elastic properties, obtained by means of the ABNT Brazilian Code for concrete and by means of the Classical Lamination Theory (CLT) for the GFRP profiles, were adopted. The SAP 2000 program was used to carry out the finite element analyses. Comparison of the slab flexural behavior in terms of load-midspan displacement graphs, showed very good agreement between the experimental and the analytical (TBT) or numerical (FEM) results. Finally, in order to investigate the long-term behavior of the proposed composite slab, a slab specimen was tested under bending, subjected to distributed load, acting for a period of 210 days, by monitoring temperature and air humidity conditions. Conclusions and suggestions for future work are given at the end of the work.

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações Iniciais

Ao longo da história da civilização humana foram desenvolvidos basicamente três conceitos básicos de sistemas estruturais. Estes conceitos são conhecidos como *vigas e colunas*, *arcos* em alvenaria e as *treliças* em madeira e aço. O emprego destes conceitos somente foi possível devido a disponibilidade dos materiais e o conhecimento de suas técnicas de aplicação, nos seus respectivos períodos.

As estruturas da cidade de Chaldea, hoje em ruínas, foram construídas no ano 5000 A.C.. Contudo, antes dos gregos, grandes estruturas foram construídas pelos Egípcios, utilizando os conceitos de vigas e colunas. Entre as grandes construções deste povo destaca-se o templo do rei Ammon, em Karnak. Esta estrutura foi construída em meados do ano 1500 A.C. e possui 360 m de comprimento com 108 m de largura. A cobertura é constituída de uma grande laje de alvenaria apoiada inteiramente num sistema de viga-coluna. As colunas centrais possuem diâmetros de 3,5 m e uma altura de 20,7 m.

Os Romanos, por outro lado, foram os primeiros a utilizar as estruturas em arco. Eles construíram viadutos utilizando arcos duplos, nos quais alguns ainda encontram-se em uso. O Pantheon, construído em Roma na época 120 D.C., possui uma cúpula em alvenaria com diâmetro de 44 m.

Mais recentemente surgiu outro importante conceito de construção, o de treliças em madeira, que foram utilizadas inicialmente por Andrea Palladio (1518-1580) na Itália.

O desenvolvimento das construções em aço por Bessemer em 1856 foi, segundo alguns autores, uma das mais memoráveis realizações humanas no campo da engenharia, após os Romanos. A aplicação do aço estrutural de alta resistência tornou realidade a construção de edificações com andares múltiplos, pontes com grandes vãos, torres altas e navios de grande envergadura.

O concreto armado, protendido ou não, evidenciou suas potencialidades ao longo do último século, mostrando-se como uma das principais opções na construção civil. Este fato ocorreu após o término da II<sup>a</sup> Guerra Mundial, onde os engenheiros passaram a construir estruturas mais esbeltas e arrojadas.

Surgiram, todavia, alguns problemas ignorados até há alguns anos atrás, primeiro decorrente do fato do material apresentar dificuldade de reajuste, sobretudo da capacidade de

carga, uma vez executada a estrutura. Além disso, nos dias de hoje muitas estruturas encontram-se na iminência de atingir o período de vida útil previsto inicialmente, evidenciando-se os efeitos do envelhecimento ou, em outros casos, observando-se o aparecimento da degradação prematura muito antes deste período.

Podem ser relacionados, como exemplos, os sistemas estruturais de reservatórios e algumas fábricas onde predomina a agressividade do meio, no que se refere à degradação dos materiais. Além destes, existem casos em que se pretende construir edifícios destinados a equipamentos muito sensíveis sob o ponto de vista eletromagnético. Citam-se aqui alguns aparelhos emissores/receptores e equipamentos médico-hospitalares. Neste âmbito a simples utilização dos materiais tradicionais nos elementos estruturais pode, mais uma vez, comprometer a durabilidade da estrutura ou a funcionalidade da edificação.

Os avanços tecnológicos, aliados ao melhoramento do controle de qualidade dos projetos e da execução em obra têm estimulado nos engenheiros o desejo de, a cada dia, projetar estruturas mais arrojadas. Por outro lado, esbarra-se com as dificuldades da compatibilização dos materiais correntes e com os modelos de cálculo disponíveis para a análise das estruturas. Além disso, a abordagem de uma estrutura mais complexa pode inserir obstáculos à sua realização, de acordo com as técnicas correntes de dimensionamento e execução, em função do peso próprio excessivo, a dificuldade em vencer grandes vãos e as limitações dos processos construtivos.

As estruturas, em geral, encontram-se ao longo de sua vida útil sujeitas a agentes agressivos que por ações químicas ou físicas podem gerar o enfraquecimento mecânico dos seus elementos constituintes durante seu período de vida. Hoje em dia muitas estruturas estão em processo de deterioração, particularmente os tabuleiros de pontes/viadutos em concreto, em consequência da corrosão natural das barras de aço reduzindo-se, assim, a vida útil destas construções.

No caso das estruturas em aço, uma das principais causas no aumento nos custos da preservação da integridade estrutural é o sistema de proteção à corrosão. Recentemente, muitos estudos têm demonstrado que a substituição do aço por materiais de maior durabilidade pode contribuir para a resolução deste problema.

Em consequência destes fatos devem ser previstos nos projetos a utilização de materiais com características mais adequadas às condições de utilização destas estruturas, bem como previsões para manutenção da construção de maneira a garantir a vida útil desejada.

No que se refere às obras de infra-estrutura, a reduzida durabilidade dos tabuleiros de pontes e passarelas em concreto ou aço, expostas principalmente a ambientes de atmosfera

agressiva, tem gerado custos diretos e indiretos (perturbações no tráfego) consideráveis perante a necessidade de recuperação, reforço ou até mesmo a substituição total dos mesmos.

Neste contexto torna-se imperativo a necessidade de se desenvolver novas tecnologias de materiais. Nos Estados Unidos da América (EUA), por exemplo, verificou-se a necessidade de substituir 250.000 dos 578.000 tabuleiros de pontes deteriorados, somando-se custos estimados no dobro dos iniciais gastos no projeto e execução.

O sistema de infra-estrutura de transportes norte-americano foi avaliado em mais de 2,5 trilhões de dólares, isto, no ano de 1996. Além disso, as atividades relacionadas com o sistema de transporte rodoviário estão estimadas em aproximadamente 20 % do produto interno bruto dos EUA, ou seja, \$900 bilhões por ano. Atualmente, também são gastos \$120 bilhões na construção, operação e manutenção da rede de transporte. No ano de 1992 os custos gerados pelos congestionamentos, em função da manutenção/recuperação ou substituição dos tabuleiros das pontes, foram estimados em aproximadamente 48 bilhões de dólares, GANGARAO et al. (1999).

No Canadá existem aproximadamente 30.000 pontes necessitando de recuperação; destas, 150 a 200 têm atingido o colapso a cada ano. Estes números refletem a necessidade de um investimento de \$49 bilhões para a recuperação do sistema de infra-estrutura canadense. Segundo MUFTI (2003), este investimento não deve ser empregado na aplicação de “velhas tecnologias” nos trabalhos de recuperação. Há, segundo o autor, a urgente necessidade de se empregar as vantagens das tecnologias emergentes, que tenham o potencial para aumentar a vida útil da estruturas e reduzir os custos de manutenção.

No Reino Unido, os gastos com manutenção e recuperação das estruturas existentes em concreto armado, aço e ferro fundido são maiores do que os investimentos em novas construções. Na Europa aproximadamente 84.000 pontes em concreto armado e protendido necessitam de manutenção, reforço e recuperação com um gasto anual de 215 milhões de euros, excluindo-se os custos para administração do tráfego, HOLLAWAY (2003).

Em função destes fatos mencionados conclui-se que alguns materiais tradicionais de construção, diga-se o concreto e o aço, começam a mostrar-se inadequados em determinadas situações, devendo-se, portanto buscar materiais alternativos.

Atualmente a engenharia tem produzido quase que diariamente um leque de novos materiais estruturais. Neste âmbito os engenheiros têm desenvolvido os novos conceitos de sistemas estruturais a partir do conhecimento dos novos materiais. Esta nova maneira de se projetar é considerada por alguns pesquisadores como o quarto conceito básico das estruturas.

Desde o início da civilização humana os materiais têm sido a chave para o progresso. Este fato é tão verdadeiro que até mesmo as idades históricas receberam seus nomes: idade da pedra, bronze, ferro, etc. Constata-se, todavia que nos dias de hoje não se pode

caracterizar a era atual por apenas um único material. Existe sim nos dias de hoje uma grande competição entre os materiais, de modo que esta era poderia ser chamada de “a era da escolha”. Tem-se a possibilidade de utilizar o material certo no lugar certo.

Neste contexto, tem-se nos últimos anos assistido ao crescimento dos *materiais compostos avançados*, utilizados amplamente na área militar e na indústria aeroespacial e mais recentemente ramificado às indústrias em geral.

Os materiais formados por dois ou mais materiais, com propriedades mecânicas distintas dos seus componentes individuais, são chamados de compostos. Este conceito não é novo. Os povos antigos já construíam suas casas utilizando o barro e a palha. A madeira bruta, amplamente utilizada como material estrutural é um exemplo de um material composto natural. O concreto armado, a madeira laminada colada e a alvenaria estrutural são exemplos de materiais compostos tradicionais. Todavia, os materiais compostos avançados são formados por matrizes poliméricas reforçadas com fibras. As fibras de vidro, carbono ou aramida, embebidas em uma matriz polimérica, são também conhecidas como Plástico Reforçado com Fibras (PRF), ou *Fiber Reinforced Plastics or Polymers (FRP)*.

Todas as propriedades mecânicas do composto na direção longitudinal são resistidas pelas fibras. A matriz por outro lado controla a maioria das propriedades na direção transversal. O comportamento final do PRF é acentuadamente dependente dos materiais que o constituem, da disposição das fibras e da interação entre os referidos materiais. Além disso, os fatores intervenientes neste comportamento são a orientação, o comprimento, a forma e a composição das fibras, as propriedades mecânicas da matriz, assim como a adesão ou ligação entre as fibras e a matriz.

Os materiais compostos avançados oferecem características mecânicas e químicas únicas em termos de resistência, rigidez, durabilidade e aderência com materiais estruturais convencionais, agregando um grande potencial de aplicação nas diversas áreas da engenharia.

Embora as tentativas passadas de introdução dos PRF na construção civil terem sido fracassadas em função de questões econômicas, os avanços recentes nos processos de fabricação, aliado à redução nos custos das matérias-primas, podem tornar o emprego dos materiais compostos acessível. Existem atualmente muitas estruturas civis projetadas com compostos que provaram ser mais econômicas do que com outros materiais de construção.

Além disso, quando as propriedades destes materiais são convenientemente ajustadas ao concreto, garantido-se uma adequada ligação (concreto-composto), compatibilidade de deformações e perfeita conjugação química, formando-se uma estrutura mista, estes nos permitem a concepção de estruturas mais leves, mais resistentes e de elevada durabilidade, e com custos menores.



Muitos programas de pesquisa no Canadá, Japão e Europa nos últimos oito anos têm enfatizado o sucesso desta tecnologia. Este empenho nas pesquisas se deve ao fato do sucesso obtido em obras de reforço e/ou recuperação de mais de 400 estruturas no mundo, nos últimos seis anos.

Pesquisas recentes nos EUA e na Universidade da Califórnia, em San Diego (UCSD), têm direcionado suas linhas de pesquisa especificamente ao desenvolvimento e à aplicação de materiais compostos avançados para a recuperação/renovação da infra-estrutura de transportes norte-americana. O próximo passo, segundo os pesquisadores, é estender a utilização dos PRF ao desenvolvimento de novos sistemas construtivos, utilizando-os como elementos estruturais principais na construção de novas pontes/passarelas e na substituição de tabuleiros já existentes.

A renovação das construções de infra-estrutura por meio da substituição de elementos isolados ou sistemas estruturais completos pode beneficiar-se com o uso destes novos materiais, em termos de leveza, resistência e durabilidade, desde que os custos elevados dos materiais sejam compensados pelas inovações no projeto e processos construtivos desenvolvidos especificamente para estes materiais.

A recuperação e a substituição dos tabuleiros de pontes exige um extensivo planejamento, análise e projeto dos materiais e dos sistemas alternativos. As vantagens dos compostos avançados sobre os materiais convencionais motiva a sua aplicação na recuperação e substituição de pontes. As propriedades favoráveis incluem o baixo peso próprio, a resistência à corrosão, a elevada relação resistência mecânica/densidade e rigidez específica e a facilidade de instalação e fabricação. Além disso, a arquitetura do material e suas formas geométricas podem ser adaptadas para as mais específicas aplicações. Desta maneira, os tabuleiros de PRF são considerados uma solução em potencial para o problema da deterioração dos tabuleiros das pontes.

Um dos principais potenciais de aplicação dos compostos em estruturas de pontes é o de construções leves de sistemas de tabuleiros fáceis de instalar. Para esta finalidade, perfis de paredes finas e estruturas multicelular são geralmente empregados nos tabuleiros compostos.

O sucesso da utilização das estruturas em PRF depende também, entre outras coisas, da precisão e simplicidade das ferramentas analíticas disponíveis. Quando se projeta em aço ou concreto, os engenheiros possuem acesso a normas, onde estão estabelecidos os critérios de projeto. Por outro lado quando se projeta em PRF, os engenheiros não dispõem do consenso geral de comportamento, desempenho e coeficientes de segurança que forneçam uma normalização consagrada como no projeto em aço ou concreto. Nesse sentido, o uso de análises mais sofisticadas torna-se imperioso pode consumir um tempo maior dos engenheiros.

Desta maneira é necessário obter procedimentos analíticos simples, mas precisos, para determinar as respostas das estruturas em PRF nas diversas aplicações.

Além disso, pode-se afirmar que os avanços na tecnologia do projeto estrutural tornou possível a construção de estruturas esbeltas com grandes dimensões. Todavia o peso e a corrosão dos materiais tornou-se também uma preocupação maior. É portanto natural que os engenheiros queiram utilizar novos materiais os quais possam diminuir o peso próprio e melhorar a vida útil da estrutura, com redução nos custos de manutenção.

No setor das grandes estruturas, a aplicação de materiais compostos avançados ainda não possui conhecimento e experiência significativa sobre comportamento e desempenho estrutural ao longo da vida útil. Contudo a ciência e a tecnologia moderna têm avançado de maneira muito rápida. No curto período em que estudantes terminam a formação acadêmica passam à prática da engenharia, eles descobrem que conhecimento e habilidade de se projetar com compostos é ferramenta diferenciada para inserção no mercado de trabalho.

## **1.2. Justificativa**

Os danos causados pela corrosão em estruturas de concreto armado ou protendido, e em estruturas metálicas podem ser desastrosos. Estes danos são mais intensos e acelerados nas estruturas expostas a meios agressivos, principalmente em passarelas, pontes e viadutos situados nas proximidades da orla marítima. Nos Estados Unidos estima-se em 40 % a porcentagem de pontes consideradas estruturalmente com desempenho insatisfatório ou obsoletas, necessitando recuperação, aumento de resistência, alargamento ou substituição total. Estima-se em 78 bilhões de dólares os custos para eliminar as deficiências atuais e em 8,2 bilhões de dólares o custo médio anual para eliminar deficiências existentes e emergentes na infra-estrutura de transportes, SEIBLE e KARBHARI (1998).

Situação similar é constatado no Canadá, onde mais de 40% das pontes em funcionamento foram construídas a mais de 30 anos e a maioria necessita de urgente substituição ou recuperação. Muitos dos problemas estruturais são devido a deterioração do concreto como resultado da corrosão do aço. Outras pontes tornaram-se funcionalmente obsoletas devido ao aumento das cargas de serviço e volume de tráfego, que excederam aqueles para o qual foram projetadas, RIZKALLA e LABOSSIERE (1999).

A situação no Brasil, cujas cidades e estradas se concentram ao longo da costa marítima é bem semelhante. Atualmente, tanto Santa Catarina como outros estados apresentam muitas pontes em concreto armado/protendido situadas ao longo das estradas

federais e estaduais, próximas ao litoral, que já se encontram em processo acelerado de deterioração, necessitando de recuperação/reforço ou substituição a curto e médio prazo.

Por esta razão, há necessidade de se desenvolver elementos estruturais e sistemas construtivos em materiais alternativos, duráveis e resistentes à corrosão, para substituição dos materiais convencionais em estruturas expostas a ambientes de atmosfera agressiva.

A recuperação e a construção de pontes, viadutos e outras estruturas com o PRF pode ser uma alternativa viável tendo em vista suas características mecânicas e resistência a ambientes agressivos.

Além da durabilidade, resistência à corrosão, facilidade e rapidez no processo construtivo, o sistema em PRF permite dispensar o escoramento, e também incorporar os elementos estruturais aos componentes que constituem a fôrma.

Neste sentido, este sistema construtivo poderá ser aplicado em estruturas de passarelas, pontes, viadutos e cais de atracação, expostas a meios.

Por outro lado, existe também uma demanda das indústrias brasileiras de elementos poliméricos reforçados com fibras de vidro de ingressar na indústria da construção civil. No Brasil já estão sendo construídos perfis pultrudados de PRFV para utilização em escadas, coberturas, torres e em pisos de plataformas de petróleo.

### **1.3. Objetivo Geral**

Este projeto visa desenvolver um sistema de laje mista com materiais compostos avançados. Este sistema consiste de uma capa de concreto sobre vigas de perfis H pultrudados, com preenchimento de blocos de EPS entre os perfis, sendo adicionadas fibras curtas de polipropileno à capa de concreto. O conjunto de perfis de PRF e blocos de EPS funciona como fôrma para o concreto fresco, não sendo necessário o uso de escoramentos, devendo a fôrma suportar também as cargas na fase de execução. Após a cura do concreto os dois elementos, perfil de PRF e concreto, combinam-se estruturalmente, funcionando monoliticamente como uma laje pré-moldada de concreto. A aderência entre estes materiais também será investigada, podendo ser melhorada por meio da adição de um adesivo estrutural a base de resina epóxi ou de uma camada de resina com areia. Além disso, será avaliado o efeito da fluência na laje mista.

#### 1.4. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho de doutoramento estão assinalados nos itens abaixo:

- caracterizar experimentalmente os perfis pultrudados H de PRF à flexão, variando-se a distância entre apoios para determinar os módulos de elasticidade longitudinal (E) e de cisalhamento (G) dos perfis;
- estudo analítico do comportamento dos perfis pultrudados submetidos à flexão, por meio das equações obtidas na mecânica dos materiais e teoria de viga;
- análise numérica por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) do comportamento dos perfis pultrudados submetidos à flexão;
- estudar a aderência entre o concreto e o PRF, utilizando diferentes interfaces: (1) sem tratamento; (2) adição de uma camada de resina com areia; (3) utilização apenas de resina, aplicada sobre os perfis um pouco antes do lançamento do concreto;
- analisar experimentalmente a dosagem do concreto com adição de fibras curtas de polipropileno, avaliando-se a resistência à compressão e a redução da fissuração por retração plástica;
- caracterizar por meio de ensaios de flexão a quatro pontos as lajes mistas concreto/perfis pultrudados de PRF com enchimento de blocos de EPS;
- estudo analítico do comportamento à flexão a 4 pontos da laje mista, por meio da mecânica dos materiais;
- modelar por meio do MEF o comportamento da laje mista submetida à flexão;
- analisar os valores obtidos do comportamento da laje à flexão pelos métodos analítico, experimental e numérico;
- estudar o efeito da fluência na laje mista submetida à flexão, para carregamento uniformemente distribuído e constante de longa duração, monitorando-se a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar, deslocamentos e deformações, simultaneamente, durante 120 dias.

#### 1.5. Ineditismo

Embora a utilização dos materiais compostos avançados, aplicados aos sistemas de construção já seja uma realidade em nossos dias, existe ainda uma carência muito grande em pesquisas nesta área. Os primeiros trabalhos apresentados foram dirigidos à utilização deste

material para o reforço e/ou recuperação de pilares de pontes em regiões de ocorrência de terremotos.

Pode-se afirmar que as pesquisas com materiais compostos avançados aplicados à construção civil apenas tomaram um grande impulso nestes últimos anos, principalmente nos Estados Unidos, Canadá, Japão, Austrália, Alemanha e Suíça.

No Brasil algumas poucas pesquisas já estão sendo realizadas, com relação à caracterização, comportamento mecânico dos materiais e pesquisas experimentais na área de reforço de estruturas.

Existe porém uma carência de pesquisas na área de projeto e análise de novos sistemas estruturais com o emprego deste material.

Esta pesquisa objetiva contribuir para o desenvolvimento aqui no Brasil de novos sistemas estruturais empregando materiais plásticos reforçados com fibras, de elevada resistência e durabilidade.

## **1.6. Contribuição Científica**

Espera-se, que com o desenvolvimento deste trabalho, haja um crescimento nas pesquisas com materiais compostos no Brasil, na ênfase do projeto, análise e desenvolvimento de novas estruturas e sistemas construtivos em PRF. O destaque que será dado no decorrer desta pesquisa às vantagens atrativas deste material direciona seu uso principalmente em estruturas expostas a ambientes de atmosfera agressiva como, por exemplo, obras situadas nas proximidades de orlas marítimas. De fato a aplicação deste material no Brasil e em Santa Catarina, que dispõem de uma vasta orla marítima pode vir a representar uma economia bastante expressiva nos custos de recuperação de pontes, passarelas, piers, etc., estruturalmente comprometidos necessitando de reforço, ou de substituição parcial ou total.

Além da durabilidade, a leveza do PRF destaca-se como propriedade de grande importância. Os custos para o governo e o prejuízo para o comércio e a indústria com interrupções e desvios no fluxo de estradas para efetuar operações de recuperação e reforço, ou até mesmo a instalação de novas pontes, podem resultar em valores consideravelmente elevados, além é claro do desconforto gerado aos usuários. A construção em PRF apresenta facilidade no manuseio e rapidez de instalação. Este fato possibilita a montagem de estruturas em menos tempo, além de reduzir também os custos relacionados ao uso de equipamentos pesados necessários à sua instalação. A utilização de sistemas construtivos em PRF na construção de pontes e passarelas ao longo de rodovias e nas cidades, resultaria em uma economia nos custos de construção/instalação, na redução das interrupções no trânsito, além

da redução nos custos futuros de manutenção em função da durabilidade do material. Além das vantagens já citadas, outro fator de grande relevância é que, comparado a outros materiais, a produção do PRF é menos agressiva ao meio ambiente e, dependendo do tipo da resina utilizada, o produto final pode assumir propriedade reciclável.

As limitações da pesquisa são também relacionadas. Será analisado apenas o comportamento à flexão da laje. O efeito da punção e o esforço de cisalhamento não serão abordados. Será considerado o carregamento estático, não se estudando a análise dinâmica. Além disso, o carregamento aplicado será crescente e monotônico, não sendo consideradas cargas cíclicas.

### **1.7. Estrutura do Trabalho**

A estrutura deste trabalho consta de nove capítulos, incluindo a introdução e as referências bibliográficas, acrescida de seis anexos, estando organizada de acordo com a proposta da pesquisa.

Desta maneira, após esta introdução está descrito no Capítulo 2, de forma resumido e atualizado, o resultado da revisão bibliográfica sobre a aplicação dos PRF nas estruturas de pontes e passarelas, em particular às soluções que utilizam o processo da pultrusão na produção destes compostos. São apresentadas também contribuições sobre os tipos de resinas e fibras, esta última dando-se ênfase às de vidro. Além disso, é apresentada uma exposição das principais obras de infra-estrutura já construídas e que se utilizam das vantagens dos compostos avançados.

O Capítulo 3 é dirigido ao comportamento unidirecional do material composto, enfocando-se sua resistência e rigidez. São discutidos os procedimentos por meio da Mecânica dos Materiais e por Métodos Semi-Empíricos. Uma comparação entre alguns valores obtidos pelos dois métodos também é realizada. Descreve também os métodos utilizados no cálculo das propriedades mecânicas de um laminado a partir das propriedades, orientações e distribuição das lâminas individuais. A aproximação é baseada na Teoria Clássica dos Laminados (TCL).

No Capítulo 4 é apresentada a metodologia para ensaio experimental dos perfis pultrudados submetidos à flexão simples. É descrita uma metodologia para a obtenção simultânea do módulo de elasticidade longitudinal e de cisalhamento do perfil de PRF. São discutidos também alguns procedimentos normativos e propõem-se algumas sugestões.

O Capítulo 5 tem como objetivo o estudo da adição de fibras curtas de polipropileno e a sua concentração para avaliar a redução da fissuração por retração plástica no concreto. Este

estudo faz-se necessário, pois se pretende substituir na capa de concreto existente na laje mista em estudo, a malha de aço comumente empregada para o controle da fissuração, pela adição de fibras de polipropileno.

O Capítulo 6 relata a caracterização da ligação concreto/PRF por meio da avaliação da aderência na interface dos dois materiais. São expostos os procedimentos do programa experimental e seu sistema de instrumentação. Também é realizada uma análise por meio do Método dos Elementos Finitos, para verificar o desempenho do ensaio de aderência utilizado neste trabalho.

No Capítulo 7 é apresentada uma descrição mais detalhada do sistema da laje mista proposto neste trabalho. Também estão desenvolvidos neste capítulo os procedimentos utilizados para o dimensionamento da laje e o programa de investigação experimental no ensaio de flexão da laje mista para o carregamento de curta e longa duração. Os resultados dos ensaios são mostrados bem como, a análise comparativa entre os estudos numérico, teórico e experimental.

No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões do trabalho e as recomendações para estudos futuros.

A presente tese se encerra com as Referências Bibliográficas e os Anexos A, B, C e D. E e F.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Introdução

O objetivo deste Capítulo é descrever os materiais compostos avançados, apresentando suas vantagens, desvantagens e principais aplicações na engenharia civil. Além disso, será exposto, de maneira não exaustiva, a composição, a forma e as principais propriedades destes compostos.

Esta descrição é direcionada principalmente aos sistemas utilizados na composição de perfis pultrudados e à informação técnica estritamente necessária a sua aplicação na engenharia civil.

Um destaque também é dado às literaturas consultadas, cujo tema encontra-se diretamente ligado ao objetivo principal desta pesquisa. Neste item o leitor terá acesso aos principais tipos e geometrias de lajes em materiais compostos pesquisados por autores nacionais e internacionais.

### 2.2. Materiais Compostos Avançados

#### 2.2.1. Generalidades

Uma construção deve oferecer boa funcionalidade durante a sua vida útil. Em geral, as construções em concreto armado apresentam um longo período de vida. Porém os requisitos sobre a estrutura podem alterar-se neste espaço de tempo, comprometendo a vida útil remanescente no nível das condições de segurança e utilização. Frequentemente aparecem situações onde é necessário elevar a capacidade resistente de uma estrutura em função da alteração da finalidade principal de utilização, à subscrição de novas prescrições normativas, às deficiências de projeto ou de construção. Existem também situações onde é prioritário realizar a recuperação da estrutura em níveis de segurança desejáveis, como consequência do aparecimento de manifestações patológicas, causadas em função da degradação dos materiais ao longo do tempo por condicionantes ambientais, no caso de estruturas situadas em locais de atmosfera agressiva.

Em consequência destes fatos, é necessário equacionar o tipo de intervenção mais apropriado para a estrutura, o reforço dos elementos estruturais existentes, a substituição de parte destes elementos ou a introdução de novos sistemas estruturais.



Na opção de introduzir novos sistemas estruturais, tema deste trabalho, os materiais compostos avançados representam um enorme avanço na otimização dos materiais estruturais.

Na última década houve um grande empenho na busca de materiais com características apropriadas aos novos projetos de engenharia, visto ser cada vez mais urgente a aplicação de materiais com elevada resistência, duráveis, não oxidantes, pouco deformáveis e capazes de absorver e dissipar energia; características estas intrínsecas aos PRF.

As indústrias automobilística, naval, ferroviária e aeroespacial empregam com frequência estes materiais nos seus produtos. No início estas indústrias limitavam-se ao emprego em componentes estruturais secundários e/ou com combinações com outros materiais como o aço, o alumínio e a madeira. Hoje em dia observa-se uma crescente confiança na capacidade resistente destes materiais, traduzida na execução de estruturas principais de satélites, naves espaciais, automóveis, barcos, etc. Segundo MOSALLAM (2002), o grande sucesso da aplicação dos materiais compostos avançados nas áreas de atuação citadas anteriormente se deve, principalmente, às suas características únicas e atrativas, listadas a seguir:

- excelente resistência à agressividade ambiental;
- capacidade de absorver vibrações sob cargas de terremoto;
- transparência eletromagnética;
- baixo valor do coeficiente de dilatação térmica;
- pigmentabilidade;
- alta durabilidade, elevada resistência à corrosão e pouca manutenção;
- leveza e facilidade de manuseio;
- alta resistência específica (resistência/massa específica) e rigidez específica;
- características de projeto específicas para o material;
- alta resistência à fadiga.

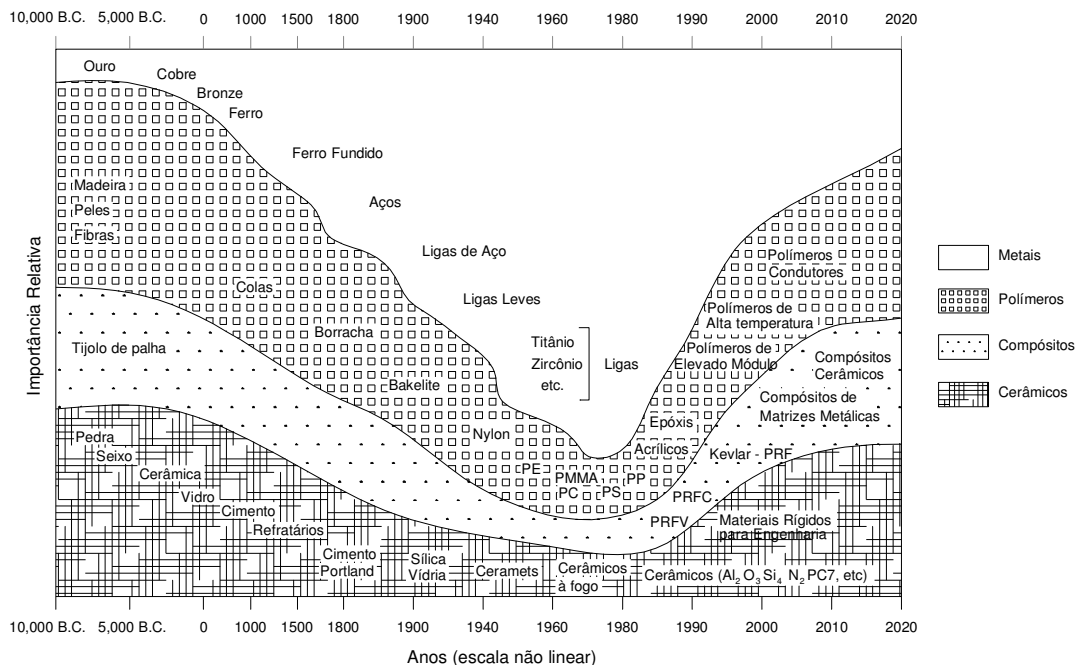
Em virtude destas vantagens e da ampla variedade de possibilidades de aplicações, a indústria dos materiais compostos apresentou um crescimento de aproximadamente 460 % nos últimos 30 anos, partindo de uma produção de 360.000 toneladas em 1970 para 1.680.000 toneladas no ano de 2000, BUSEL (2000) apud NYSTROM (2003).

As características únicas destes materiais podem ser utilizadas para produzir um sistema estrutural otimizado e com custos mínimos de fabricação, construção e manutenção.

Todavia a utilização destes compostos por engenheiros civis é ainda bastante reduzida, devido o seu alto custo.

Por outro lado, a engenharia civil tem manifestado nestes últimos anos um interesse crescente na aplicação destes materiais, conhecidos sob a forma de polímeros reforçados com fibras, de sigla internacional FRP “Fiber Reinforced Polymer” (Plastic), PMC “Polymers Materials Composites” ou APC “Advanced Polymer/Continuous Fiber Composite”, utilizados como elementos estruturais de pontes e passarelas, e como elemento de reforço em construções estruturalmente comprometidas. No Brasil estas siglas são traduzidas em PRF “Plástico Reforçado com Fibras”.

É sabido que os materiais de construção tradicionais apresentam-se inadequados para determinadas situações, devendo-se portanto buscar materiais alternativos. Além disso, o desenvolvimento tecnológico das construções está diretamente relacionado com o avanço na área dos materiais. Desta maneira, com a evolução dos materiais ao longo do tempo como a pedra, o ferro, o aço, o concreto armado e o protendido, as estruturas transformam-se desde suas formas mais primitivas até modernas estruturas suspensas por cabos estaiados, atualmente muito encontradas nos projetos de pontes.



**FIGURA 2.1. – Relação da importância de aplicação dos materiais ao longo do tempo. Fonte: ASHBY (1987).**

A partir da segunda metade do século passado os compostos impulsionaram o aparecimento de novos produtos estruturais. A exposição esquemática apresentada na Figura 2.1 mostra a redução expressiva da importância dos metais e o aumento dos materiais

poliméricos, cerâmicos e compostos. Além disso, pode ser vista a importância relativa dos quatro materiais básicos da construção, ou seja, os metais, os polímeros, os compostos e os cerâmicos.

A análise desta figura mostra que no decorrer da II Guerra Mundial os metais foram fundamentais, mas atualmente a necessidade de construções com elevado desempenho proporciona um impulso exponencial de outros materiais, em particular os compostos, tornando-os cada vez mais competitivos.

A construção civil é, sem dúvida, uma das áreas com maior interesse na exploração destes novos materiais poliméricos, principalmente do tipo PRF, como já demonstram os muitos trabalhos publicados na última década.

### **2.2.2. Constituição dos Materiais Compostos Avançados**

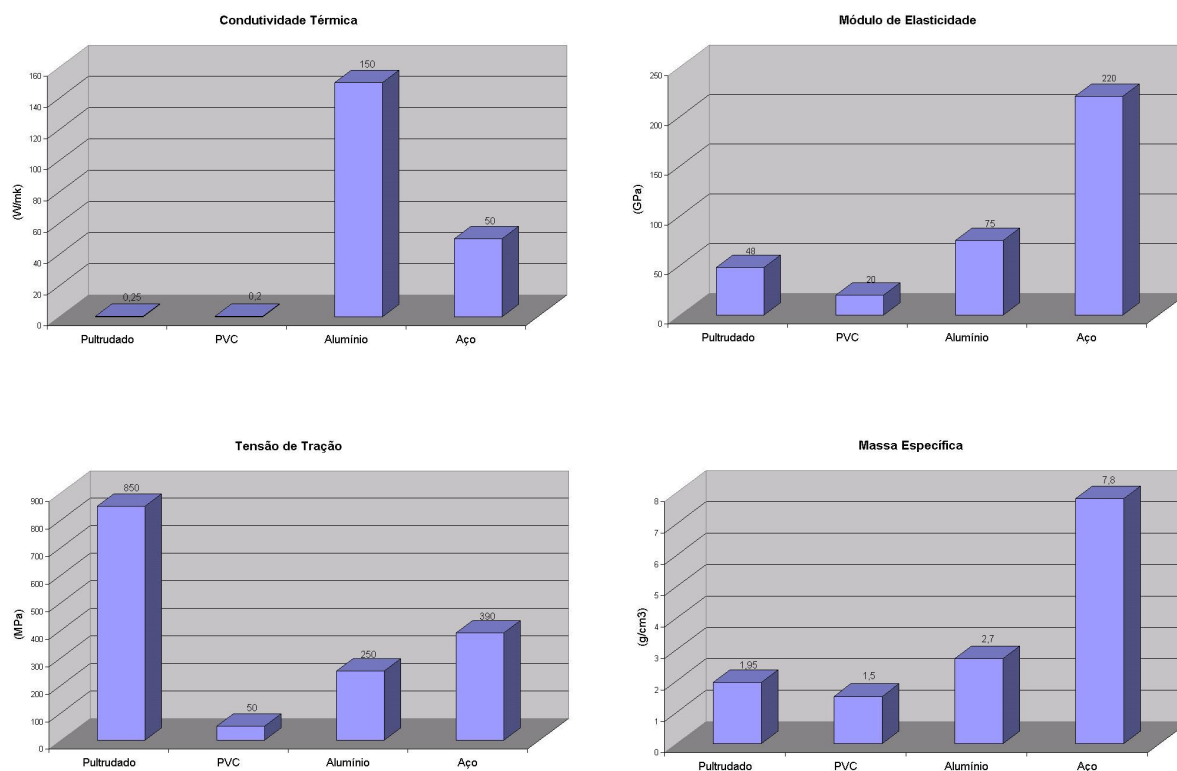
Os PRF são constituídos essencialmente por duas fases. A primeira, que consiste das fibras (fase dispersa) apresenta grande resistência e elevado módulo de elasticidade. A segunda, que é a matriz de resina polimérica (fase contínua), é macia e tem características sinérgicas. Esta última, sendo relativamente dúctil, envolve completamente a primeira fase permitindo, desta maneira, a boa transferência de tensões entre as fibras interlaminares e no plano (conceito de sinergia), JUVANDES (1999).

As relevantes propriedades mecânicas, físicas e químicas dos PRF, em comparação com outros materiais tradicionais, nascem da união destas duas fases, Figura 2.2.

Os compostos de PRF resultam principalmente da composição de fibras contínuas de reforço com resinas termofixas. A partir de fibras como o vidro (G), o carbono (C) e a aramida (A), são constituídos os compostos reforçados denominados internacionalmente como GFRP “*Glass Fiber Reinforced Polymer*”, CFRP “*Carbon Fiber Reinforced Polymer*” e AFRP “*Aramid Fiber Reinforced Polymer*”, respectivamente. No Brasil, a sigla PRFV significa Plástico Reforçado com Fibras de Vidro, equivalente ao GFRP.

O material PRF é de comportamento anisotrópico (mas há casos de isotropia) e na sua composição as fibras governam praticamente a capacidade resistente do sistema. Não apresentam patamar de escoamento e comportam-se como materiais perfeitamente elásticos até a ruptura, COMMITTEE ACI 440R (1996). Via de regra suas propriedades devem ser determinadas experimentalmente por meio de ensaios em corpos-de-prova representativos do produto final. Contudo a diversidade de formas disponíveis no mercado dificulta este procedimento e na ausência de informações experimentais ou especificações do fornecedor destes sistemas, algumas propriedades elásticas podem ser estimadas a partir do conhecimento de valores específicos das propriedades direcionais e da porcentagem de

combinação (em peso ou volume) dos constituintes do composto (fibra e matriz). No caso dos compostos contínuos unidirecionais, por exemplo, as propriedades nas direções principais das fibras podem ser obtidas, com boa aproximação, pela *Regra das Misturas*, AGARWAL e BROUTMAN (1990), HULL (1992), ASHBEE (1993) e KAW (1997), detalhada neste trabalho no capítulo seguinte.



**FIGURA 2.2 – Comparação entre algumas propriedades dos perfis pultrudados de PRF, tendo valores de referência perfis em fibra de vidro e resina poliéster. Fonte: ENMAC (2003).**

### 2.2.2.1. Fibras (Fase Dispersa)

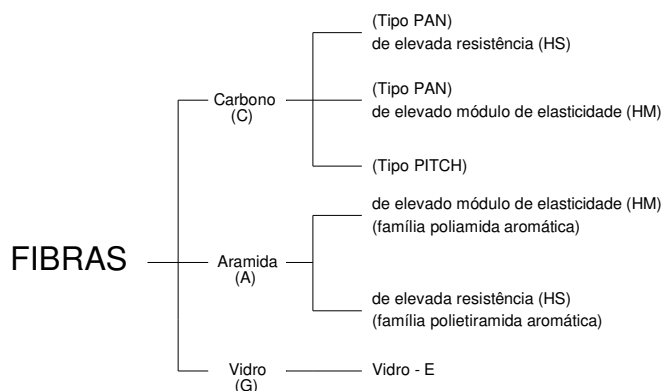
As fibras são definidas, segundo KAW (1997), como um longo filamento contínuo do material, com relação de dimensões de no mínimo 10/1 e com diâmetro na ordem de 10  $\mu\text{m}$ .

Nos compostos avançados as fibras representam as componentes de resistência e rigidez, o que justifica um critério de seleção em função de parâmetros como o tipo de fibra (composição química), sua concentração, seu comprimento (curtas ou longas) e a forma como se dispõem no interior da matriz. Desta última, conclui-se que a resistência à tração e o módulo de elasticidade apresentam seus valores máximos na direção principal das fibras (direção longitudinal) e reduzem progressivamente de valor quando o ângulo em análise afasta-se daquela direção.

Os esforços impostos ao compósito são transmitidos da matriz para as fibras, as quais fornecem ao material elevada resistência à tração e rigidez. Complementa KIM (1995), que a melhoria da tenacidade fornecida pela matriz é pré-requisito necessário para uma melhor

propriedade dos compostos. Todavia a fibra (ou reforço) é o primeiro responsável por esta propriedade.

Um dos principais mercados produtores de fibras contínuas, cita JUVANDES (1999), é o Japão. A classificação quanto aos tipos e características das fibras mais utilizadas nos PRF aplicados na engenharia civil está apresentada na Figura 2.3.



**FIGURA 2.3 – Classificação das principais fibras contínuas de acordo com o JCI TC952 (1998) apud JUVANDES (1999).**

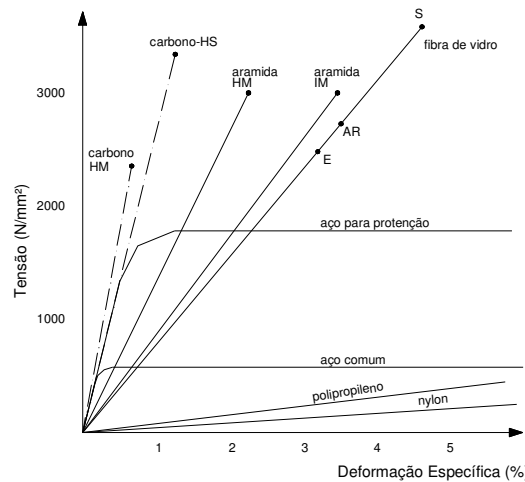
As fibras de carbono podem ser produzidas a partir de três tipos diferentes de fibras. A Polyacrylonitrile, *PAN*, que é a base da maioria das fibras de carbono disponíveis comercialmente. Estas, em geral, apresentam elevada resistência à tração.

As fibras do tipo *PITCH*, constituídas a partir do petróleo asfáltico, alcatrão de hulha ou PVC, podem também ser utilizadas para a produção de fibras de carbono. As fibras de carbono produzidas a partir destes materiais apresentam um custo menor, em comparação com as fibras do tipo *PAN*. Além destas, pode-se produzir fibras de carbono a partir de fibras têxteis sintéticas, derivadas de materiais a base de celulose, as fibras chamadas de *Rayon*. Na Tabela 2.1 pode ser visto um comparativo das propriedades entre estes três tipos de fibras de carbono.

**TABELA 2.1 – Propriedades mecânicas típicas de algumas fibras de carbono. Fonte: AGARWAL e BROUTMAN (1990).**

Propriedade	Unidade	<i>Pitch</i>	<i>Rayon</i>	<i>Pan</i>	
Densidade	-	2,0	1,7	1,8	
Módulo de elasticidade na tração	GPa	380	415 à 550	200 à 345	
Resistência à tração	MPa	1550	2070 à 2760	2480 à 3100	
Deformação de ruptura	%	1,0	-	0,6 à 1,2	
Coeficiente de dilatação térmica	axial	10 <sup>-6</sup> /°C	-1,6 à -0,9	-	-0,7 à -0,5
	transversal	10 <sup>-6</sup> /°C	7,8	-	7 à 10
Diâmetro da fibra	µm	10 à 11	6,5	7,5	

As fibras exibem um comportamento perfeitamente elástico até a ruptura, sem a presença de tensão residual e deformação plástica, ao contrário dos metais. Além disso apresentam uma deformação lenta praticamente desprezível em ambientes secos, Figura 2.4.

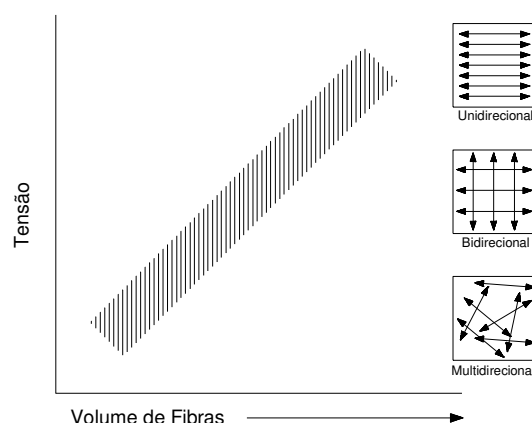


**FIGURA 2.4 – Diagrama tensão-deformação de algumas fibras. Fonte: COMMITTEE ACI 440R (1996).**

Entre os muitos diferentes tipos de reforços, as disposições em filamentos são as mais importantes nas aplicações em estruturas. Estes compostos reforçados com filamentos contínuos apresentam alta resistência específica e rigidez. De um modo geral, as fibras em filamentos de configuração contínua, designadas por KIM (1995) como “*Continuous Filament Reinforced Composites*”, são as mais apropriadas para a utilização em sistemas estruturais, em função da possibilidade de orientação em uma determinada orientação específica, com o objetivo da otimização do desempenho estrutural.

A resistência mecânica de um PRF está diretamente relacionada com a quantidade de fibra empregada e da disposição deste material no composto. As fibras podem apresentar disposições unidirecionais, bidirecionais ou aleatórias (multidirecional).

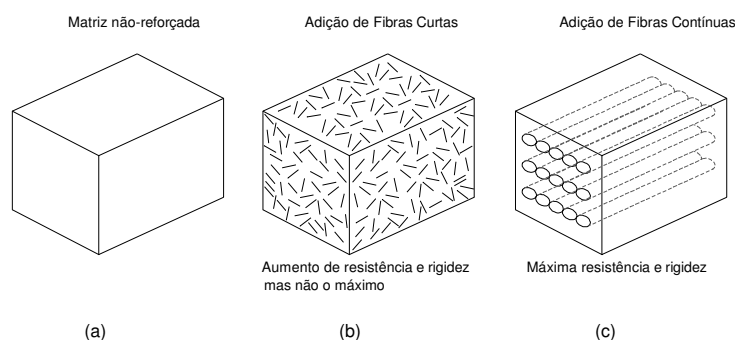
Na disposição unidirecional, obtém-se a máxima resistência e a maior rigidez na direção longitudinal destas fibras mas, por outro lado, fornece propriedades bem mais deficientes na direção transversal às mesmas. Já o arranjo bidirecional obtém boa resistência nas duas direções; menor do que as propriedades na disposição unidirecional, mas ainda considerável. A disposição aleatória, por sua vez, não apresenta direção preferencial de resistência. Com relação a concentração de fibras, na disposição unidirecional é possível concentrar uma quantidade de até 90 % de material em um dado volume. O arranjo bidirecional permite concentrações menores, com valores alcançando no máximo 75 % e a disposição aleatória não permite concentrações maiores que 50 %, BLASS (1988). Claro que estas concentrações refletem diretamente na resistência do composto, como mostra a Figura 2.5.



**FIGURA 2.5 – Relação entre resistência dos PRF, disposição e concentração das fibras. Fonte: SCHWARZ (1992) apud COMMITTEE ACI 440R (1996).**

Nos parágrafos a seguir será apresentada uma breve conceituação das terminologias associadas com os compostos que exibem disposição em filamentos.

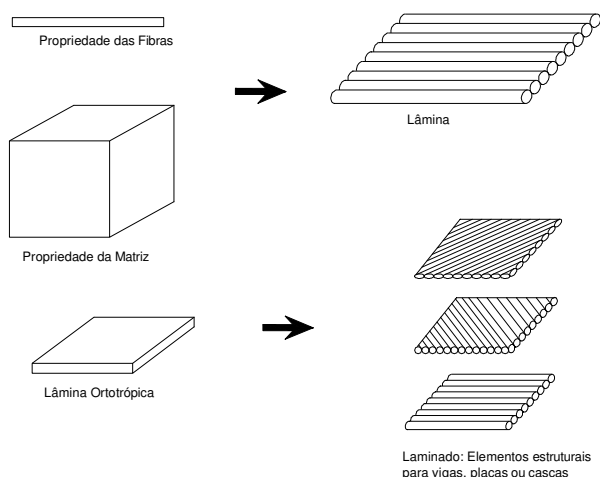
Como ponto inicial da explanação será considerado o termo *lâmina*. Quando os reforços são descontínuos as fibras podem apresentar orientação aleatória ou orientação preferencial. Desta maneira uma lâmina com orientação aleatória de fibras descontínuas, tais como as fibras picadas (ou fibras curtas), Figura 2.6.(b), pode ser considerada de comportamento isotrópico no plano da lâmina. Por outro lado, as máximas resistência e rigidez do composto são obtidas quando os reforços encontram-se na forma de fibras contínuas, Figura 2.6.(c).



**FIGURA 2.6 – Concepção dos materiais compostos. Fonte: KIM (1995).**

O arranjo destas fibras contínuas pode ser na mesma direção (unidirecional) ou formando ângulos (bidirecional). Além disso, nos elementos estruturais é necessário às vezes uma determinada espessura, que é obtida com a utilização de camadas de lâminas, formando-se desta maneira um *laminado*, Figura 2.7.

As propriedades mecânicas finais do composto também dependem fortemente da quantidade de fibra empregada, chamada de *Fração Volumétrica*, entendida como a relação em volume da quantidade de fibra presente na matriz.



**FIGURA 2.7 – Composto reforçado com fibras contínuas. Fonte: KIM (1995).**

Das inúmeras fibras existentes, a fibra de vidro é a predominante para muitas aplicações na engenharia civil. BLASS (1988) cita algumas propriedades destas fibras, frequentemente utilizadas nos materiais compostos:

- elevada relação resistência mecânica/peso;
- comportamento elástico-linear perfeito;
- propriedades térmicas atrativas: são incombustíveis; retém boa parte de sua resistência a temperaturas elevadas (50 % a 370°C e 25 % a 540°C); possuem baixo coeficiente de dilatação e elevada condutividade térmica;
- não absorvem umidade: não apresentam portanto problemas de inchamento;
- notável estabilidade dimensional;
- excelente resistência à corrosão;
- excelentes características elétricas;
- baixo custo.

Na Tabela 2.2 encontram-se comparadas as propriedades de algumas fibras comerciais, inclusive a fibra de vidro.

**TABELA 2.2 – Propriedades mecânicas típicas de algumas fibras. Fonte: KAW (1997).**

Propriedade	Unidade	Grafite	Aramida	Vidro	Aço	Alumínio
Densidade	-	1,8	1,4	2,5	7,8	2,6
Módulo de elasticidade	GPa	230	124	85	206,8	68,95
Resistência à tração	MPa	2067	1379	1550	648,1	275,8
Coefficiente de dilatação térmica	μm/m/°C	-1,3	-5	5	11,7	23



Tais informações tornam as fibras de vidro muito atrativas para a produção de compostos, principalmente com fibras contínuas.

Por outro lado, AGARWAL e BROUTMAN (1990) citam algumas desvantagens destas fibras, como o baixo módulo de elasticidade e a pobre resistência à abrasão, os quais diminuem sua resistência mecânica.

Os dois principais tipos das fibras de vidro são o *E-glass*, também chamado de *fiberglass* e o *S-glass*.

A letra *E* no *E-glass* origina-se de *electrical*, pois este tipo de fibra é amplamente utilizado em moldes para instalações elétricas. Atualmente, também tem sido utilizado em decorações e aplicações estruturais. Compreende aproximadamente 80 a 90 % da produção comercial de fibra de vidro. Este tipo de fibra pode tornar-se, segundo KIM (1995), o material mais importante para aplicações nas estruturas civis. O *S-glass*, por outro lado, possui em sua composição altas concentrações de sílica (origem do *S* no nome da fibra), o que representa alta resistência, bem como desempenho a altas temperaturas e elevada resistência à fadiga. Em função destas qualidades, é utilizado principalmente na indústria aeronáutica. Na Tabela 2.3 são apresentadas algumas diferenças nas propriedades entre estas duas fibras de vidro.

**TABELA 2.3 – Comparação das propriedades do E-glass e S-glass. Fonte: AGARWAL e BROUTMAN (1990).**

Propriedades	Unidade	<i>E-glass</i>	<i>S-glass</i>
Massa Específica	g/cm <sup>3</sup>	2,54	2,49
Módulo de Elasticidade	GPa	72,40	85,50
Resistência à tração*	MPa	3448	4585
Coefficiente de dilatação térmica	10 <sup>-6</sup> /°C	5,0	2,9
Variação do diâmetro	µm	3-20	8-13

\* Valores virgens, tomados imediatamente na formação da fibra. Os valores disponíveis nos produtos acabados podem variar de 50 a 75 % dos valores virgens.

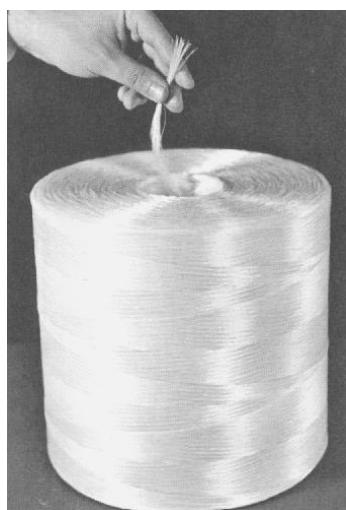
É oportuno salientar que existem ainda outros tipos de fibras de vidro, como por exemplo o *AR-glass*, que é uma fibra com alta resistência ao ataque de álcalis.

A forma de processamento das fibras também influencia nas propriedades finais de resistência e rigidez do material. As fibras contínuas na forma de mantas e fios caracterizam-se por fornecer reforços apenas na direção que estão dispostas, já os tecidos permitem reforços em duas direções e as fibras curtas produzem na sua grande maioria reforços aleatórios. Algumas destas formas de fibra de vidro estão descritas de maneira resumida na Tabela 2.4.

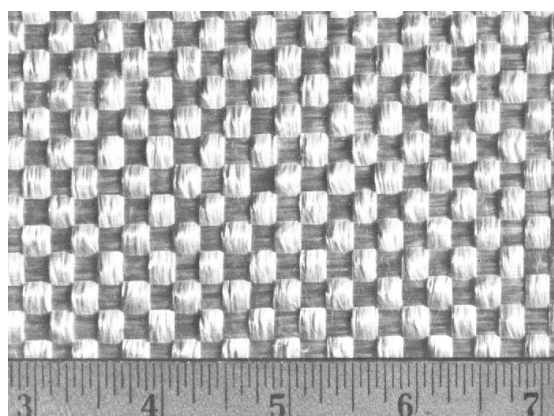
**TABELA 2.4 – Descrição resumida das várias formas de fibras de vidro comercialmente disponíveis.**

Designação		Descrição	Orientação das Fibras	Figuras	
Filamentos ( <i>Rovings</i> )		Conjunto de filamentos contínuos de diâmetros de 9 ou 13 $\mu\text{m}$ . (450 – 3600 m/g)	Unidirecional	2.8 (a)	
Filamentos entrelaçados ( <i>Woven Roving</i> ) [i]		Entrelaçamento direcionado de dois filamentos ou faixa de fibras. (600 – 800 g/m <sup>2</sup> )	Bidirecional 0/90° 0/+45° 0/-45°	2.8 (b)	
Mantas e Tecidos	Manta ( <i>Mat</i> ) [i]	Manta de fios picados ( <i>Chopped-strand mat</i> )	Disposição aleatória de fios picados, em comprimentos de 25 a 50 mm. (250 a 920 g/m <sup>2</sup> )	Multidirecional	2.9 (a)
		Manta de fios contínuos ( <i>Continuous-strand mat</i> )	Consiste de fios contínuos depositados e entrelaçados na forma de espiral.	Multidirecional	2.9 (b)
		Manta fina ou véu ( <i>Surfacing mat or veil</i> )	Aglomerado fino, composto de uma camada de filamentos contínuos.	Bidirecional	2.10 (a)
	Tecido ( <i>Cloth</i> ) [i]	Tecido obtido por contínuos filamentos de fios, fabricado por processo têxtil convencional. (150 – 400 g/m <sup>2</sup> )	Unidirecional, bidirecional ou multidirecional	2.10 (b)	

[i] designação internacional para o arranjo de fibras no plano.



(a)



(b)

**FIGURA 2.8 – (a) Fibra de vidro na forma de filamentos (*rovings*); (b) Fibra de vidro na forma de manta de filamentos entrelaçados (*woven rovings*). Fonte: LUBIN (1969).**

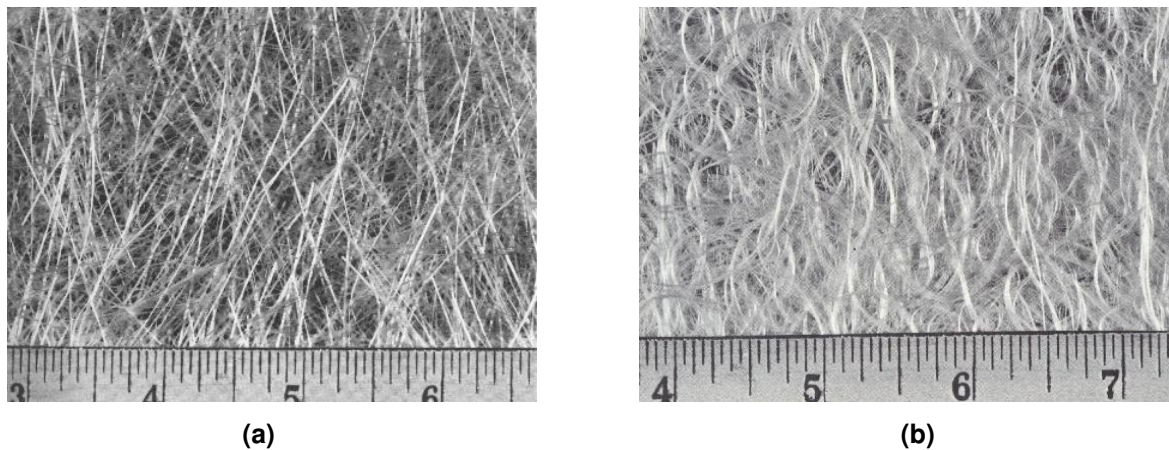


FIGURA 2.9 – (a) Fibra de vidro na forma de manta de fios picados (*chopped strand mat*); (b) Fibra de vidro na forma de manta de fios contínuos (*continuous strand mat*). Fonte: LUBIN (1969).

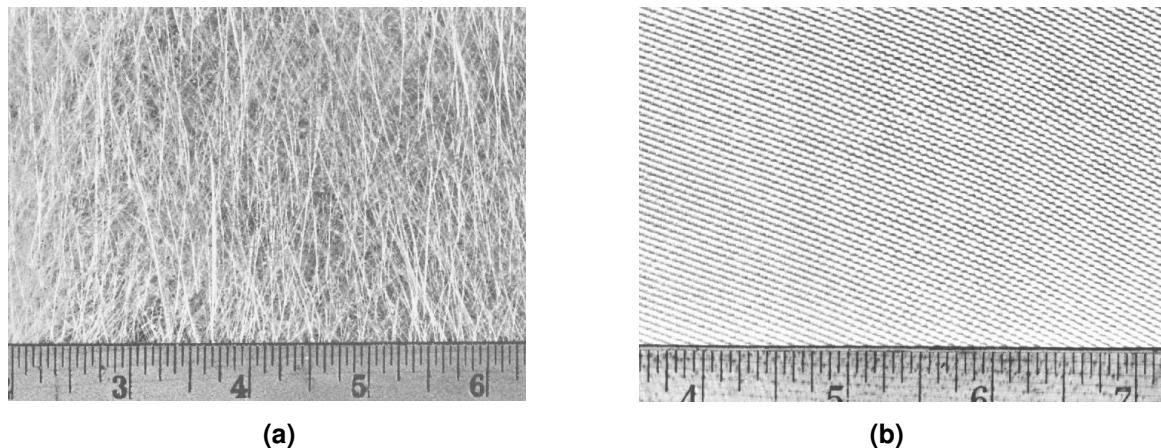
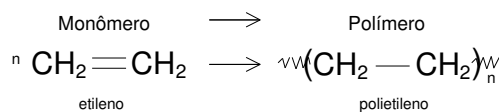


FIGURA 2.10 – (a) Fibra de vidro na forma de manta fina ou véu (*surfacing mat ou veil*); (b) Fibra de vidro na forma de tecido (*cloth/glass fabric*). Fonte: LUBIN (1969).

#### 2.2.2.2. Matriz (Fase Contínua)

De modo objetivo e de fácil entendimento para o engenheiro civil, pode-se definir a matriz como uma fase. A denominação fase é dada a uma molécula sintética, ou seja, produzida pelo homem, chamada de polímero (do grego: poli – muitas; mero – partes). Os polímeros são moléculas gigantes, geralmente de origem orgânica, constituídas pela união de moléculas de baixo peso molecular, denominadas monômeros, por meio de reações químicas. Um exemplo ilustrativo é a analogia a uma corrente cujos elos correspondem aos monômeros, sendo a corrente o polímero. Desta maneira, os polímeros podem ser definidos quimicamente como sendo moléculas relativamente grandes em cuja estrutura se encontram unidades químicas simples repetidas (meros).

Na Figura 2.11, por exemplo, o etileno é o monômero que após reagir com várias outras moléculas iguais a ele forma o polímero polietileno. A reação química para obtenção do polímero é denominada polimerização.



**FIGURA 2.11 – Polímero etileno. Fonte: HULL (1992).**

A seleção de um sistema de PRF inclui no composto o estabelecimento de um agente responsável pela sua colagem aos elementos de reforço. Como as fibras não são capazes de transmitir esforços entre si, estas são embebidas em uma matriz (resina), para formar um composto por adesão. A matriz tem como uma de suas funções envolver a fibra permitindo assim que os esforços sejam transmitidos ao longo do elemento, AGARWAL e BROUTMAN (1990).

Desta maneira, a fim de transferir estes esforços e reduzir a possibilidade de ruptura na matriz, a união fibra-matriz deve estar associada com a ótima resistência ao cisalhamento da matriz que, em geral, é proporcional a sua resistência à tração, KIM (1995).

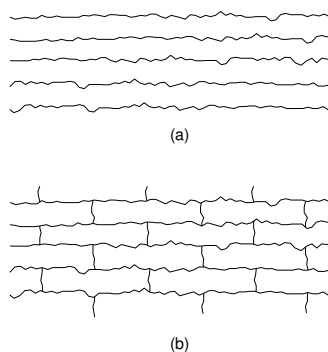
Em geral as propriedades da matriz influenciam na resistência ao cisalhamento interlaminar no plano do composto. Também influenciam fortemente nas propriedades mecânicas transversais, tais como: módulo de elasticidade transversal, módulo de cisalhamento e resistência à tração perpendicular às fibras. Além disso, representa o suporte físico contra a instabilidade das fibras sob ação de esforços de compressão, COMMITTEE ACI 440R (1996).

Sem retirar a importância da fibra, a matriz polimérica apresenta vital relevância sobre as características dos compostos como um todo. Em geral os reforços apresentam elevada resistência e rigidez mas, por outro lado, tendem a ser frágeis. Logo é a matriz que protege os reforços contra a abrasão e a agressividade ambiental, que pode ser a responsável pela ruptura. É função também da matriz, citam AGARWAL e BROUTMAN (1990) proteger a fibra dos possíveis danos mecânicos causados pelo manuseio do composto.

Uma comparação interessante, encontrada em KIM (1995), pode ser realizada utilizando-se o princípio de dimensionamento das estruturas em concreto armado. Sabe-se que nos compostos laminados a força na direção transversal é suportada pela matriz. Desta maneira fazendo-se a analogia a uma viga de concreto armado, quando o esforço de cisalhamento excede a resistência do concreto ao cisalhamento, sabe-se que os estribos assumem a função de resistir a estes esforços. Da mesma maneira quando um composto é utilizado na concepção de um elemento estrutural e há ruptura das fibras, a matriz redistribui os esforços pela vizinhança dos reforços e ambos dividem os esforços oriundos dos reforços rompidos.

As matrizes poliméricas de acordo com sua estrutura e comportamento são classificadas como resinas termoplásticas e resinas termofixas.

Um polímero termoplástico pode ser considerado como uma longa cadeia de moléculas dispostas paralelamente uma próxima a outra, Figura 2.12(a). Vários tipos de atração eletrostática mantêm as moléculas numa mesma posição relativas entre si. Em uma certa temperatura o movimento molecular torna-se tão intenso que as atrações rompem-se e as moléculas iniciam a passar próximas uma das outras. Esta temperatura é conhecida como temperatura de amolecimento,  $T_m$ . A partir desta temperatura o polímero pode ser moldado em qualquer forma. Logo, as termoplásticas sofrem deformações com o aumento de temperatura e em função disto são amplamente utilizadas nos processos de injeção plástica. Além disso, em função de sua estrutura as resinas termoplásticas possuem propriedades recicláveis. São exemplos desta resina o polietileno, o poliestireno, o nylon e o polipropileno.



**FIGURA 2.12 – Polímeros termoplásticos e termofixos. Fonte: KIM (1995).**

Por outro lado, um polímero termofixo pode ser imaginado como uma grande molécula na qual cada cadeia molecular é quimicamente ligada à sua vizinha. As ligações entre estas cadeias são chamadas de *crosslinks* (ligações cruzadas ou reticuladas), Figura 2.12(b).

Os termofixos, desta maneira, entram num regime de cura (polimerização), ou seja, endurecimento quando aquecidos, sendo esta uma reação irreversível. A cura pode ser interpretada como uma interligação química de cadeias moleculares formando moléculas maiores e mais complexas e tornando o componente mais resistente. Estas resinas não possuem a característica da reciclagem. São exemplos desta resina o epóxi, o poliéster e o viniléster.

As composições químicas destas resinas podem ser consultadas mais detalhadamente em publicações como COMMITTEE ACI 440R (1996), KIM (1995), AGARWAL e BROUTMAN (1990), KAW (1997), BLASS (1988), ASHBEE (1993) e HULL (1992), não sendo apresentadas neste trabalho.

Em função destas diferenças básicas, KIM (1995) relaciona algumas vantagens existentes para os dois tipos de resinas. As termofixas em geral utilizam em sua composição matéria-prima com custos mais reduzidos, apresentam resistência química e melhor resistência

à deformação lenta. Já as termoplásticas permitem rapidez na velocidade de processamento e possibilidade de reaproveitamento dos resíduos.

As resinas termofixas são as mais comuns para uso estrutural, pois apresentam características finais mais desejáveis. Na Tabela 2.5 são apresentadas algumas propriedades relacionadas às resinas termofixas e termoplásticas.

**TABELA 2.5 – Comparação entre algumas propriedades das resinas termofixas e termoplásticas, usadas nos materiais compostos. Fonte: HULL (1992).**

Propriedade	Unidade	Resinas Termofixas		Resinas Termoplásticas	
		Epóxi	Poliéster	Polipropileno	Nylon
Massa específica	Kg/m <sup>3</sup>	1100-1400	1200-1500	900	1140
Módulo de elasticidade	GPa	3-6	2-4,5	1,0-1,4	1,4-2,8
Coeficiente de Poisson	-	0,38-0,4	0,37-0,39	0,3	0,3
Resistência à tração	MPa	35-100	40-90	-	-
Resistência à compressão	MPa	100-200	90-250	-	-
Tensão de escoamento	MPa	-	-	25-38	60-75
Limite de deformação	%	1-6	2	>300	40-80
Condutividade térmica	W°C/m	0,1	0,2	0,2	0,2
Coeficiente de dilatação térmica	10 <sup>-6</sup> /°C	60	100-200	110	90
Temperatura de distorção	°C	50-300	50-110	-	-
Temperatura de amolecimento	°C	-	-	175	264
Absorção de água (24h a 20°C)	%	0,1-0,4	0,1-0,3	0,03	1,3

Entre as resinas termofixas, LUCATO (1991) apud TITA (1999) observou que as resinas do tipo epóxi apresentam algumas vantagens para o desenvolvimento de elementos estruturais, entre os quais:

- baixa viscosidade, o que facilita a moldagem;
- baixa retração, evitando tensões residuais;
- possibilidade de cura à temperatura ambiente;
- apresentam alto módulo de elasticidade e resistência a compressão;
- proporcionam aplicações estruturais de alto desempenho.

Mas por outro lado, segundo BLASS (1988), as resinas epoxídicas apresentam como desvantagem uma aderência indesejável nas paredes do molde em que estão sendo processadas. Além disso, o processo de pultrusão com este tipo de resina torna-se mais difícil em função da necessidade de uma quantidade maior de reforço e conseqüentemente apresentam uma *pot life*, ou seja, período que a mistura mantém-se estável, mais baixo.

As resinas epoxídicas podem ser consideradas uma extensão das resinas do tipo viniléster, no que diz respeito à resistência e podem ser produzidas com sistema de cura em amina ou anidrido. As matrizes poliméricas do tipo viniléster e poliéster são curadas com peróxido.

As resinas poliésteres, dependendo da matéria prima empregada no processo de formação, podem ser divididas em isoftálicas, tereftálicas ou ortoftálicas. As isoftálicas conferem ao produto final uma resistência mecânica mais elevada; estas são empregadas em tubos, tanques e recipientes que necessitam de resistência adicional a meios agressivos. As resinas tereftálicas apresentam maiores resistências mecânicas, térmicas e elétricas, possuindo também resistência química ligeiramente superior às isoftálicas em alguns meios agressivos. As ortoftálicas, por outro lado, são resinas de baixo custo e resistência química e mecânica inferiores às primeiras. Esta última oferece vantagens no custo da pultrusão, resistência a altas temperaturas e compatibilidade com a fibra de vidro, porém não são resistentes à corrosão como as isoftálicas ou tereftálicas.

Além do custo e resistência à corrosão, fatores que afetam a seleção da resina são a resistência a altas temperaturas e a compatibilidade da resina poliéster com a fibra de vidro. Uma alta temperatura de distorção (HDT) ou alta temperatura de transição vítrea (Tg) indica que a resina possui uma resistência mais alta a temperatura. Contudo, tais resinas tendem a ser mais quebradiças e são geralmente processadas em perfis de paredes mais finas.

As resinas do tipo viniléster possuem como vantagens a capacidade de promover uma saturação mais eficiente dos reforços, resistência a temperaturas mais elevadas e à corrosão. Segundo PETHRICK et al. (2000), as resinas vinilésters são preferidas em função da maior resistência em ambientes úmidos.

### **2.2.3. Fabricação dos Materiais Compostos Avançados**

Nos itens anteriores discutiu-se que tanto a matriz como os reforços exercem importante papel nas propriedades dos compostos. Mais importante porém é a maneira com que estes materiais são combinados. Os métodos de produção destes materiais desenvolveram-se rapidamente a partir de processos manuais para processos totalmente automatizados, resultando em vantagens na precisão dimensional, controle de qualidade e rapidez de produção. Alguns dos principais métodos de fabricação e suas respectivas propriedades mecânicas estão resumidos na Tabela 2.6.

**TABELA 2.6 – Métodos de fabricação e suas propriedades mecânicas típicas, para o reforço com fibra de vidro. Fonte: KIM (1995).**

Propriedade	Unidade	Aplicação manual ( <i>Hand lay-up</i> )	Aplicação com pistola ( <i>Spray-up</i> )	Enrolamento de filamentos ( <i>Filament winding</i> )	Pultrusão ( <i>Pultrusion</i> )
Resistência à tração	MPa	62 – 344	35 – 124	550 – 1380	275 – 1240
Módulo de elasticidade na tração	GPa	4 – 31	6 – 12	30 – 50	21 – 41
Resistência à flexão	MPa	110 – 550	83 – 190	690 – 1725	517 – 1448
Módulo de elasticidade na flexão	GPa	6 – 28	5 – 9	38 – 48	21 – 41
Resistência à compressão	MPa	124 – 344	103 – 207	345 – 550	276 – 690
Resistência ao cisalhamento	MPa	28 – 41	-	48 – 69	35 - 69

A técnica de aplicação manual é a mais antiga e amplamente utilizada na produção de produtos plásticos reforçados. A técnica se resume na aplicação manual do reforço e da resina contra a superfície de um molde; a espessura é controlada pela quantidade de camadas do material dispostas sobre o molde. Esta técnica é geralmente empregada com resinas do tipo poliésteres e epoxídicas. As aplicações típicas incluem cascos de barcos, piscinas e tanques.

No processo de fabricação com pistola a resina e as fibras são simultaneamente projetadas sobre a superfície do molde por meio de um equipamento especial onde a fibra, em filamentos, é alimentada através de um cortador e lançada no fluxo de resina. Após a deposição a mistura é trabalhada com pincéis ou roletes para remover o ar aprisionado e alisar a superfície. Também são empregadas predominantemente resinas do tipo poliésteres e epoxídicas.

O processo de enrolamento de filamentos permite utilizar reforços contínuos para se obter uma aplicação mais eficiente das fibras. Neste processo os filamentos contínuos de fibras são embebidos em um banho de resina e, a seguir, enrolados sobre um mandril da forma desejada. Máquinas especiais permitem o enrolamento segundo a orientação e as especificações determinadas que assegurem a máxima resistência na direção desejada. Ao final do processo, ao ser atingido o número desejado de camadas o mandril é colocado a curar ao ambiente ou em forno.

Outro processo muito utilizado é a moldagem em câmara de vácuo. Este é um refinamento da moldagem manual que envolve o uso de vácuo para eliminar os vazios e liberar o ar aprisionado, expulsando desta maneira o excesso de resina. Neste processo, uma película (celofane, álcool polivinílico, nylon) é colocada sobre o molde, fixo pelas bordas e vedado com um composto selante. Após a realização do vácuo na câmara sob a película o material é colocado à cura.

Um dos mais populares tipos de compostos aplicados na construção é o produzido pelo processo da pultrusão, MOSALLAM (2002). Por décadas os compostos pultrudados têm sido

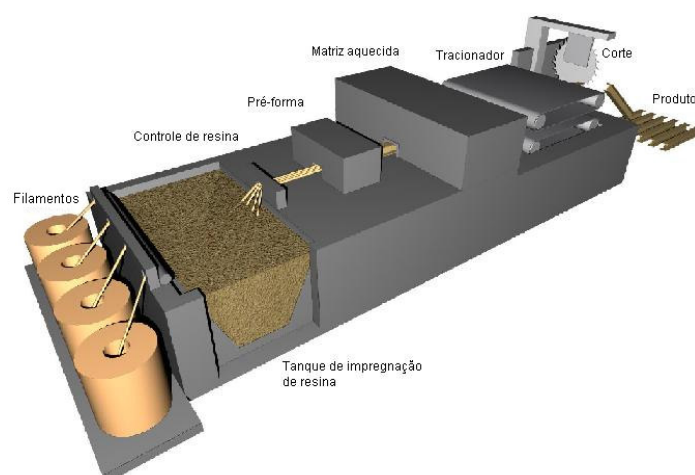


utilizados como elementos estruturais secundários em aplicações como pisos e escadas, para indústrias petroquímicas, plataformas de petróleo e estações de tratamento de água, e também como leito para cabos.

Todavia, segundo BAKIS et al. (2002), a partir dos anos 90 houve um aumento significativo nas pesquisas e no uso de perfis pultrudados nos sistemas estruturais principais de algumas construções. Exemplo disto foram as pontes, passarelas, torres de eletrificação e edificações de significado importante, projetadas e construídas no final da última década e no início deste século.

A pultrusão é um processo de fabricação contínua de perfis de PRF que utiliza resinas termofixas e reforços flexíveis de fibras. Estes reforços são tracionados (o inverso da extrusão) através de uma chapa guia que auxilia no correto posicionamento dos materiais de reforço no produto final. Em seguida são passados através de uma câmara de impregnação de resina que contém o polímero. O polímero impregnando o reforço atua como uma cola conectando os vários componentes do reforço. Os reforços saturados são por sua vez conformados e moldados dentro de uma aproximação da configuração final, conformando o produto na pré forma a fim de reduzir as tensões internas na peça.

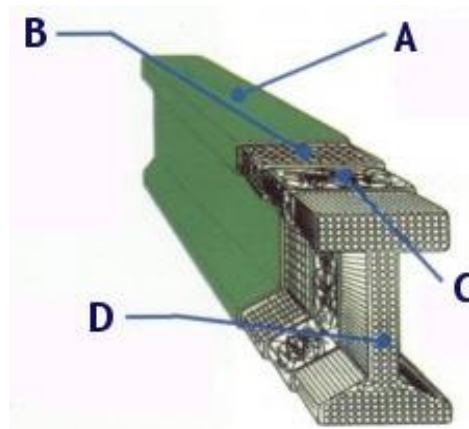
Quando este material impregnado no composto resinado passa através da matriz (fôrma metálica) aquecida, ocorre o processo de polimerização (endurecimento), tomando assim a forma definitiva. Cada perfil tem sua matriz específica e no final do processo acontece o corte dentro dos comprimentos pré-definidos. Na Figura 2.13 é ilustrado o esquema de fabricação de um perfil pultrudado.



**FIGURA 2.13 – Esquema do processo de pultrusão. Fonte: AGARWAL e BROUTMAN (1990).**

A pultrusão é considerada, segundo MOSALLAM (2002), o único processo em molde fechado que permite a combinação de vários tipos de reforços na mesma seção.

A maioria dos perfis estruturais pultrudados comercialmente disponíveis é composto de uma combinação de reforços longitudinais, filamentos “*rovings*” e reforços transversais, manta de fios contínuos “*continuous-strand mat*”, para produzir o composto por impregnação destes reforços com o polímero. O material superficial conhecido como véu “*surfacing mat*” ou “*veil*”, é geralmente adicionado somente após a etapa de impregnação em função deste material apresentar resistência insuficiente para resistir aos esforços de tração na área de impregnação do banho. A seção transversal típica de um perfil pultrudado encontra-se esquematizada na Figura 2.14.

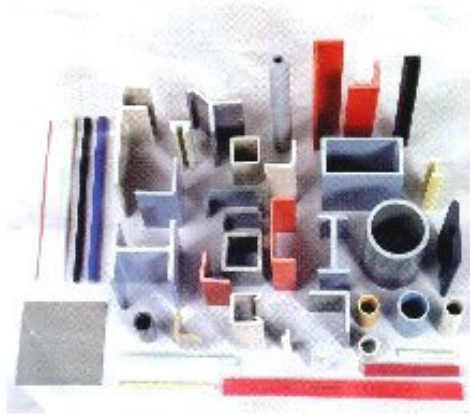


**FIGURA 2.14 – Esquema da seção de um perfil pultrudado. Sendo: A - Resina padrão; B - Véu ; C - Manta de fios contínuos; D – Filamentos. Fonte: ENMAC (2003).**

Os filamentos apresentam-se como contínuos e múltiplos fios dispostos na direção longitudinal. Sua principal função é prover resistência à tração, compressão e flexão. O maior reforço destas seções encontra-se concentrado na direção longitudinal, com o mínimo de reforço na direção transversal. A manta de fios contínuos tem a função de reforço transversal do sistema que fornece uma resistência transversal ao elemento. O véu apresenta-se como uma superfície rica em resina que proporciona ao material uma elevada resistência à corrosão em ambientes severos, além de uma barreira contra exposição contínua de raios ultravioleta.

O processo da pultrusão é altamente automatizado e permite tracionar as fibras reforçadas em resina impregnada e tecidos de fibra através do molde aquecido em velocidades de até 3m/min, dependendo do tamanho e complexidade da forma do perfil. Perfis com seções transversais abertas e seções fechadas únicas ou multicelular também podem ser fabricados. Tipicamente são adotadas fração de volume de fibra de 35 a 50 %, BAKIS et al. (2002).

Uma das principais vantagens do uso desta técnica é a variedade de formas estruturais que podem ser produzidas. Em geral são encontradas seções transversais similares às de aço: *H, I, C, L*, entre outras, Figura 2.15.



**FIGURA 2.15 – Seções transversais típicas dos perfis pultrudados. Fonte: ENMAC (2003).**

O posicionamento das fibras, a formulação da resina, a temperatura do molde e a velocidade de tracionamento são variáveis críticas no processo. Estas variáveis devem ser estabelecidas durante o projeto do produto e monitoradas durante o processo de produção a fim de assegurar que o produto final apresente a aparência e as propriedades físicas e químicas desejadas, KIM (1995).

A fibra de vidro é o reforço mais comum utilizado na pultrusão, muito embora outros reforços tais como o Kevlar, o carbono e até materiais metálicos possam ser usados. A combinação de reforços em uma determinada seção transversal pode ser criada para fornecer a resistência desejada em ambas as direções longitudinal e transversal. Além disso uma mesma seção permite obter outros valores de propriedades mecânicas, através da simples alteração na orientação das fibras.

As resinas utilizadas na pultrusão podem ser projetadas de maneira a se buscar o melhor desempenho nas condições de serviço desejadas ao projeto tais como, resistência à corrosão, boa propriedade como isolante elétrico, resistência a altas temperaturas e resistência às intempéries. Às vezes aditivos são utilizados para se obter resistência ao fogo. As resinas mais utilizadas são as termofixas do tipo poliéster e viniléster; as do tipo epóxi também são utilizadas.

Além da variedade nas formas e das propriedades de resistência, GANGARAO et al. (1999) relacionam outras vantagens associadas a técnica da pultrusão:

- baixo custo de mão-de-obra e operação;
- desperdício mínimo de material;
- elevada taxa de produção.

As vantagens listadas anteriormente fazem da pultrusão um dos principais processos de produção de PRF. Exemplo disto é a ampla aplicação deste material, listada pelo COMMITTEE

ACI 440R (1996), como: tubulações para óleo; barras para concreto armado e protendido; perfis estruturais para instalações offshore e indústrias químicas, grades, guarda-corpos, guardrails, eixos de transmissão de automóveis, sistemas de ancoragem para solos, tirantes, paletes e perfis para janelas; o que demonstra a versatilidade do produto.

Apesar destas aplicações, BAKIS et al. (2002) sugerem que o aumento na aceitação dos perfis pultrudados para utilização nos sistemas estruturais principais de construções prediais/industriais e infra-estruturas de pontes depende de três fatores. Em primeiro lugar, a aceitação internacional por parte dos projetistas dos materiais pultrudados; o segundo é o desenvolvimento de normas de projeto para estruturas pultrudadas, incorporando construções residenciais, industriais e pontes; o terceiro fator, e mais importante, é a redução do custo dos perfis pultrudados, que atualmente não é competitivo com produtos similares em materiais tradicionais.

### **2.3. O PRF Aplicado na Engenharia Civil**

Apesar da ampla utilização dos materiais compostos avançados na indústria aeroespacial, naval e militar, a sua aplicação na engenharia civil ainda tem sido limitada principalmente em função de razões econômicas. As principais vantagens dos materiais compostos avançados tais como forma livre, elevada resistência específica (razão resistência/peso) e o alto grau de inércia química em relação ao meio ambiente, perdem para o alto custo destes materiais na comparação direta com os materiais estruturais convencionais tais como o aço, concreto ou alvenaria.

Além disso, a substituição de componentes dos sistemas estruturais convencionais por elementos de materiais compostos avançados demonstrou no passado não ser apenas economicamente, mas também estruturalmente difícil de se justificar na construção civil. Todavia nestes últimos anos este fato tem mudado em consequência dos seguintes itens, relatados por SEIBLE e KARBHARI (1996).

- Os avanços nos processos de fabricação dos PRF por pultrusão, por exemplo, e os processos automatizados ou semi-automatizados de fabricação de grandes componentes têm reduzido bastante os custos;
- A demanda reduzida de materiais compostos reforçados com fibras de carbono ou aramida na indústria militar; a expansão do uso de fibras no mercado altamente competitivo da indústria de artigos esportivos e as perspectivas de utilização no setor civil levaram a uma redução nos custos de fabricação;

- Projetos de sistemas estruturais constituídos destes novos materiais juntamente com materiais estruturais convencionais, ao invés da substituição individual dos componentes ou projetos completos em materiais compostos avançados, demonstraram que os PRF podem ser tecnicamente eficientes e ao mesmo tempo economicamente competitivos.

Recentemente novos conceitos e sistemas estruturais que combinam as características mecânicas superiores de resistência à tração dos compostos reforçados com fibras com as características predominantes do concreto à compressão foram desenvolvidos.

Um destes novos conceitos reflete-se na construção de novos sistemas para pontes e pórticos de edifícios que funcionam ao mesmo tempo como fôrmas permanentes e armadura para elementos de concreto moldados *in-situ*, o que elimina não apenas a necessidade da armadura de aço interna como a remoção das fôrmas.

Os materiais compostos avançados podem demonstrar as suas vantagens sobre os materiais convencionais nas seguintes aplicações:

- recuperação e reforço externo de estruturas;
- reforço interno para estruturas de concreto;
- desenvolvimento de novas estruturas em PRF.

Nos itens a seguir serão apresentados exemplos para as três aplicações citadas com ilustrações que demonstram a grande aplicabilidade e funcionalidade deste material. Um destaque é dado para o desenvolvimento de novas estruturas em materiais compostos, objetivo desta pesquisa.

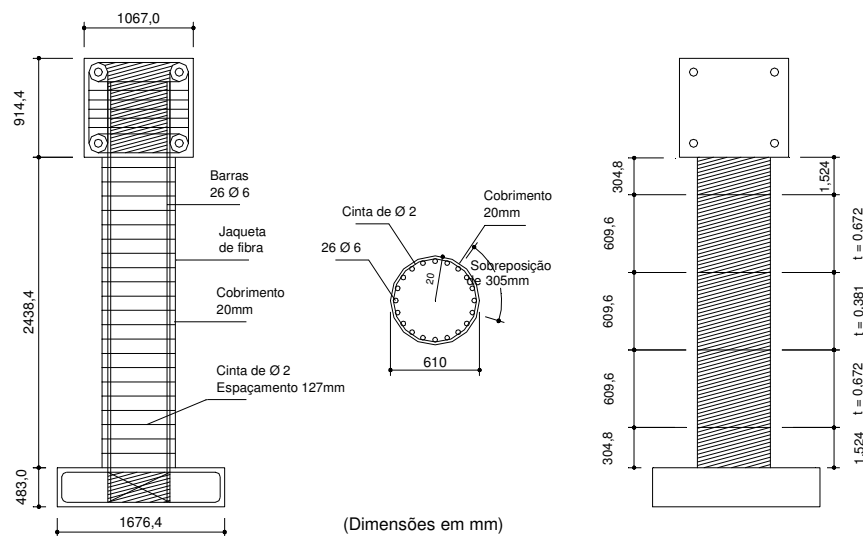
### **2.3.1. Recuperação e Reforço Externo de Estruturas**

Particularmente na recuperação e reforço de sistemas estruturais existentes, os materiais compostos avançados apresentaram ao longo dos últimos anos resultados promissores. O aumento da capacidade resistente de algumas pontes envelhecidas com camadas de materiais compostos avançados foi realizada com sucesso em muitas situações práticas. Pode-se afirmar que na recuperação de edifícios, a utilização dos PRF trouxeram melhoras significativas no desempenho estrutural, tanto nas estruturas danificadas como nas não danificadas, KARBHARI e SEIBLE (1998).

A partir do conhecimento das suas propriedades, MOSALLAM (2002) afirma que os compostos podem fornecer aos engenheiros de estruturas a solução para muitos dos principais problemas estruturais. Neste contexto as duas maiores aplicações estão na recuperação e no

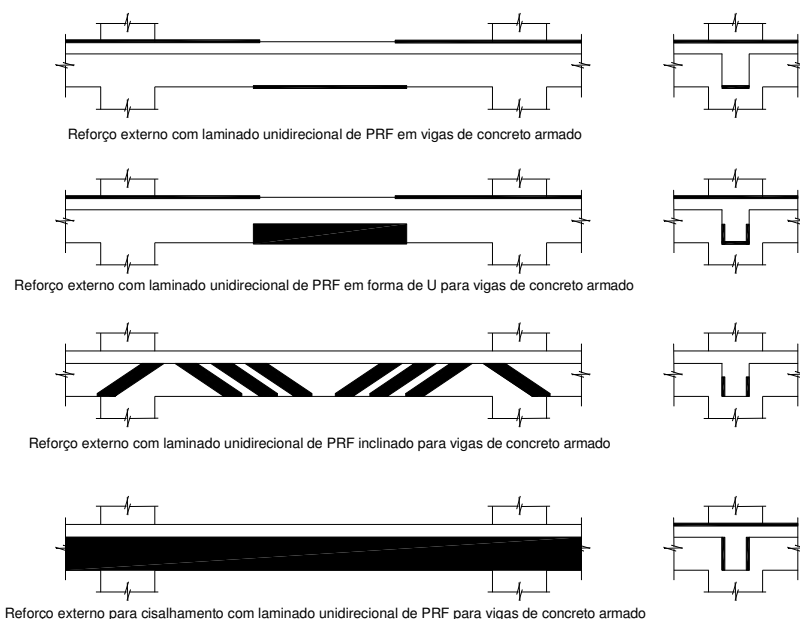
reforço de estruturas submetidas a ação de cargas sísmicas e, nas estruturas que sofreram corrosão das armaduras, no caso do concreto armado. Ambas aplicam-se a prédios, pontes e outros sistemas de infra-estrutura.

No final da década de 80, de acordo com SEIBLE e KARBHARI (1998), a maioria das aplicações com PRF foram dirigidas para o aumento da ductilidade nos pilares de concreto de pontes e viadutos, especialmente nas áreas submetidas a terremotos da Califórnia. Na Figura 2.16 pode ser visto o projeto de reforço com fibras de carbono na coluna de uma ponte.



**FIGURA 2.16 – Detalhe de reforço em uma coluna com PRF. Fonte SEIBLE e KARBHARI (1998).**

Além do reforço em pilares esta aplicação pode também ser utilizada em elementos de vigas, lajes, ligações viga-coluna e paredes, resistindo a esforço de flexão, cisalhamento e torção, Figura 2.17.



**FIGURA 2.17 – Reforços externos típicos utilizados em vigas de concreto armado para flexão e cisalhamento. Fonte: MOSALLAM (2002).**

A eficácia da aplicação dos compostos avançados na recuperação e reforço de paredes em alvenaria também foi demonstrada, em um prédio de cinco andares, em escala real, Figura 2.18, construído com alvenaria armada e ensaiado sob carregamento sísmico simulado, WEEKS et al. (1994).



**FIGURA 2.18 – Reforço efetuado no pavimento térreo, no edifício de 5 pavimentos. Fonte: SEIBLE et al. (1994).**

O projeto do reparo, segundo DEN EINDE et al. (2003) contribuiu significativamente para o aumento da ductilidade do sistema, praticamente dobrando a capacidade de deformação inelástica, medida na direção do carregamento.

Na literatura podem ainda ser encontrados trabalhos de pesquisadores direcionados à aplicação do PRF em reforços e recuperação de outras estruturas, relacionando-se suas vantagens e técnicas de aplicação. Algumas destas intervenções estruturais são: o reforço de tanques de concreto e aço para líquidos, reforço de chaminés, reforço de paredes [COMMITTEE ACI 440 (1996)]; lajes de concreto [SHEIKH (2002), TENG et al. (2001), MOSALLAM et al. (2001)]; pilares de concreto [MIRMIRAN et al. (1998), SANTAROSA et al. (2002)]; vigas de concreto [CHEN e TENG (2003), TRIANTAFILLOU e ANTONOPOULOS (2000), CURCIO e CASTRO (2002)]; reforço de tubos de concreto e aço, [SEIBLE e KARBHARI (1998)]; reforço de vigas e pilares de madeira maciça e madeira laminada colada



[TINGLEY (2001), FIORELLI e DIAS (2002), SANTOS et al. (2002)]; reforço de túneis e reforço de peças de concreto expostas à explosão [MOSALLAM (2002), COMMITTEE ACI 440R (1996)].

No Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC, alguns trabalhos em reforço externo de estruturas já foram desenvolvidos. O trabalho pioneiro foi do Prof. Carlos Alberto Szücs que, em seu doutoramento na França, reforçou ligações de canto em elementos de Madeira Laminada Colada, com fibras de vidro, SZÜCS (1991). Recentemente MORÉ (2003) apresentou o seu trabalho utilizando reforços em fibras de vidro e resina epóxi nas ligações de treliças de bambu. Ainda, FORTES (2004) defendeu sua tese de doutorado, utilizando fitas de fibra de carbono coladas em vigas de concreto.

### 2.3.2. Reforço Interno para Estruturas de Concreto

Outra possibilidade de utilização dos materiais compostos avançados é na aplicação destes como reforço interno ou armação das estruturas de concreto e alvenaria, sob a forma de barras, telas e cabos para protensão. A forma mais comum são as barras produzidas em fibra de vidro (PRFV) ou carbono (PRFC), Figura 2.19.



**FIGURA 2.19 – Reforços internos em PRF. Fonte: MOSALLAM (2002).**

O COMMITTEE ACI 440 (2001), apud MOSALLAM (2002), estabelece a resistência à tração, o módulo de elasticidade e a deformação na ruptura para as barras comercialmente produzidas. Na América do Sul, a Norma Chilena NCh 2577 (2001) também estabelece as propriedades que devem ser atendidas pelas barras.

No Brasil, CASTRO e CURCIO (1999) apresentaram uma proposta de normalização para barras de PRFV como produto de armação de elementos estruturais em concreto. Na Tabela 2.7 encontram-se esquematizados os valores estabelecidos pelo Committee ACI 440, Norma Chilena e os propostos por Castro e Curcio.



Entre as principais aplicações destacam-se o seu emprego nas situações de ambientes com alto grau de corrosão como, por exemplo, as estruturas marinhas e pontes expostas a ciclos de degelos com sal, Figura 2.20.

**TABELA 2.7 – Propriedades das barras de PRF, segundo o COMMITTEE ACI 440 (2001), a Norma Chilena NCh 2577 (2001) e CASTRO e CURCIO (1999).**

	COMMITTEE ACI 440 (2001)			NCh 2577 (2001)			CASTRO e CURCIO (1999)		
	$f_{tu}$ (MPa)	E (GPa)	$\epsilon_u$ (%)	$f_{tu}$ (MPa)	E (GPa)	$\epsilon_u$ (%)	$f_{tu}$ (MPa)	E (GPa)	$\epsilon_u$ (%)
PRFV	483 a 1600	35 a 51	1,2 a 3,1	520	42	3,5 a 5,0	517 a 1207	41 a 55	1,0
PRFC	600 a 3690	120 a 580	0,5 a 1,7	1100	150	1,0 a 1,5	-	-	-

Listam-se também as instalações em hospitais que servem de abrigo para equipamentos de imagens por ressonância magnética (MRI), onde a transparência eletromagnética dos PRF torna o material ideal para o reforço no concreto armado. Além disso podem ser citadas também as obras de instalações elétricas, em função de sua propriedade de baixa condutividade que contribui para evitar riscos de acidentes e de interferência em ambientes com elevada voltagem, como por exemplo, postes para eletrificação em concreto armado, fundações para elementos estruturais em estações de força, etc.



**FIGURA 2.20 – Reforço interno de um tabuleiro de ponte sujeito a ciclos de degelo com sal. Fonte: MOSALLAM (2002).**

As pesquisas encontradas na literatura têm dado ênfase aos estudos de vigas protendidas com cabos em fibra de carbono, STOLL et al. (2000) e ABDELRAHMAN e RIZKALLA (1999); e os de vigas em concreto reforçadas com barras de fibra de vidro, ALSAYED (1998).

### 2.3.3. Desenvolvimento de Estruturas Novas em PRF

Além dos usos já citados, a aplicação dos compostos na engenharia civil abrange outras possibilidades que podem estar diretamente relacionadas à construção de sistemas estruturais completos para edificações e obras de infra-estrutura como pontes e passarelas. Recentemente foi desenvolvido um novo conceito em sistema estrutural que combina as características principais dos compostos com o concreto. Este sistema utiliza cascas em fibra de carbono preenchidas com concreto para a construção de pilares de pontes, MOSALLAM (2002).

Nos itens a seguir serão relacionadas algumas construções em materiais compostos nos Estados Unidos e na Europa.

#### i) Edificações

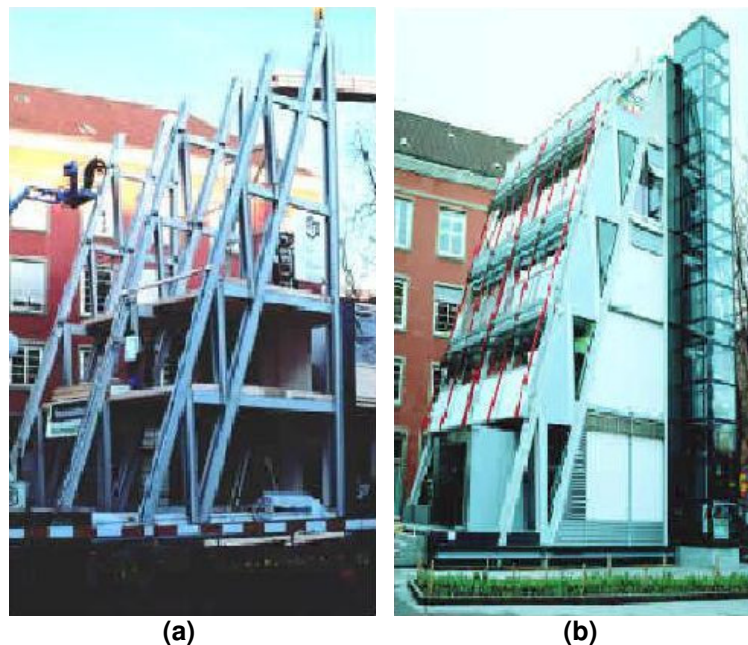
Atualmente vários projetos têm sido elaborados inteiramente utilizando-se os materiais compostos avançados como elementos estruturais principais. Uma destas primeiras aplicações foi a construção de quatro torres no topo do *Sun Bank Building*, em Orlando, Flórida, MOSALLAM (2002). Estas torres, Figura 2.21, possuem o equivalente a três andares de altura e foram inteiramente construídas em perfis pultrudados de PRF, com seções transversais *H*, cantoneiras e barras circulares, ligados entre si por meio de ligações parafusadas. As torres foram construídas para abrigar equipamentos de comunicação.



**FIGURA 2.21 - Torre construída com PRF no *Sun Bank Building*. Fonte: STRONGWELL (2004).**

A escolha do material PRF por parte dos projetistas ocorreu em função da transparência eletromagnética, MOSALLAM (2002), propriedade esta inerente aos materiais compostos avançados. Esta propriedade propicia a utilização dos compostos avançados em instalações que apresentam equipamentos nos quais as instrumentações sejam sensíveis à interferência eletromagnética.

Um outro exemplo interessante da aplicação dos compostos na engenharia civil foi a construção do primeiro prédio residencial/comercial com perfis estruturais de PRF. O *Eyecatcher Project* foi apresentado no *Swissbau'99 Fair* e, após sua exibição, a construção foi desmontada e levada a sua atual localização na *Münchensteinerstrasse 210*, Basel. O edifício que possui 5 pavimentos e uma altura de 15 m foi construído sobre um terreno de 10x12 m. As colunas apresentam seções compostas por um perfil *H* e dois perfis *U*. Além disso as lajes foram construídas combinando-se dois perfis *U* e quatro placas pultrudadas. Em todas as seções os perfis foram unidos utilizando-se adesivo a base de epóxi de alta resistência e em seguida ligados por parafusos de aço, MOSALLAM (2002). Na Figura 2.22, encontram-se duas vistas do prédio, durante sua construção e após o término da obra.



**FIGURA 2.22 - Edifício em PRF na Suíça: (a) em construção, (b) obra finalizada. Fonte: MOSALLAM (2002).**

Outras construções em PRF podem ser encontradas em BAKIS et al. (2002), que citam o desenvolvimento de sistemas construtivos com perfis pultrudados utilizado em pequenas construções. Os autores relacionam também uma construção de seis pavimentos com 19,4 m de altura, recentemente construída em *Fort Story* na Virgínia com perfis pultrudados de seção transversal *H* de dimensões 250 mm x 250 mm, Figura 2.23.



**FIGURA 2.23 – Edificação para escadas construída em PRF. Fonte: STRONGWELL (2004).**

### **ii) Sistemas de Infra-estrutura: Pontes e Passarelas**

A utilização dos materiais compostos avançados nos sistemas estruturais de pontes e passarelas tem, segundo BAKIS et al. (2002), recebido uma maior atenção nestes últimos anos em função das vantagens do PRF tais como resistência e rigidez por unidade de peso, quando comparadas com o concreto armado e protendido.

Na América do Norte, organizações como *New York State Department of Transportation*, entre outros, tem se dedicado com sucesso à estratégia de recuperação de pequenas pontes utilizando-se das vantagens do PRF, ALAMPALLI et al. (1999).

Em 1997 o *Intermodal Surface Transportation Efficiency Act* (ISTEA) destinou 2,5 bilhões de dólares para o programa norte-americano de recuperação e reforço de pontes rodoviárias; a maioria destes fundos foram gastos na substituição e na recuperação de pontes deterioradas pela corrosão, TANG e PODOLNY (1998).

A deterioração com a idade da infra-estrutura de transporte pode ser explicada por diversas causas. Nos relatórios de avaliação de pontes as deficiências abrangem desde a deterioração dos elementos estruturais causados pelo desgaste natural ou pela ação acelerada em ambientes de atmosfera agressiva até o aumento na demanda de carga de tráfego, além de detalhamentos inadequados realizados durante o projeto e procedimentos de manutenção e recuperação inadequados, SEIBLE e KARBHARI (1998).

Além do aumento na demanda ou da mudança de tráfego, ocorridas nos grandes centros urbanos e algumas estradas, as deficiências comumente encontradas na literatura consistem entre outras, em:

- deterioração de tabuleiros em função do desgaste gerado pelos sais utilizados nos ciclos de gelo/degelo;

- abrasão causada pela água corrente nas infra-estruturas de pontes em leitos de rios;
- corrosão de elementos estruturais metálicos;
- corrosão de armaduras no concreto estrutural, seja em barras de aço ou cabos pós-tensionados;
- problemas de resposta dinâmica sob cargas de ventos fortes;
- envelhecimento dos materiais.

Outro fator que tem contribuído para estas deficiências, segundo MENDES (1999), é a manutenção periódica inadequada ou até insuficiente para as pontes. Na Tabela 2.8 pode ser visto um panorama da situação das pontes nos Estados Unidos, juntamente com as despesas estimadas para sua manutenção e recuperação.

**TABELA 2.8 – Situação Atual das Pontes Americanas<sup>(1)</sup>. Fonte: SEIBLE e KARBHARI (1998).**

<b>Situação das Pontes</b>	<b>Quantidade</b>
Desempenho insatisfatório ainda não recuperadas ou renovadas	199.277 (35 %)
Desempenho estrutural insatisfatório	118.563 (21 %)
Obsoletas quanto à funcionalidade	80.714 (14 %)
Total de pontes	575.583 (100 %)
<b>Custos de Recuperação</b>	<b>(Bilhões de \$)</b>
Custo para eliminar as deficiências atuais	78
Custo médio anual para manter o <i>Status Quo</i>	5,2
Custo médio anual para eliminar deficiências existentes e emergentes	8,2

(1) *The Status of Nation's Highways, Bridges and Transit: Conditions and performance, Federal Highway Administration, Washington, DC, January, 1993.*

Dados mais recentes de 2002 mostram, que de acordo com o *National Bridge Inventory*, aproximadamente 28 % das 591.000 pontes encontram-se com deficiências estruturais ou funcionalmente obsoletas. Além disso, outras estimativas do *US Department of Transportation*, apresentam um custo médio anual apenas para manutenção das condições atuais das pontes norte-americanas por um período de 20 anos (1998-2017) de \$5,8 bilhões e um custo médio anual para melhorar as condições das estruturas em \$10,8 bilhões, valores estes orçados no ano de 1997, AREF et al. (2005).

Os investimentos nas recuperações destas pontes foram de 16,1 bilhões de dólares em sete anos, ao nível de \$20,4 bilhões, em seis anos. Um levantamento da *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, publicado no ano de 2001, estimou um custo de \$87,3 bilhões para eliminar todas as deficiências estruturais existentes nos dias de hoje, NYSTROM et al. (2003).

Estes números demonstram a necessidade do desenvolvimento de novas técnicas de construção e sistemas de recuperação e reforço de elementos estruturais. A substituição dos tabuleiros de pontes, de acordo com BAKIS et al. (2002), nos projetos de recuperação e reforço, apresenta-se como a oportunidade para a redução do peso próprio das estruturas possibilitando desta maneira, o aumento da carga acidental da construção. Os tabuleiros construídos em PRF têm-se demonstrado nestes últimos anos como uma alternativa ideal para este problema, além da imensa economia no tempo de construção e interrupção do trânsito, MOSALLAM (2002).

Desta maneira os problemas levantados anteriormente têm impulsionado projetistas e construtores a direcionarem-se à escolha dos materiais compostos avançados. ZUREICK (2001) explica que atualmente os tabuleiros de pontes para tráfego de veículos construídos a partir de módulos de PRF tem sido o objeto de interesse por parte da comunidade de engenharia estrutural em consequência das grandes vantagens destes tipos de tabuleiro:

- baixo peso próprio (menos que 1/3 do peso de um tabuleiro em concreto);
- resistência à corrosão;
- bom desempenho à fadiga;
- rapidez de montagem, a qual irá reduzir amplamente os custos de construção e interrupção do tráfego.

Como será visto a partir deste momento, não apenas tabuleiros têm sido construídos em materiais compostos avançados, mas também toda a estrutura. Os exemplos apresentados a seguir mostram pontes e passarelas construídos em PRF nos Estados Unidos da América e em países Europeus.

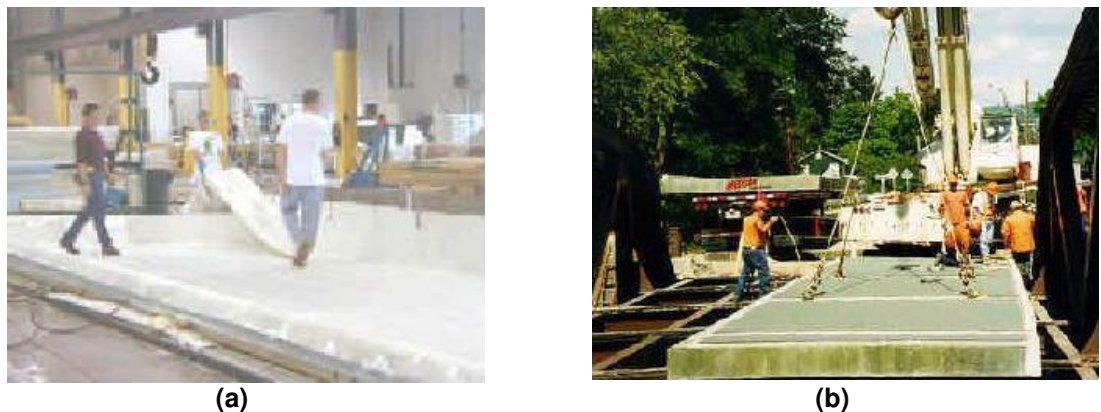
A primeira passarela em materiais compostos foi construída pelos Israelenses em 1975, TANG e PODOLNY (1998). Desde então outras estruturas foram construídas na Ásia, Europa e Estados Unidos da América.

Muitas destas passarelas foram construídas nos EUA utilizando-se perfis pultrudados. A leveza do material e a facilidade de fabricação e instalação destas estruturas possibilitou a sua construção em áreas de difícil acesso ou ambientalmente restritas sem o emprego de equipamentos pesados. Algumas destas passarelas foram transportadas até seu local de instalação por helicópteros, outras foram desmontadas e transportadas por mulas para serem montadas no momento da instalação. A partir do conhecimento adquirido nos projetos destas passarelas, muitos pesquisadores partiram para o passo seguinte, o projeto de pontes veiculares com compostos.



A primeira ponte toda em PRF construída nos Estados Unidos da América foi instalada no dia 4 de dezembro de 1996, em Russell, Kansas. Os elementos estruturais desta ponte foram fabricados por laminação, em construção sanduíche com enchimento celular, fixados com resina epóxi, TANG (1997).

O grande impulso no emprego dos compostos avançados ocorreu nestes últimos anos com o início da utilização de tabuleiros em materiais compostos para substituir os tabuleiros em processo avançado de corrosão no Departamento de Transporte dos Estados Unidos (DOT). Neste contexto, o DOT de Nova York optou em utilizar um tabuleiro de PRF como solução para substituir o antigo tabuleiro da *Chemung Country Bridge*. Esta ponte treliçada em aço foi construída em 1940 e possui 42,7 m de comprimento e 7,32 m de largura. A média diária de tráfego é de 3250 veículos, no qual 7 % são caminhões, MOSALLAM (2002). Estes dados demonstram a viabilidade do uso do material PRF mesmo em pontes que apresentam tráfego intenso de veículos. Na Figura 2.24 pode ser vista a construção e a instalação do tabuleiro.



**FIGURA 2.24 - (a) fabricação e (b) instalação do tabuleiro da *ponte Chemung Country Bridge*, em Nova York. Fonte: MOSALLAM (2002).**

Nos Estados Unidos, a *Antioch Composite Pedestrian Bridge* demonstra o interesse daquele País com o incentivo a projetos de passarelas em compostos plásticos, Figura 2.25. A passarela localizada no Clube de Golfe do município de Antioch, Illinois, possui 11,43 m de comprimento e 2,54 m de largura e foi construída com perfis pultrudados em fibra de vidro e resina viniléster. As vigas principais foram projetadas em seção *I* a partir da composição de perfis *C*. Um dos objetivos do programa de pesquisa foi o monitoramento da estrutura para verificação do comportamento a longa duração do PRF, exposto a condições ambientais naturais. A passarela é visitada no mínimo uma vez no mês para as leituras de deformação e deflexões.



**FIGURA 2.25 – Passarela *Antioch Composite Pedestrian Bridge*, localizada em Antioch, Illinois. Fonte: JOHANSEN (2003).**

Em Chicago, as lajes das duas passarelas em aço da *LaSalle Street Bridge* foram substituídas por painéis modulares pultrudados de PRFV, Figura 2.26. De acordo com o Departamento de Transportes de Chicago, um dos objetivos do projeto foi difundir o conhecimento à comunidade de engenharia Civil dos materiais compostos avançados e aumentar seu uso nas aplicações de infra-estrutura. Além disso, a elevada manutenção da ponte em função da corrosão causada pelo degelo dos sais, frequentemente utilizado no inverno, foi um dos objetivos principais para a utilização dos materiais compostos. Outra meta do projeto foi reunir dados dos efeitos da ação do tráfego intenso de pedestres, do inverno intenso, da água, dos ciclos inverno/verão, dos ciclos de degelo e da exposição ultravioleta na estrutura em composto, com o intuito de verificar a aplicabilidade deste novo material nos reparos e recuperação de outras estruturas similares.

Alguns meses após sua recuperação uma visita à ponte mostrou que oito perfis de aço instalados no mesmo período dos perfis de PRFV já se encontravam em processo de corrosão, enquanto que as seções constituídas de materiais compostos avançados não demonstravam sinais de degradação. O Departamento de Transportes de Chicago acredita que os PRFV podem ser usados em estruturas de pontes e passarelas para reduzir os efeitos da corrosão, reforçar componentes degradados e para reduzir custos de montagem e manutenção.



**FIGURA 2.26 – Recuperação da *LaSalle Street Bridge*, sobre o Rio Chicago, na cidade de Chicago, Illinois. Fonte: MILKOVICH (2003).**



Em maio de 1997, foi instalada a *Laurel Lick Bridge* em Ohio, uma ponte totalmente projetada em compostos avançados. Além do tabuleiro as vigas longarinas, as estacas e os pilares foram projetados em PRF, Figura 2.27.



**FIGURA 2.27 – Instalação da ponte em composto sobre o rio *Laurel Lick*. Fonte: OWENS CORNING (2003).**

A alta relação resistência/peso foi obtida por meio do uso de uma seção transversal otimizada e pelo direcionamento da orientação das fibras no composto, de forma a obter o melhor desempenho. Com isso conseguiu-se alcançar um tabuleiro com seis a sete vezes mais capacidade de carga, em comparação com um de concreto, com apenas 20 % do seu peso, OWENS CORNING (2003). Além disso, a alta relação resistência/peso das estruturas em compostos permitem a redução dos custos relacionados com o uso de equipamentos pesados na fase de instalação.

Os módulos projetados em materiais compostos são em geral pré-fabricados e em função de sua leveza trazem economia imediata nos custos ao minimizar as interrupções no trânsito. A instalação de elementos estruturais modulares em PRF pode ser realizada em questão de horas, ao invés de tabuleiros de pontes em materiais convencionais que levam dias ou semanas para serem instalados. A instalação da ponte em *Laurel Lick*, por exemplo, levou apenas cinco horas e meia, OWENS CORNING (2003).

Também no ano de 1997, foi instalada no município de *Taylor Country, West Virginia*, outra ponte utilizando-se os mesmos módulos para tabuleiros em PRF. A ponte possui 9,14 m de comprimento e 6,60 m de largura; as vigas foram projetadas em aço e as fundações em concreto, Figura 2.28.



**FIGURA 2.28 – Instalação da ponte em composto sobre o rio *Wickwire run*. Fonte: CREATIVE PULTRUSIONS (2003a).**

Recentemente foi construída a *Popolopen Creek Footbridge*, em Fort Montgomery, Nova York. A passarela de 102,41 m de comprimento e 3,35 m de largura foi projetada com cabos estaiados e treliças em perfis pultrudados retangulares de seção 200x100x10 mm e tabuleiro em placas de aço, Figura 2.29.



**FIGURA 2.29 – Panorama da passarela *Popolopen Creek Footbridge*, em Nova York. Fonte: CREATIVE PULTRUSIONS (2003a).**

A Universidade do Missouri – Rolla (UMR) projetou e construiu uma ponte toda em compostos. A ponte que utiliza tubos retangulares pultrudados de 76,2 mm de seção em fibras de vidro e carbono possui 9,14 m de comprimento e 2,90 m de largura. A instalação da ponte, em 29 de julho de 2000, no campus da UMR levou menos de duas horas, Figura 2.30. A ponte possui sensores de fibras óticas que permitem seu monitoramento a distância por computador, UNSER et al. (2000). O programa experimental, a instrumentação e os resultados dos ensaios podem ser encontrados em KUMAR et al. (2004).



**FIGURA 2.30 – Panorama da ponte instalada na UMR. Fonte: UNSER et al. (2000).**

No estado americano de Missouri foi instalada em novembro de 2000, em uma área residencial, a *St. Francis Street Bridge*, no município de *St. James*. A Figura 2.31 mostra a realização do ensaio da carga de serviço (Classe AASHTO HS20), que demonstrou resultados satisfatórios no desempenho às deflexões, NYSTROM et al. (2003). A ponte possui aproximadamente 8,0 m de comprimento e 8,33 m de largura, construída em quatro painéis sanduíche, de 600 mm de espessura, com as faces externas e o material de enchimento do painel fabricados em fibra de vidro. O tabuleiro de PRF foi coberto com uma camada de 9,5 mm de concreto polimérico.



**FIGURA 2.31 – *St. Francis Street Bridge*, instalada no Missouri. Fonte: NYSTROM et al. (2003).**

No campus da Universidade da Califórnia, em *San Diego* (UCSD), também foi construída uma passarela/ciclovía em materiais compostos. O projeto, do professor Frieder Seible, utiliza cabos de estais em aço, tabuleiro misto em painéis de PRFV, recoberto com uma capa de concreto com adição de fibras curtas de polipropileno. As vigas longarinas e o pilar são de seção tubular em fibra de carbono, preenchidos com concreto, Figuras 2.32.





**FIGURA 2.32 – Passarela construída no campus da UCSD.**

Na Europa, várias passarelas e pontes utilizando exclusivamente materiais compostos na sua estrutura foram projetadas e construídas, conforme mostrado a seguir.

A *Bonds Mill Lift*, localizada em *Stonehouse*, na Inglaterra, foi possivelmente a primeira ponte construída em PRF para o tráfego de veículos. Esta ponte, apresentada na Figura 2.33, que atravessa um pequeno canal, possui a particularidade de ser elevada em uma das extremidades quando da passagem de embarcações, KANSAS STRUCTURAL COMPOSITES (2004).



**FIGURA 2.33 – Ponte de *Bonds Mill Lift*, localizada na Inglaterra. Fonte: KANSAS STRUCTURAL COMPOSITES (2004).**

A maior passarela construída com perfis pultrudados, Figura 2.34, possui 2 m de largura, 114 m de comprimento total e vão livre principal de 63 m: a *Aberfeldy Footbridge*, construída em 1992, encontra-se na cidade de Aberfeldy, Escócia e foi projetada em cabos estaiados, BAKIS et al. (2002).



**FIGURA 2.34 - Passarela *Aberteldy Bridge*, na Escócia. Fonte: KANSAS STRUCTURAL COMPOSITES (2004).**

Outra aplicação na Europa foi uma passarela construída em *Kolding*, na Dinamarca. Projetada também em cabos estaiados e perfis pultrudados de PRFV, esta passarela foi construída atravessando uma via férrea, Figura 2.35.

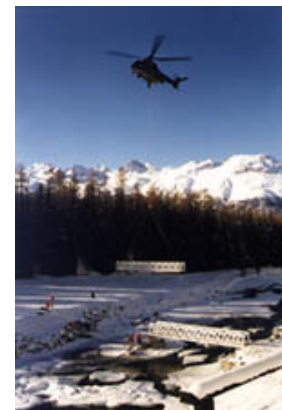
A passarela, que mede 40 m de comprimento e 3 m de largura, foi projetada para suportar cargas de até 5 kN/m<sup>2</sup> e permite, também, a passagem de motocicletas e veículos de remoção de neve que chegam a pesar até 50 kN. Esta capacidade de carga foi alcançada em função da redução do peso próprio do tabuleiro da passarela que pesa somente 120 kN. Uma estimativa dos projetistas mostrou que em aço esta mesma estrutura pesaria 280 kN e em concreto 900 kN, OWENS CORNING (2003).

Embora os trabalhos de construção estivessem restritos a algumas poucas horas, durante a noite nos finais de semana em função do grande movimento de trens na linha, a passarela foi totalmente instalada em apenas três noites. Salienta-se aqui mais uma vez que a facilidade e a rapidez no tempo de instalação são vantagens principais deste material. Além disso, com a elevada durabilidade dos compostos, espera-se para os próximos 50 anos que a passarela venha a sofrer apenas manutenção estética e proteção de ultravioleta.



**FIGURA 2.35 - Passarela com cabos estaiados em PRF na Dinamarca. Fonte: FIBERLINE (2003).**

Em Pontresina, na Suíça, foram instaladas duas pontes, cada uma medindo 12,5 m de comprimento e com peso total de 25 kN. O peso próprio reduzido permitiu que as pontes fossem transportadas de helicóptero, já montadas, até o local de instalação. A capacidade de carga destas pontes é de 5 kN/m<sup>2</sup>, permitindo a passagem de veículos de até 10 kN; a deflexão máxima está limitada a L/800, Figuras 2.36.



**FIGURA 2.36 – Instalação da ponte em PRF sobre o *Flaz River* em 1997. Fonte: FIBERLINE (2003).**

Na Alemanha, entre as cidades de Sedlitz e Senftenberg, foi construída em setembro de 2000 uma passarela em PRF. A estrutura, mostrada na Figura 2.37, apresenta 20,12 m de comprimento e 2,42 m de largura. O tabuleiro é constituído de módulos de PRF, as laterais treliçadas são compostas de perfis pultrudados de seção retangular de 200x100x10 mm.





**FIGURA 2.37 – Passarela na Alemanha em PRF. Fonte: CREATIVE PULTRUSIONS (2003a).**

Em outubro de 2001, foi instalada em Lleida, na Espanha, uma passarela totalmente construída com perfis pultrudados de PRFV. A passarela vista na Figura 2.38, possui 38 m de comprimento e 3 m de largura.



**FIGURA 2.38 – Passarela em fibra de vidro construída na Espanha. Fonte: FIBERLINE (2003).**

O período compreendido entre a fase do projeto e a sua completa instalação foi de apenas cinco meses. Além disso, um dos motivos que levou à utilização do PRFV foi o fato deste material ter uma baixíssima condutividade de eletricidade. Fato este, relevante na escolha do material, pois a passarela atravessa uma linha de trem movido à eletricidade.

A construção desta passarela reforça novamente as vantagens do material PRF de rapidez de produção, facilidade de manuseio e montagem da estrutura e da baixa condutividade elétrica.

Na rodovia federal B106, nas proximidades da cidade de *Schwerin*, na Alemanha, foi aberta ao tráfego em novembro de 2003 uma passarela/cilcovia em PRFV. A estrutura, apresentada nas Figuras 2.39 possui 45,0 m de comprimento e 3,0 m de largura. O tabuleiro é constituído de módulos de PRF de dimensões 40 mm x 50 mm; a estrutura é formada por perfis pultrudados de seção cantoneira, U, I, H, barras retangulares planas e perfis tubulares retangulares.



**FIGURA 2.39 – Passarela Schwerin em fibra de vidro, construída na Alemanha. Fonte: CREATIVE PULTRUSIONS (2003b).**

### **iii) Cascas em Fibra de Carbono Preenchidas com Concreto para Novos Sistemas Estruturais de Pontes**

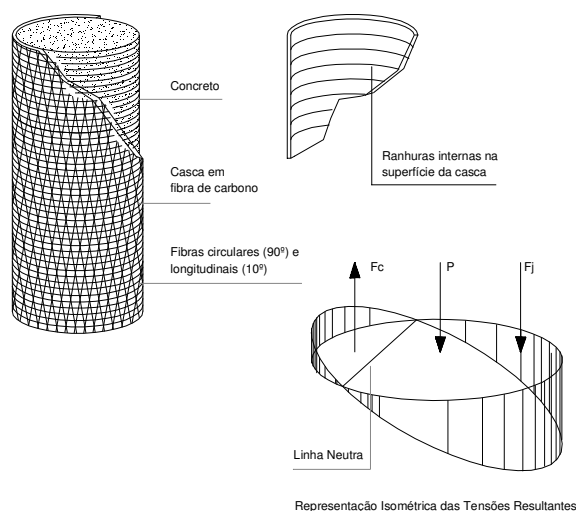
O desenvolvimento de novos conceitos estruturais que combinam as características mecânicas superiores de resistência à tração nos PRF, com as características dominantes de alguns materiais convencionais de construção, tais como a resistência à compressão do concreto, tem demonstrado um grande potencial para o progresso nos projetos de novas estruturas na engenharia civil.

Um destes novos conceitos é a utilização do Sistema de Cascas de Carbono Preenchidas com Concreto (SCC) para pilares e vigas de pontes, onde o uso de tubos ou cascas pré-fabricadas com fibras de carbono tem dupla função, servindo aos propósitos de fôrma e armação, Figura 2.40. O SCC, apresentado em SEIBLE e KARBHARI (1998), tem o objetivo de substituir a armação de aço e as fôrmas oferecendo simultaneamente uma resposta melhor às cargas sísmicas e, sobretudo uma melhor durabilidade global da estrutura, associada a maior velocidade de construção.

A excelente resposta estrutural deste sistema, obtida nos estudos iniciais de BURGUEÑO et al. (1995), conduziu ao desenvolvimento de sistemas de pontes completos baseados no conceito da casca com fibra de carbono preenchida com concreto.

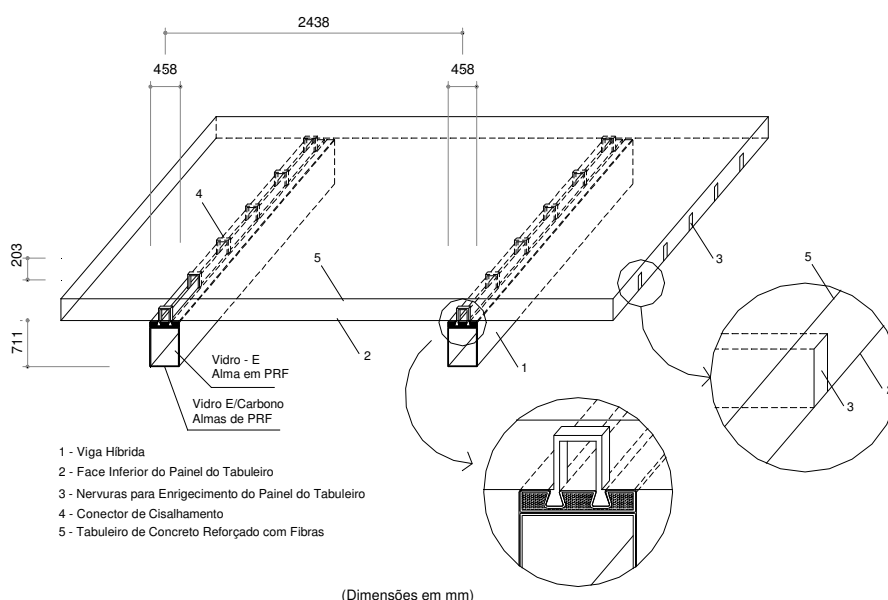
Uma comparação de custos entre o SCC e outros sistemas convencionais para pontes mostrou que a combinação do PRF com o tabuleiro em concreto armado é 15 a 20 % mais caro em comparação com uma ponte convencional com tabuleiro em concreto armado, embora existam vantagens potenciais em termos de leveza, rapidez de instalação e menor custo de manutenção, ZHAO et al. (2001).





**FIGURA 2.40 – Casca de fibra de carbono preenchida com concreto. Fonte: ZHAO et al. (2000).**

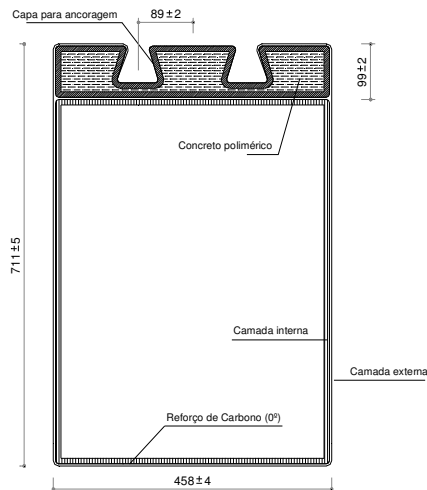
Análises adicionais de custos nos módulos do SCC mostraram uma maior economia com o emprego de sistemas híbridos em PRF. Desta maneira um novo sistema modular foi proposto, o Sistema Modular de Tubos Híbridos (STH), BURGUEÑO et al. (2000). O STH consiste de vigas retangulares pultrudadas híbridas, conectadas ao longo de sua face superior com um tabuleiro de concreto reforçado com fibras curtas de polipropileno, Figura 2.41. As fibras curtas adicionadas ao concreto controlam, segundo os autores, a fissuração por retração plástica.



**FIGURA 2.41 – Sistema modular de tubos híbridos. Fonte: BURGUEÑO et al. (2000).**

No STH a longarina híbrida é constituída por fibras de vidro (tipo E)/carbono, embebidas em resina viniléster, formando uma seção caixão, de acordo com a Figura 2.42. A viga possui

711 mm de altura, 457 mm de largura e uma espessura nominal na alma de 19 mm. A geometria da mesa superior é concebida de maneira a fornecer uma zona de ancoragem para os painéis de PRF e conectores de cisalhamento; a altura total da região de ancoragem é de 98 mm, com paredes de 19 mm de espessura; a mesa inferior é reforçada com uma camada de fibra de carbono de 6mm; a espessura nominal da mesa inferior é de 25 mm.



**FIGURA 2.42 – Seção transversal da viga híbrida. Fonte: ZHAO et al. (2001).**

Uma das aplicações destes conceitos foi utilizado pelo Caltrans em uma ponte na Califórnia (*State Ro 86*), próximo de *Salton Sea*, a *King Stormwater Channel Bridge*. O projeto da ponte com casca em fibra de carbono preenchida com concreto possui 20,1 m de comprimento, em dois vãos contínuos do tipo viga-laje, com cinco pilares intermediários, Figuras 2.43 e 2.44.

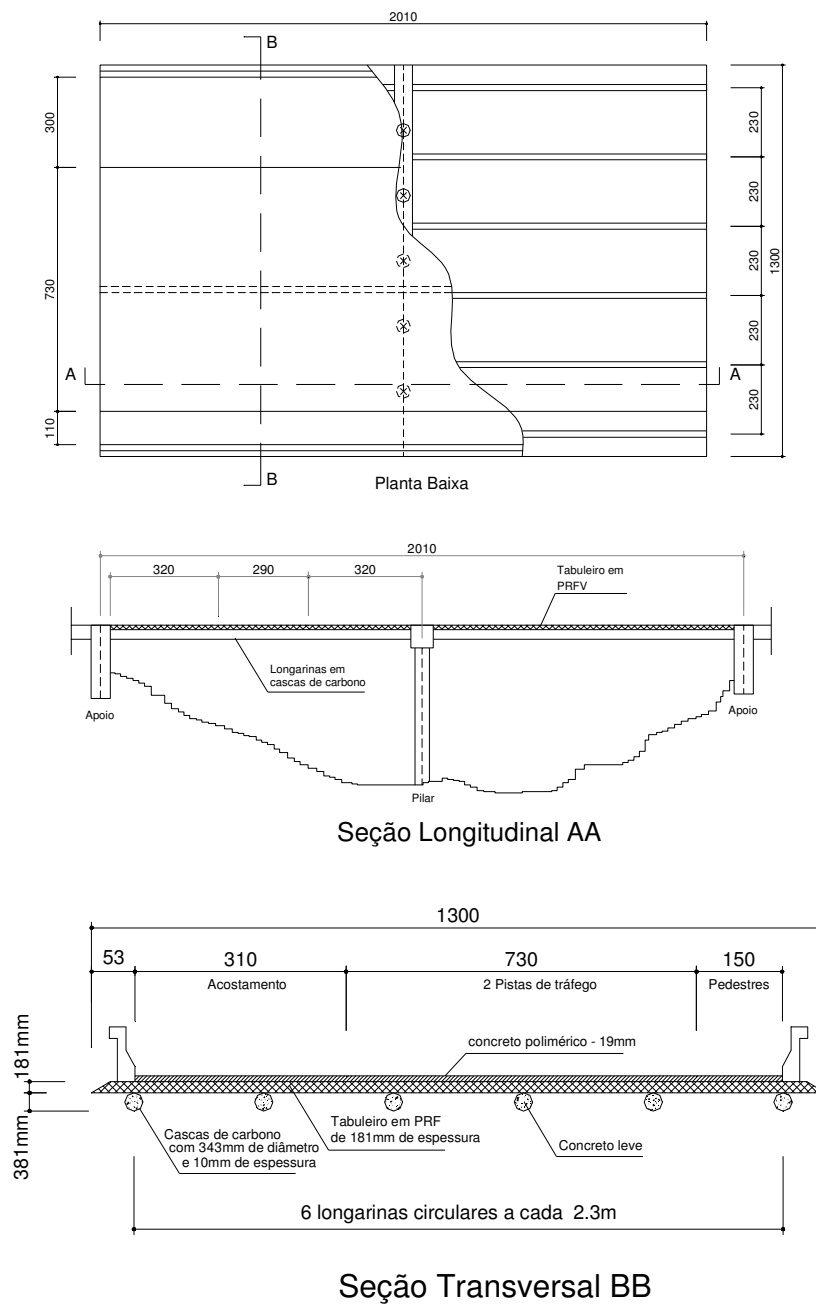
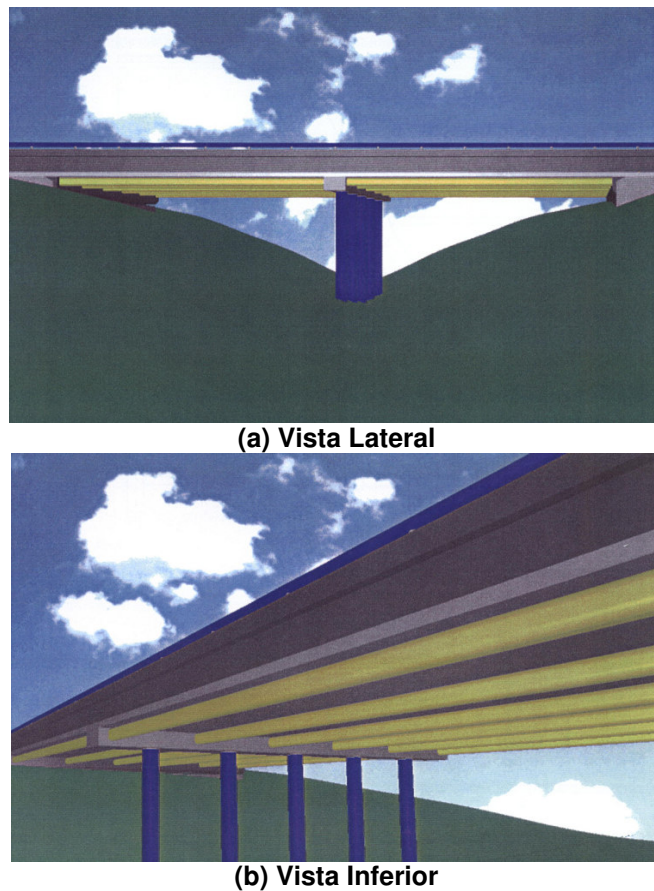
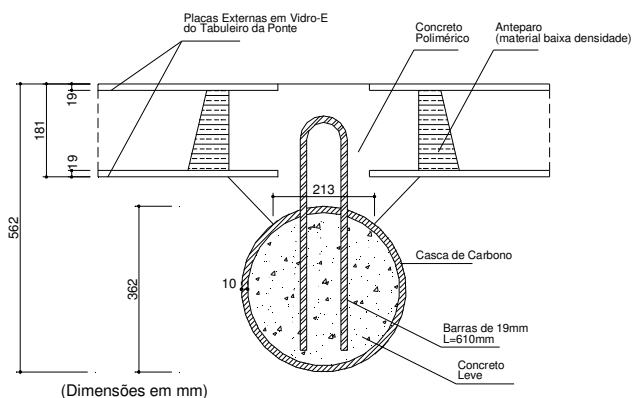


FIGURA 2.43 – Geometria da *King Stormwater Channel Bridge*. Fonte: KARBHARI et al. (2000).



**FIGURA 2.44 – Layout da ponte *King Stormwater Channel Bridge*. Fonte: ZHAO et al. (2001).**

Nestas figuras pode ser visto que a ponte consiste de tubos (cascas) em fibra de carbono preenchidos com concreto, como vigas longitudinais, que são conectadas em sua face superior à laje do tabuleiro da ponte. Este tabuleiro foi projetado em fibra de vidro do tipo E, na forma de painéis pultrudados com seções trapezoidais. As conexões longitudinais das longarinas com o tabuleiro de PRFV foram realizadas por meio de reforços convencionais, Figura 2.45.



**FIGURA 2.45 – Detalhe da conexão das vigas longarinas com o tabuleiro de PRFV. Fonte: ZHAO et al. (2001).**

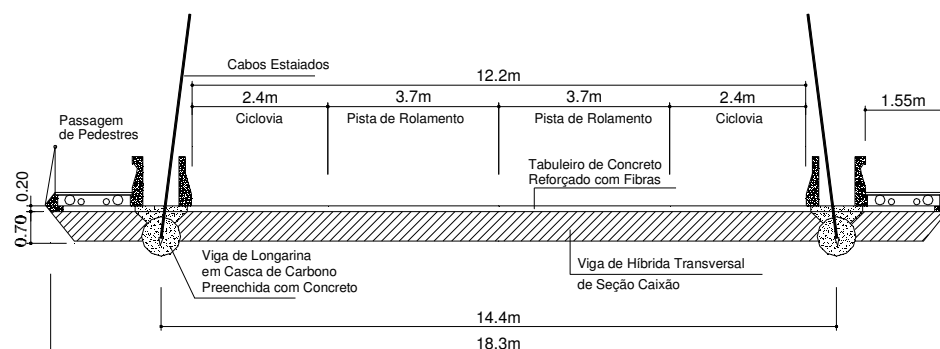
Pode-se citar também como outro exemplo o projeto de pesquisa do viaduto, I-5/Gilman, que atravessa a *Interstate 5* e liga a *Gilman Drive* ao campus da *University of California, San Diego (UCSD)*, na Califórnia, BURGUEÑO et al. (2000) e ZHAO et al. (2001), todo em estrutura mista concreto/PRF, que está em andamento na UCSD. Este é um projeto demonstrativo em que todo o viaduto será instrumentado e monitorado durante pelo menos 5 anos.

O I-5/Gilman é um viaduto de 137,2 m de comprimento, apoiado em cabos estaiados por um pórtico de 57,9 m de altura, em formato de “A”, conforme apresentado na Figura 2.46. A superestrutura possui uma largura total de 18,3 m e ~1,45 m de altura. A ponte foi projetada para acomodar duas pistas para carregamento rodoviário da *AASHTO*, tipo HS-20, duas ciclovias, duas vias para pedestres de 1,52 m de largura.



**FIGURA 2.46 – Desenho esquemático do viaduto estaiado I-5/Gilman em materiais compostos avançados. Fonte: BURGUEÑO et al. (2000).**

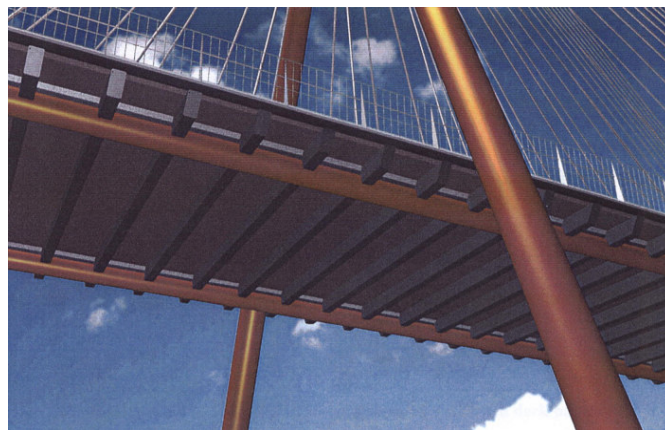
A concepção estrutural do projeto consiste de dois planos de cabos estaiados, espaçados de 4,9 m, apoiando tubos de carbono/epóxi, preenchidos com concreto, ligados na direção transversal por vigas híbridas em seção caixão, constituídas em PRF com reforços de fibra de vidro e carbono, espaçadas a cada 2,4 m, que tem finalidade também de apoiar o tabuleiro em concreto reforçado com fibras curtas de polipropileno.



**FIGURA 2.47 – Seção transversal da superestrutura do I-5/Gilman. Fonte: ZHAO et al. (2001).**

A superestrutura, apresentada na Figura 2.47, consiste de duas vigas longitudinais de concreto/carbono/epóxi, de 13,7 m de comprimento, ligadas na direção transversal à vigas híbridas de vidro/carbono, que apóiam o tabuleiro. Estas vigas longitudinais são compostas de tubos circulares de 91 cm de diâmetro interno e espessura de 10 mm. Estes tubos são completamente preenchidos com concreto convencional, com os objetivos de: (1) estabilizar a casca de carbono/epóxi; (2) possibilitar a casca resistir aos esforços de compressão dos estais e (3) fornecer a ancoragem para os cabos dos estais.

Os pilares em formato de “A” possuem aproximadamente 57,9 m de altura, 1,52 m de diâmetro e 13 mm de espessura e foram escolhidos em função da estética, economia e considerações de engenharia, ZHAO et al. (2001). Os painéis do tabuleiro, mostrado na Figura 2.48, possuem as funções de fôrma para o concreto da laje e de reforço à flexão, com reforços unidirecionais de fibra de carbono.



**FIGURA 2.48 – Ilustração dos elementos estruturais do viaduto I-5/Gilman. Fonte: ZHAO et al. (2001).**

#### **iv) Outras Aplicações dos Compostos Avançados**

Além das aplicações citadas anteriormente, BAKIS et al. (2002) relatam que perfis estruturais em PRF tem sido desenvolvidos para as mais diversas finalidades, como torres de transmissão de energia, suportes para luminárias em estradas e guarda-corpos. Na Itália, por exemplo, CASTIGLIONI e IMBIMBO (1999) têm desenvolvido pesquisas para a utilização de materiais compostos avançados em fibra de vidro para postes de transmissão de energia elétrica.

Na literatura ainda podem ser encontradas outras possibilidades de utilização dos PRF. São exemplos as obras situadas próximas a ambientes marinhos, como as estruturas offshore (plataformas de exploração de petróleo).

Um exemplo desta aplicação é o píer de *Noordland Harbour*, em Dutch, província de Zeeland, Figura 2.49. Neste projeto a resistência às intempéries apresentava alta prioridade e



foi um dos fatores decisivos na seleção do material construtivo. O píer possui 13,5 m de comprimento e 1,5 m de largura e foi produzido em fibra de vidro, apresentando um peso total de 16,50 kN e capacidade de carga 4 kN/m<sup>2</sup>, suportando cargas de vento e neve com deflexão máxima de L/250.



**FIGURA 2.49 – Píer de Noorfland Harbour, na província de Zeeland. Fonte: FIBERLINE (2003).**

Recentemente foi também construído na Suíça um píer com 56 m de comprimento, projetado em fibras de vidro/carbono. Na Figura 2.50 é mostrado um panorama do píer, já instalado, que substituiu o anterior construído com estrutura em aço e plataforma em madeira.



**FIGURA 2.50 – Píer em Zurique, na Suíça. Fonte: FIBERLINE (2003).**

Uma asa suspensa de avião: este é o panorama da cobertura da nova plataforma de embarque/desembarque da estação de *Lindevang*, em Copenhague. Inaugurada em fevereiro de 2003, a cobertura construída em fibra de vidro apresenta 60 m de comprimento, 7,5 m de largura e 0,60 m de espessura. A cobertura, ilustrada na Figura 2.51, é suspensa por cabos fixados a dois pilares nas extremidades da construção, ligados entre si também por cabos, do mesmo modo de uma ponte suspensa.



**FIGURA 2.51 – Estação de Lindevang em Copenhagen. Fonte: FIBERLINE (2003).**

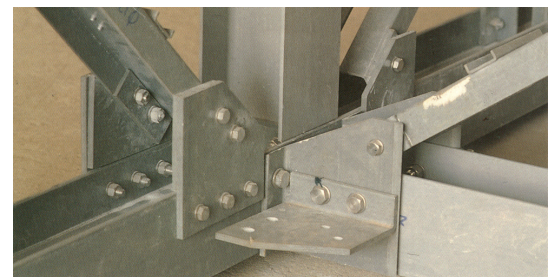
Os compostos pultrudados foram também utilizados no projeto de *containers* para transporte de mercadorias, BAKIS et al. (2002). Este estudo encontra-se no trabalho de BANK et al. (2000), que descreve as etapas de construção e os detalhes construtivos de um sistema de *container* flutuante, utilizado para movimentação de materiais do navio para a costa. As unidades foram projetadas com dimensões de 12,2 m de comprimento, 2,4 m de largura e aproximadamente 2,4 m de altura, compatíveis com as dimensões da *International Standards Organization* (ISO) para *containers* de navios. Os ensaios de flexão nos containers e a análise numérica por meio do Método dos Elementos Finitos estão descritos em SMITH et al. (2000).

No Brasil, algumas estruturas utilizando perfis pultrudados de PRFV, também foram projetadas. Uma seleção destas estruturas estão apresentadas a seguir.

Na Figura 2.52 pode ser visto um posto de abastecimento de combustível, localizado na cidade de Salvador, Bahia. A proximidade do posto com o mar exigia um custo de manutenção elevado por parte do proprietário em função da corrosão da estrutura metálica. A solução adotada foi a construção de uma estrutura em PRFV.



(a)



(b)

**Figura 2.52 – (a) Panorama do posto de abastecimento de combustível; (b) detalhe construtivo de um dos nós da estrutura do posto. Fonte: EUZÉBIO (2004).**



Outra obra em materiais compostos foi um pavilhão de 16 m x 20 m, destinado ao armazenamento de defensivos agrícolas, Figura 2.53. Na cidade de Adrianópolis, no Rio de Janeiro, encontra-se o maior laboratório de energia elétrica da América Latina – Eletrobrás, Figura 2.53.



**(a)** **(b)**  
Figura 2.53 – (a) Panorama do pavilhão destinado à armazenagem de defensivos agrícolas; (b) detalhe da montagem do pavilhão. Fonte: EUZÉBIO (2004).

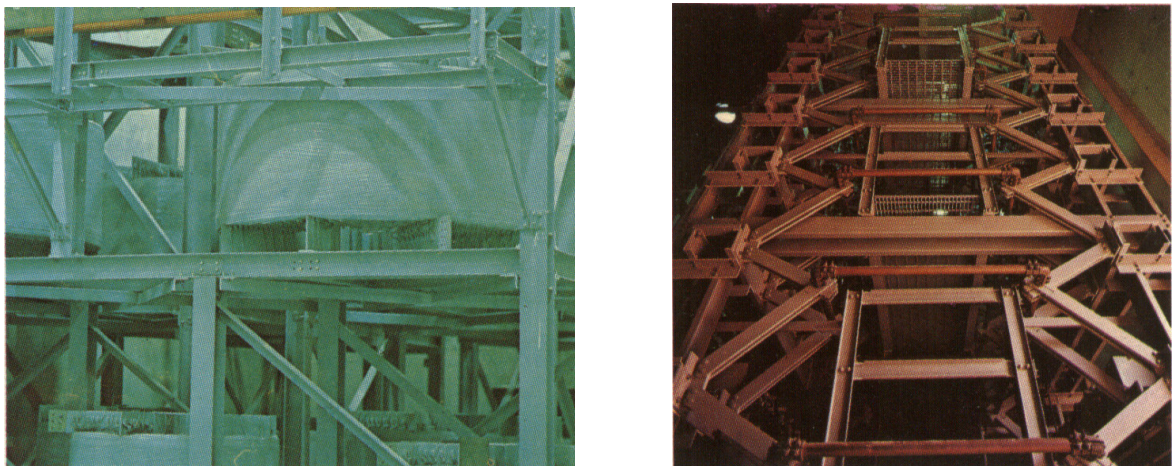
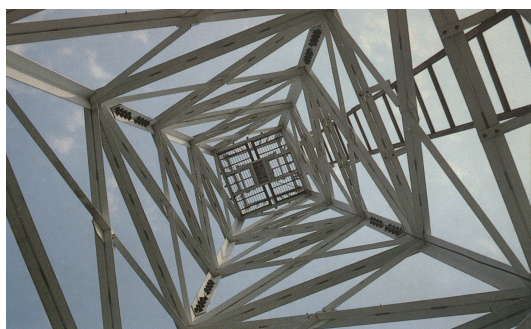


Figura 2.54 – Detalhe do laboratório de energia elétrica da Eletrobrás. Fonte: EUZÉBIO (2004).

A Marinha do Brasil solicitou um projeto em PRFV para utilização nas torres de sinalizadores luminosos (faróis), instaladas nas proximidades do mar, Figura 2.55. A substituição do aço nas torres pelo PRF ocorreu em função da necessidade de redução nos custos de manutenção, ocasionada pela corrosão da estrutura.



(a)



(b)

**Figura 2.55 – (a) Panorama interno e; (b) vista geral da torre de sinalização da Marinha do Brasil. Fonte: EUZÉBIO (2004).**

#### **2.4. Bibliografia Consultada Ligada Diretamente ao Tema da Pesquisa**

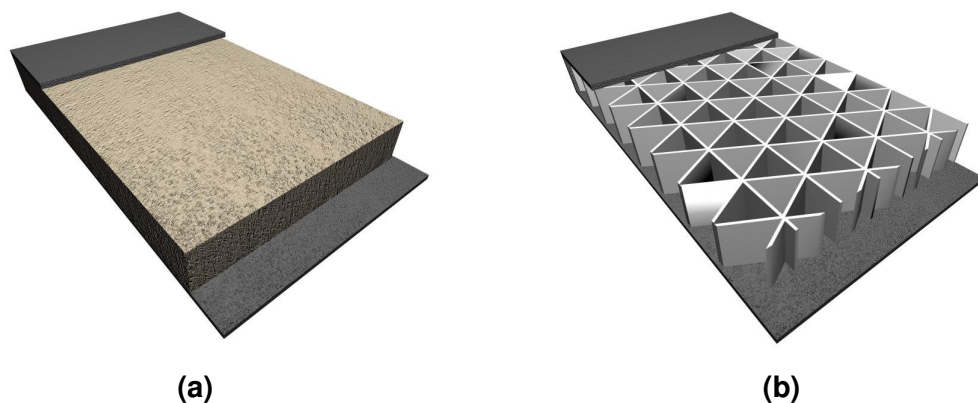
As vantagens relacionadas nos itens anteriores impulsionaram o uso dos PRF nas estruturas de pontes e passarelas. O primeiro projeto de uma passarela em PRF foi concebido em 1974, e construído na cidade de Tel Aviv, Israel, em 1975. A estrutura possui um comprimento de 24,4 m e apresenta um tabuleiro em aço, apoiado em duas treliças de PRF, SOTIROPOULOS et al. (1994).

Outros projetos com materiais compostos avançados datam da década de 80, MEYER (1992). Estas foram construídas nos Estados Unidos, McCORMICK (1985); Bulgária, HEAD (1988); Reino Unido, HOLLAWAY (2003) e China, BRUCE (1989).

A primeira ponte projetada com materiais plásticos foi construída em Nova York antes de 1971. Esta ponte apresenta fibras de papel reforçando uma matriz polimérica. A estrutura possui 10 m de comprimento, 1,3 m de altura e tem um peso de aproximadamente 300 kN. A ponte é capaz de resistir a passagem de um caminhão de 300 kN. A ponte de Ginzi foi construída em 1982 na Bulgária. A estrutura, de único tramo, é composta por vigas de seção I, constituídas por fibra de vidro. Além desta, outra ponte de PRFV foi construída na China em 1982; a Miyun Bridge possui um vão de 20,5 m e largura total de 9,75 m. A ponte é composta por cinco vigas de seção caixão retangulares, em estrutura sanduíche de enchimento celular, SOTIROPOULOS et al. (1994).

Os levantamentos descritos em BAKIS et al. (2002) relacionam que durante o período de 1980 até 1997 houve pelo menos 32 documentos de projetos de pontes com este material. Destes, 20 comportam o tráfego de veículo, usando composições de concreto com PRF. Nos Estados Unidos foram construídas 7 pontes, na Europa 6, primeiramente na Alemanha e 19 pontes no Japão. Nesta literatura é encontrada uma referência à classificação em dois tipos distintos de tabuleiros em PRF atualmente disponíveis: (1) em painel sanduíche e (2) com perfis pultrudados colados. Uma breve descrição de cada um deste tipo de tabuleiros é apresentada a seguir:

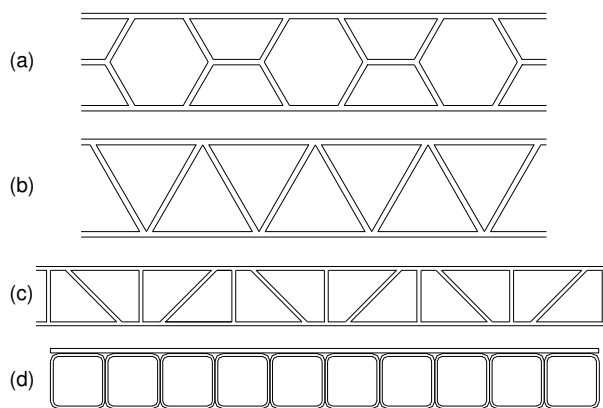
**i) Painel sanduíche:** as estruturas em sanduíche são usadas amplamente na indústria aeroespacial, marinha e indústria automotiva, onde a rigidez e a resistência exigidas devem ser obtidas com o mínimo de peso. Estas estruturas caracterizam-se pela utilização de lâminas rígidas dispostas nas faces externas, que tem como objetivo suportar cargas à flexão. Além disso possuem um material de enchimento colado, de baixa densidade, que separa as lâminas das faces externas e assegura a ação solidária do painel. As lâminas das faces das lajes das pontes são primeiramente compostas de fibras de *vidro (mats e/ou rovings)* embebidas em resinas de poliéster ou viniléster. O material do núcleo pode ser em espuma rígida ou estruturas celulares em PRF de parede fina, como ilustrado na Figura 2.56.



**Figura 2.56 – Exemplo dos tipos de construções sanduíche: (a) material de enchimento sólido; (b) material de enchimento celular. Fonte: BAKIS et al. (2002).**

**ii) Perfis pultrudados colados:** atualmente a maioria dos tabuleiros disponíveis comercialmente são construídos por meio da união de perfis pultrudados colados entre si por adesivos. A flexibilidade do projeto com esse tipo de tabuleiro é obtida em consequência da alteração da constituição interna dos perfis, tais como tipo e orientação das fibras, e em menor extensão pela alteração na seção transversal do perfil. Em função do alto custo dos moldes para pultrusão, as variações nas formas da seção transversal são viáveis em geral apenas para

grandes produções que justifiquem o investimento. Na Figura 2.57, são apresentadas algumas seções de tabuleiros construídos a partir da união de perfis pultrudados.



**Figura 2.57 – Exemplos de tabuleiros para pontes construídos com perfis pultrudados: (a) Superdeck (Creative Pultrusions), (b) EZSpan (Atlantic Research), (c) DuraSpan (Martin Marietta Materials), (d) Square tube and plate deck (Strongwell). Fonte: BAKIS et al. (2002).**

Nos sistemas utilizando estruturas em sanduíche ou com perfis pultrudados colados, a massa por unidade de área segundo dados das principais empresas de pultrusão encontra-se em torno de  $98 \text{ kg/m}^2$ . Em termos de custos, para uma laje de PRF esta quantidade representa valores próximos a US  $\$700/\text{m}^2$ , o qual corresponde a US  $\$7/\text{kg}$  de material. Este custo é maior do que os US  $\$322/\text{m}^2$  tipicamente cotados para a construção de pontes ou a substituição dos tabuleiros com materiais convencionais, LOPEZ (2001) apud BAKIS et al. (2002).

Contudo, este alto custo inicial dos tabuleiros em PRF pode ser absorvido para determinadas situações, particularmente quando uma reconstrução com um tabuleiro de material mais leve torne-se necessária. Além disso, deve ser avaliado pelos construtores outras considerações econômicas, tais como o tempo destinado para a construção, a montagem da estrutura e o período destinado à interrupção do tráfego, BAKIS et al. (2002).

Neste mesmo sentido, GANGARAO et al. (1999) concluíram que, embora apresentem um custo inicial mais elevado, o sucesso da aplicação dos tabuleiros de PRF dependerá também dos seguintes fatores:

- sistemas estruturais desenvolvidos exclusivamente para o novo material;
- desenvolvimento de normas e recomendações de projeto para desempenho a curto e longo período;
- desenvolvimento de modernas tecnologias de construção (incluindo colas especiais), adequadas para os tabuleiros leves.



BAKIS et al. (2002) complementam que, embora haja um crescente interesse no futuro dos tabuleiros em PRF em função da viabilidade do material, ainda existem outras questões que devem ser consideradas:

- desenvolvimento de projetos eficientes e a caracterização das ligações painel/painel e a fixação do tabuleiro aos estais (cabos);
- comportamento à fadiga dos painéis e conexões;
- durabilidade sobre ações mecânicas e ambientais combinadas;
- mecanismos de ruptura e resistência última, incluindo modos de flambagem local e global;
- eficiência e durabilidade do revestimento de cobertura (por exemplo: concreto polimérico) e a aplicação de asfalto quente em relação a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) do polímero.

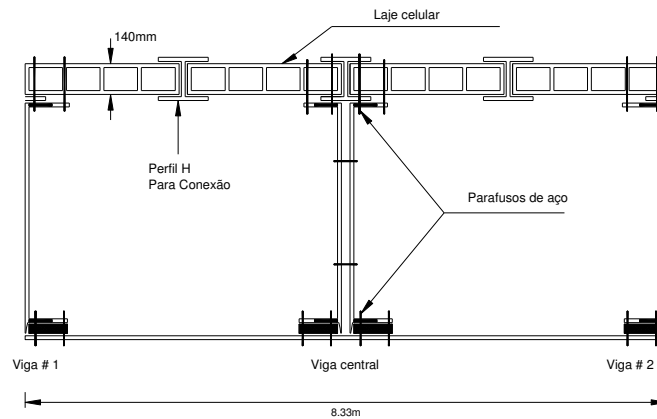
Sem dúvida a aplicação dos materiais compostos avançados na engenharia civil, particularmente nas estruturas de pontes e passarelas, tem recebido uma grande atenção desde a segunda metade da última década. Como pôde ser visto, pontes inteiras em compostos bem como um número expressivo de tabuleiros foram construídos e instalados em muitos países do mundo. De acordo com, GAN et al. (1999) um dos principais atrativos na utilização dos compostos avançados nas estruturas de pontes é a facilidade de instalação do sistema de tabuleiros para construções leves. Para esta finalidade, perfis de paredes finas e estruturas multicelulares devem ser amplamente estudadas e posteriormente empregadas nestes tabuleiros compostos.

A seguir procura-se apresentar, de maneira objetiva e resumida, uma ampla revisão dos principais trabalhos ligados diretamente ao tema desta pesquisa. Esta revisão, apresentada em ordem cronológica é direcionada aos tabuleiros que empregam em seus elementos perfis pultrudados.

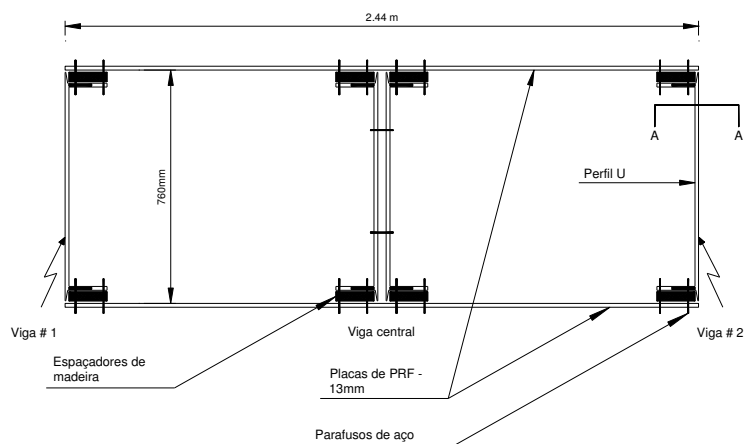
SOTIROPOULOS et al. (1994) avaliaram experimentalmente e teoricamente dois sistemas para superestruturas de pontes e outros dois sistemas de lajes para edificações em PRF. O desempenho estrutural dos componentes de PRF foi investigado por meio de ensaios de flexão a 3 e 4 pontos; na análise teórica foi utilizado a TCL. Os autores ensaiaram um total de 4 corpos-de-prova, para cada sistema, com dimensões em escala real de 2,4 m de largura e 5m de comprimento.

Os componentes utilizados na pesquisa apresentavam seções estruturais comercialmente disponíveis, tais como, vigas de seção  $H$ , placas planas, seções celulares e

perfis *U*. As formas apresentadas nesta figura foram utilizadas para construir os sistemas de lajes para edificações e pontes. Nas Figuras 2.58 e 2.59 podem ser vistas as seções propostas pelos autores para a utilização em tabuleiros de pontes.

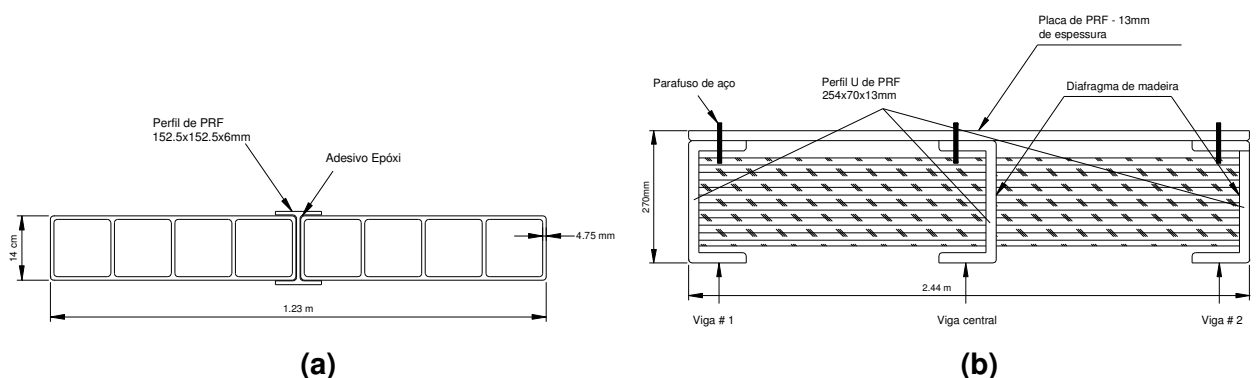


**FIGURA 2.58 – Seção transversal 01 proposta para a utilização em tabuleiros de pontes. Fonte: SOTIROPOULOS et al. (1994).**



**FIGURA 2.59 – Seção transversal 02 proposta para a utilização em tabuleiros de pontes. Fonte: SOTIROPOULOS et al. (1994).**

As seções propostas para a utilização em lajes de edifícios estão apresentadas na Figura 2.60.



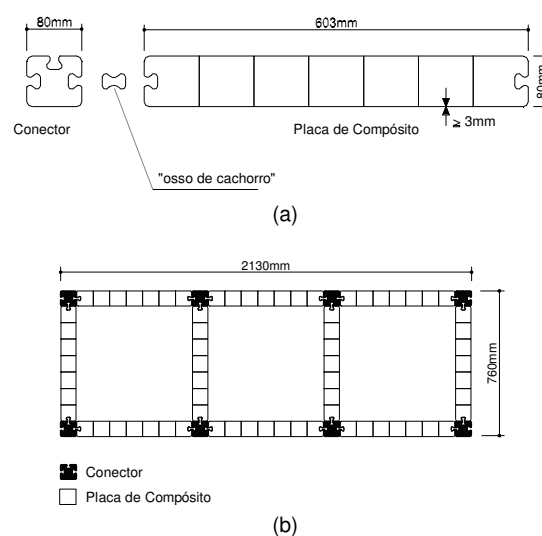
**FIGURA 2.60 – Seções transversais propostas para a utilização em lajes de edifícios. Fonte: SOTIROPOULOS et al. (1994).**

Os autores concluíram que os sistemas para lajes residenciais obtiveram um desempenho satisfatório em termos de rigidez e eficiência estrutural. Por outro lado, a combinação da seção celular com o perfil composto *H*, utilizado para a superestrutura de pontes, pareceu não ser eficiente para a distribuição da força transversal, percebendo-se também uma falta de eficiência da ligação entre os componentes.

LEE et al. (1995) realizaram análises experimentais por meio do ensaio de flexão a quatro pontos em lajes modulares de 11,5 m de comprimento, produzidas pelo processo da pultrusão em fibra de vidro e resina poliéster. Os autores consideram como uma das maiores vantagens da laje a *placa de composto*, que pode ser utilizada para a fabricação de diferentes formas de seções transversais para os mais variados sistemas estruturais, Figura 2.61(a).

Nesta laje tubular a seção é composta pela conexão de 10 (dez) placas unidas por meio de conectores do tipo *osso de cachorro*, dispostos lateralmente em ranhuras longitudinais às placas onde são colados com resina epóxi. As dimensões das placas são 80mm de altura, 12m de comprimento e 603mm de largura. Após a montagem o módulo possui dimensões de 760mmx2130mmx12000mm, Figura 2.61(b).

Em paralelo aos ensaios experimentais, LEE et al. (1995) desenvolveram a modelagem dos módulos pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) utilizando-se elementos do tipo *shell* para comparação com os resultados experimentais, a fim de validar o modelo teórico. As constantes numéricas foram determinadas em ensaios experimentais de corpos-de-prova retirados do material.

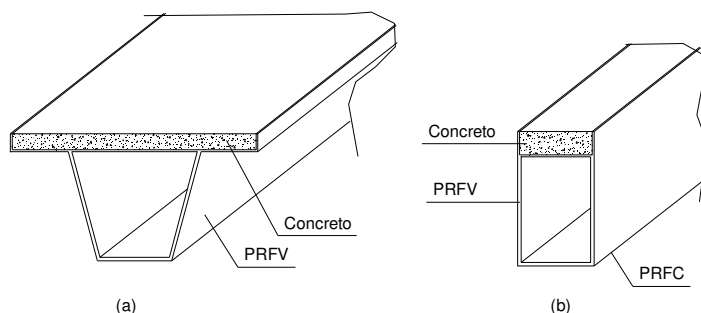


**FIGURA 2.61 – Placa da viga modular e seção transversal da viga. Fonte: LEE et al. (1995).**

Os autores concluíram que algumas vantagens significantes podem ser obtidas pela indústria da construção utilizando-se módulos retangulares para estruturas de tabuleiros de

pontes produzidos com materiais compostos avançados, processados pela técnica da pultrusão.

DESKOVIC et al. (1995a) apresentam o estudo do comportamento na flexão sob carregamento de curta duração de uma viga pultrudada de PRFV combinada com uma camada de concreto disposta na região comprimida, Figura 2.62.



**FIGURA 2.62 – Seções transversais de vigas construídas a partir de PRF combinado com concreto. Fonte: DESKOVIC et al. (1995a).**

A combinação do material PRF com concreto possibilita obter, segundo os autores, maior eficiência nas vigas. Esta combinação do composto com outro material na seção transversal, visando obter um melhor desempenho de cada um dos materiais constituintes é o princípio de dimensionamento das estruturas chamadas híbridas ou mistas. Estas estruturas carregadas à flexão podem entrar em colapso, segundo DESKOVIC et al. (1995a), de acordo com os seguintes modos:

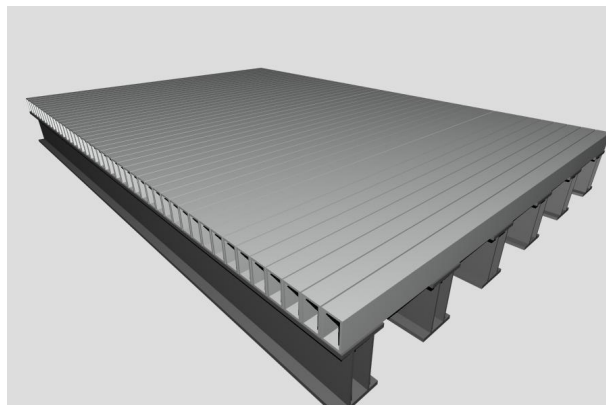
- a alma pode romper ou flambar em função das tensões de cisalhamento, resultando desta maneira em ruptura por cisalhamento;
- um ou mais dos elementos da viga podem falhar em consequência de tensões normais, resultando em ruptura por flexão;
- a ligação entre a interface do PRFV e concreto pode falhar causando deslizamento entre os materiais;
- se a camada de concreto é fina, o concreto pode romper por compressão ou cisalhamento.

Desta maneira os autores realizaram ensaios de flexão em vigas mistas PRF/concreto, apresentando os procedimentos para análise de projeto à flexão, instabilidade lateral e ruptura por cisalhamento. Além disso os autores discretizaram pelo MEF os perfis de PRF por elementos de casca de 4 nós, com propriedades mecânicas ortotrópicas. O concreto foi modelado por elementos sólidos de 8 nós.



Finalmente concluíram que a combinação do PRF com o concreto é viável e pode produzir elementos estruturais eficientes, isto é, com elevada resistência e rigidez mantendo-se um peso próprio reduzido e custos competitivos. Os resultados experimentais bem como a solução pelo MEF enfatizam a importância de uma boa aderência na interface PRF/concreto. É sugerido na pesquisa que a interface ideal deve ser realizada pela combinação de adesivos com conectores mecânicos.

SALIM et al. (1997) desenvolveram um estudo sobre a análise e o projeto de tabuleiros de pontes em PRF para pequenos vãos em materiais compostos avançados. Os tabuleiros eram compostos de seções tubulares contínuas coladas lateralmente, fabricadas pelo processo de pultrusão, apoiadas em longarinas também de PRF, Figura 2.63. Nesta pesquisa foram realizados estudos teóricos e experimentais em vigas de PRF incluindo micro/macro análises pela mecânica dos laminados. Os autores acreditam que os resultados apresentados em seu estudo podem contribuir para o desenvolvimento de seções mais eficientes de PRF.

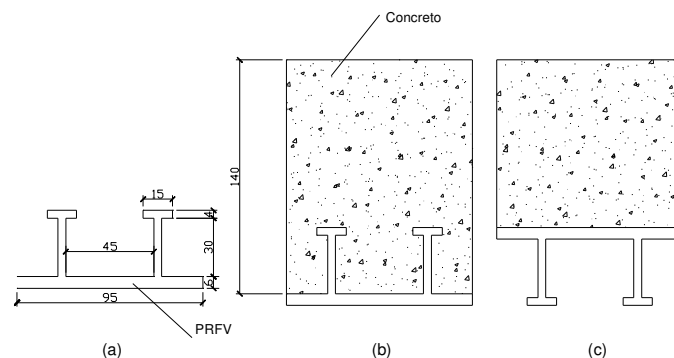


**FIGURA 2.63 – Esquema do tabuleiro e das vigas longarinas em PRF. Fonte: SALIM et al. (1997).**

HALL e MOTTRAM (1998) ensaiaram à flexão a quatro pontos um elemento estrutural que combinava painéis pultrudados de PRFV e concreto, de maneira a resistir aos esforços de flexão e funcionar como uma fôrma permanente para o concreto não endurecido. O painel apresentado no estudo apresentava uma seção comercialmente disponível, não sendo considerado pelos autores como ideal, Figura 2.64.

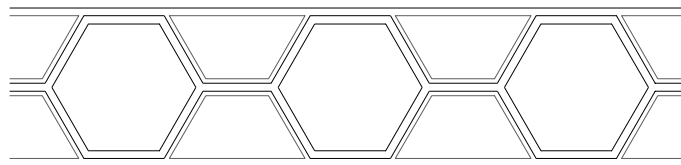
Os estudos experimental e teórico apresentavam dois objetivos principais: (1) compreender de que maneira os dois materiais comportam-se juntos como um único sistema estrutural e (2) desenvolver métodos analíticos que possam estimar o comportamento do composto até a ruptura. Uma atenção também foi dada pelos autores ao estudo de aderência na interface concreto/PRFV, de maneira a obter um painel, ou laje, que não necessite contar com pinos metálicos para resistir ao cisalhamento.

As principais conclusões da pesquisa podem ser assim listadas: (a) as análises micromecânicas podem ser utilizadas para estimar as propriedades mecânicas dos compostos; (b) as teorias convencionais do concreto armado são válidas para as estruturas mistas; (c) as estruturas mistas apresentam comportamento elástico-linear para carregamentos de serviço e não-linear próximo à ruptura; (d) o desempenho do modelo adotado por DESKOKIC et al. (1995a), para vigas mistas concreto/PRF, é confirmado e mostra que sistemas com interação total podem ser obtidos sem a necessidade do uso de pinos metálicos para resistir ao cisalhamento.



**FIGURA 2.64 – (a) Painel pultrudado; (b) e (c) Principais seções das vigas mistas. Fonte: HALL e MOTTRAM (1998).**

O objetivo da pesquisa de GANGARAO et al. (1999) foi desenvolver um tabuleiro em composto avançado capaz de substituir os convencionais em concreto. Seguindo este objetivo os autores desenvolveram um tabuleiro modular em PRF de alta resistência e rigidez, em relação ao peso e boa resistência à fadiga. A configuração da estrutura foi projetada de maneira a conseguir o melhor desempenho estrutural para carregamentos de pontes. A seção transversal de 200 mm de altura é na forma de hexágonos constituídos em fibra de vidro e matriz viniléster, confeccionados pelo processo de pultrusão, Figura 2.65.



**FIGURA 2.65 – Seção transversal do tabuleiro em PRF. Fonte: GANGARAO et al. (1999).**

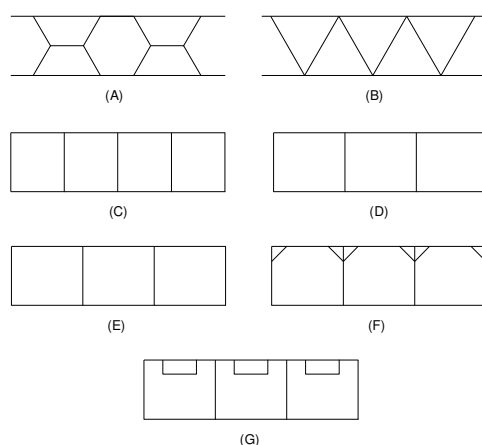
Os módulos de PRF estudados por Gangarao foram instalados em duas pontes, localizadas em Ohio e outra na Pennsylvania. A primeira, *Laurel Lick Bridge*, com 6,0 m de comprimento e 4,9 m de largura está instalada em *Lewis County*. Esta ponte apresenta toda estrutura em materiais compostos, constituídos de módulos de PRF e perfis pultrudados de

seção *H*. Sobre o tabuleiro foi utilizada uma camada fina de concreto polimérico. A instalação desta ponte foi mostrada anteriormente na Figura 2.27.

A segunda ponte, a *Wickwire Run Bridge*, de dimensões 9,1 m de comprimento e 6,6 m de largura está localizada em *Taylor Country* e consiste de um tabuleiro de PRF apoiado em vigas de aço. A instalação desta ponte também já foi apresentada na Figura 2.28.

O estudo dos autores destaca também o comportamento à fadiga dos materiais compostos. Os módulos de PRF foram submetidos a ensaios estáticos, realizados após cada 500.000 ciclos até 2.000.000 de ciclos. Após os ensaios foi feita uma inspeção visual, não sendo observada nenhuma anomalia no tabuleiro. Uma outra conclusão dos autores indica que o estado limite de serviço (limite das deflexões) governa o projeto do tabuleiro de PRF.

GAN et al. (1999) analisaram numericamente pelo MEF vários tipos de painéis para tabuleiros de pontes em perfis pultrudados. Os autores avaliaram seções desenvolvidas por outros autores e uma proposta no próprio trabalho, Figura 2.66. Foram utilizados nos modelos elementos do tipo casca. Entre os quatro painéis de perfis, a configuração com quatro células retangulares forneceu, segundo os autores, uma rigidez significativamente menor do que os outros painéis, os quais apresentaram uma rigidez global praticamente de mesmo valor. Importante esclarecer que a diferença entre as seções (d) e (e), está no fato que este último tabuleiro possui uma espessura maior da mesa superior e almas, em relação à sua mesa inferior.

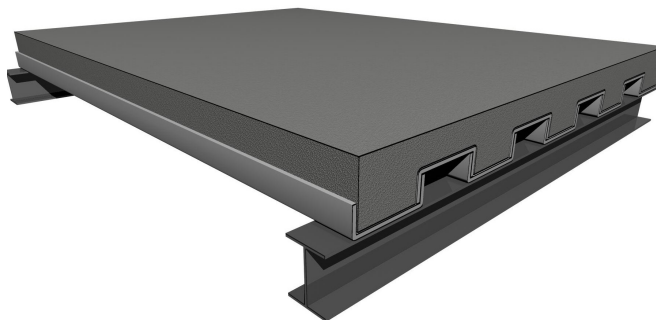


**FIGURA 2.66 – Seção transversal de tabuleiros em PRF com módulos pultrudados. Fonte: GAN et al. (1999).**

FERNANDES e CASTRO (1999) avaliaram experimentalmente duas lajes distintas em PRFV/concreto. As lajes, constituídas pela composição de perfis *U* pultrudados, justapostos lateralmente uns aos outros com uma camada superior de 64mm de concreto, apresentavam diferença apenas no tipo de interface PRFV/concreto. Uma apresentava na interface a mistura de resina com areia e, na outra laje, não havia tratamento na interface PRFV/concreto. A laje,

mostrada na Figura 2.67, foi ensaiada à flexão com a aplicação gradual de uma carga uniformemente distribuída até atingir um carregamento de  $6,5 \text{ kN/m}^2$ .

Os autores esclarecem que a execução da laje proposta é mais simples do que a laje tradicional em concreto armado, pois a base de PRF tem função de armação e fôrma para o concreto. Após o concreto atingir resistência suficiente para suportar o peso próprio da laje, o escoramento da laje é retirado.



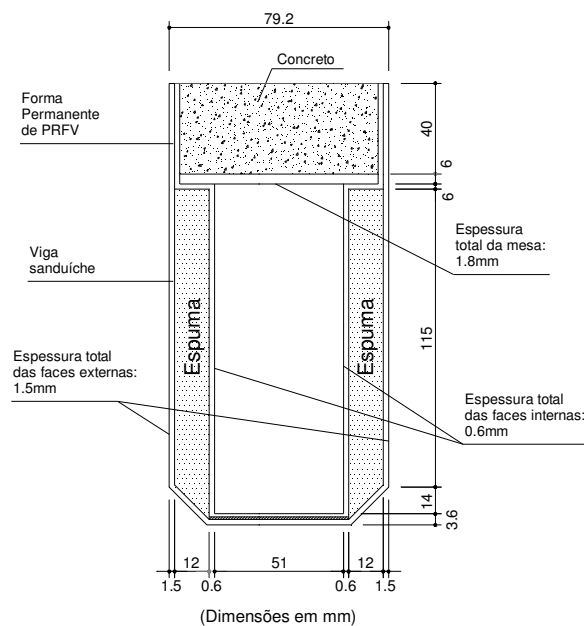
**FIGURA 2.67 – Características geométricas da laje mista concreto/PRFV: Fonte: FERNANDES e CASTRO (1999).**

O estudo de Fernandes e Castro apontou a possibilidade de utilização da laje mista concreto/PRFV, porém destacam os autores, não se pode levar em consideração os custos iniciais deste tipo de laje e sim os custos a longo prazo, especialmente nas situações de estruturas expostas a ambientes de atmosfera agressiva.

MENDES (1999) analisou o comportamento na flexão de vigas mistas formadas pela composição de uma seção transversal  $H$  de material PRF (grafite/epóxi), obtida pelo processo de laminação manual e uma capa de concreto, apoiada sobre a mesa superior do perfil. Para evitar a retração no concreto o autor armou a laje com uma malha de aço. A capa foi concretada sobre formas de madeira e após o endurecimento do concreto esta foi colocada sobre o perfil de PRF e colada com uma resina epóxi na região da interface.

HARIK et al. (1999), realizou ensaios de punção em tabuleiros com componentes pultrudados sob carregamento à três pontos. O tabuleiro de PRFV era constituído de elementos trapezoidais e hexagonais pultrudados. As deformações no plano do tabuleiro e as deflexões perpendiculares ao plano foram medidas utilizando *strain gages* e LVDT's, respectivamente. Os tabuleiros tinham dimensões na seção transversal de  $914 \text{ mm} \times 203 \text{ mm}$ , sendo os vão efetivos de ensaio  $2438 \text{ mm}$ ,  $3048 \text{ mm}$  e  $3658 \text{ mm}$ . Foi ensaiado um corpo-de-prova para cada dimensão de tabuleiro.

CANNING et al. (1999) propuseram em seu estudo uma viga mista concreto/composto, dispondo estes materiais na seção transversal em posições que apresentem suas melhores propriedades. Isto é, o concreto acima da linha neutra, submetido a esforço de compressão e o composto abaixo da linha neutra, submetido à tração. Neste trabalho os autores investigaram seis diferentes técnicas para obter a aderência na interface concreto/PRF por meio de ensaio de flexão a quatro pontos, em vigas na qual o material PRF tinha também função de fôrma permanente para o concreto, Figura 2.68.



**FIGURA 2.68 – Seção transversal da viga mista concreto/PRF. Fonte: CANNING et al. (1999).**

Além disso, uma análise elástico-linear pelo MEF foi realizada para determinar as deformações e deflexões da viga. Neste modelo o deslizamento e a separação entre o concreto e a fôrma de PRF não foi modelada, assumindo-se uma perfeita união entre os materiais. Em sua pesquisa Canning relaciona as principais vantagens da associação do composto com o concreto:

- facilidade de transportar e manusear os sistemas de PRF pois o concreto é adicionado “*in loco*”. Como há menos concreto nos elementos obtém-se uma redução no peso da estrutura de 75 %. Este fato é de suma importância pois os custos com fundações correspondem em geral a 50 % do custo da ponte;
- redução da necessidade de escoramento pelo uso do composto como fôrma permanente;
- aumento da durabilidade, resultando desta maneira na redução dos custos de manutenção, necessários nos reforços com chapas metálicas em função da corrosão. Os ensaios em laboratório têm demonstrado uma resistência à corrosão superior do

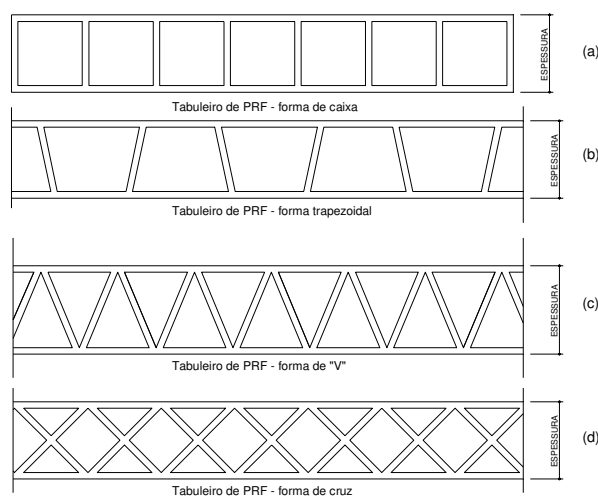
PRF em relação aos materiais convencionais utilizados nas construções correntes. Esta propriedade apresenta uma vantagem particular para a aplicação em ambientes de atmosfera agressiva, por exemplo, em estruturas expostas a ambientes marinhos.

Por outro lado as desvantagens das vigas mistas citadas pelos autores são:

- experiência necessária na utilização dos materiais compostos avançados “*in loco*” em comparação com os materiais tradicionais;
- necessidade de alto nível de supervisão e experiência requerida aos operários;
- custo do material. O PRF é mais caro que os materiais de construção usuais; contudo quando se consideram os custos globais de fabricação, montagem e manutenção, os custos tornam-se comparáveis com uma estrutura em concreto armado.

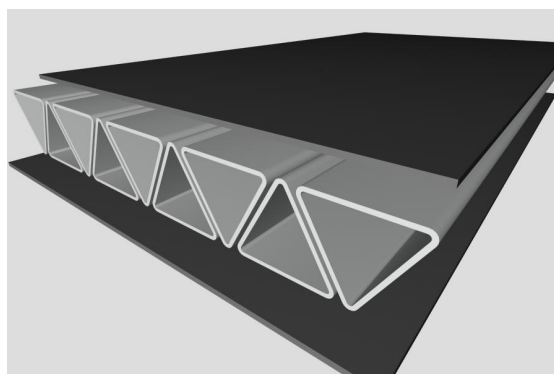
Os autores concluíram que entre as técnicas estudadas para obter a aderência concreto/PRF, a mais prática é a utilização de um adesivo a base de resina epóxi compatível com o concreto fresco.

Em ZUREICK (2001), pode ser encontrado o estudo de várias modulações para tabuleiros de pontes utilizando perfis pultrudados em fibra de vidro colados. Esses tabuleiros estão apresentados na Figura 2.69 onde, segundo o próprio autor, a configuração em forma triangular ilustrada em (c) destaca-se como a forma estruturalmente mais eficiente e econômica.



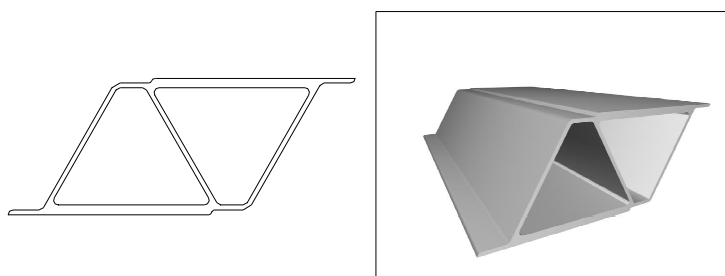
**FIGURA 2.69 – Módulos de Tabuleiros de pontes com perfis pultrudados de PRFV. Fonte: ZUREICK (2001).**

Este modelo foi projetado com placas de PRF fixadas na face superior e inferior coladas a tubos triangulares, formando a aparência na seção transversal de uma treliça, Figura 2.70.



**FIGURA 2.70 – Componentes do tabuleiro em PRF. Fonte: ZUREICK (2001).**

LUKE et al. (2001) descreveram os trabalhos da ASSET (*Advanced Structural SystEms for Tomorrow's Infrastructure*), um projeto de pesquisa cooperativo que iniciou em 1998 com o objetivo de desenvolver um sistema de tabuleiro leve e resistente, desenvolvido a partir de perfis pultrudados de PRF. Este sistema estrutural feito de fibra de vidro, carbono e resinas termofixas, deve ser capaz de suportar vários carregamentos incluindo o tráfego de veículos, para ser aplicado como componente estrutural em tabuleiro de pontes e lajes prediais. A seção do perfil que apresenta 225mm de altura e 300mm de largura está apresentada na Figura 2.71.



**FIGURA 2.71 – Seção transversal do perfil ASSET. Fonte: LUKE et al. (2001).**

A pesquisa mostrou, segundo os autores, que a utilização de perfis pultrudados para aplicações em tabuleiros de pontes ou outros elementos estruturais mostra-se tecnicamente e economicamente viável.

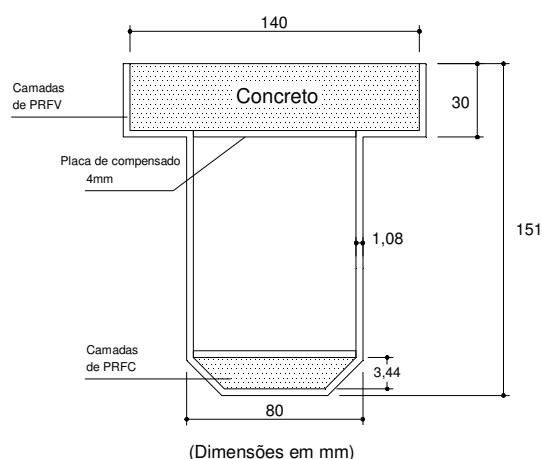
No mês de outubro de 2002 a ponte da ASSET foi inaugurada. A estrutura, localizada na Inglaterra foi a primeira ponte rodoviária da Europa em materiais compostos avançados. Na inauguração, Figura 2.72, um tanque *Sherman* da IIª Guerra Mundial, pesando 340 kN, demonstrou a resistência da ponte em PRF.



**FIGURA 2.72 – Inauguração da ponte rodoviária na Europa com o perfil da ASSET. Fonte: FIBERLINE (2003).**

HULATT et al. (2003a) projetaram pelo processo de moldagem em câmara de vácuo uma viga *T* mista em PRF e concreto, Figura 2.73. Os autores identificaram neste sistema estrutural dois modos de ruptura: a ruptura por flambagem na alma da viga e a ruptura por cisalhamento na união entre o PRF e o concreto. Os resultados experimentais mostraram que a ruptura por cisalhamento na interface não é crítica. Foi utilizado nos trabalhos a resina *Sikadur 31* para produzir a aderência concreto/PRF.

A pesquisa de Hulatt demonstrou também o bom comportamento do PRF para carregamentos de longa duração, permanecendo o ensaio monitorado por 438 dias. Os autores concluíram que o desempenho do composto não é prejudicado pela fluência e fadiga enquanto o concreto mostra uma redução na rigidez para estas situações.



**FIGURA 2.73 – Representação esquemática da viga T. Fonte: HULATT et al. (2003a).**

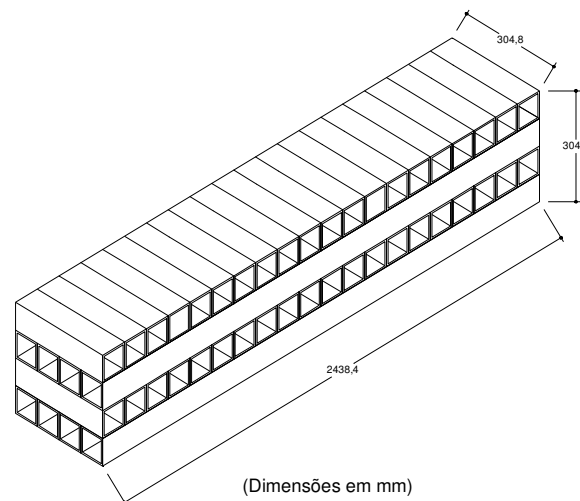
KUMAR et al. (2003) apresentaram em seu trabalho os resultados experimentais do ensaio em perfis tubulares pultrudados de fibra de vidro (PRFV). Estes perfis serão utilizados na fabricação do tabuleiro de uma ponte em materiais compostos avançados projetada para resistir ao tráfego rodoviário, de acordo com as especificações da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Este estudo direcionou-se



principalmente à caracterização experimental do desempenho na flexão dos tubos pultrudados e suas ligações para a composição do tabuleiro. Segundo os autores a rigidez dos tubos e suas ligações demonstraram a viabilidade do material PRF na construção de tabuleiros de pontes, além de outras aplicações em infra-estrutura.

As dimensões dos perfis de PRF foram selecionadas levando-se em consideração, além do projeto proposto, as seções transversais disponíveis pelo fabricante, pois de acordo com Kumar, o molde é um dos componentes mais caros da máquina de pultrusão. Desta maneira foram selecionados tubos quadrados com 76 mm de largura e espessura de 6,35 mm.

O tabuleiro proposto, apresentado na Figura 2.74, consiste de camadas de tubos de PRF colados lateralmente de tal forma que os tubos dispostos em cada camada são perpendiculares aos tubos das camadas superior e inferior. Os tubos dispostos paralelos à direção do tráfego são os principais elementos de sustentação, enquanto que os tubos dispostos na direção perpendicular ao tráfego ajudam na distribuição do carregamento em toda a ligação.

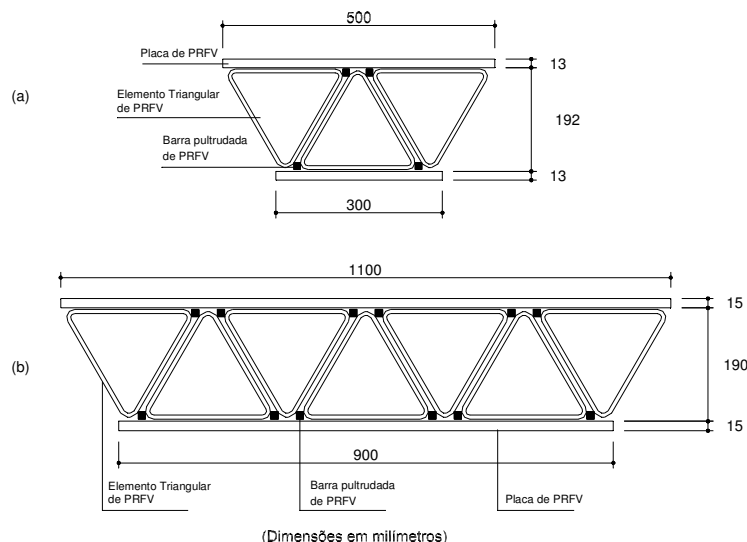


**FIGURA 2.74 – Tabuleiro com quatro camadas de tubos retangulares pultrudados. Fonte: KUMAR et al. (2003).**

WILLIAMS et al. (2003) apresentaram os resultados de um programa experimental designado para estudar o comportamento à flexão de um tabuleiro de ponte em fibra de vidro e resina epóxi (PRFV), patenteado recentemente no Canadá. Este tabuleiro consiste de perfis tubulares de seção triangular confeccionados pela técnica de *enrolamento de filamentos*. Além disso, placas pultrudadas também em fibra de vidro foram coladas nas faces superior e inferior dos tubos para formar um conjunto mais rígido, como pode ser visto na Figura 2.75.

O programa de ensaios foi realizado em dois tipos de tabuleiros. O primeiro, utilizando três perfis, teve como finalidade fornecer resultados iniciais de desempenho, servindo como protótipo do segundo tabuleiro. Este último apresenta módulos com sete perfis tubulares e foi utilizado em ensaios que simulavam carregamentos de caminhões. O tabuleiro proposto no

trabalho de Williams foi capaz de resistir ao carregamento de um caminhão de classe HS30 da AASHTO, versão de 1996.



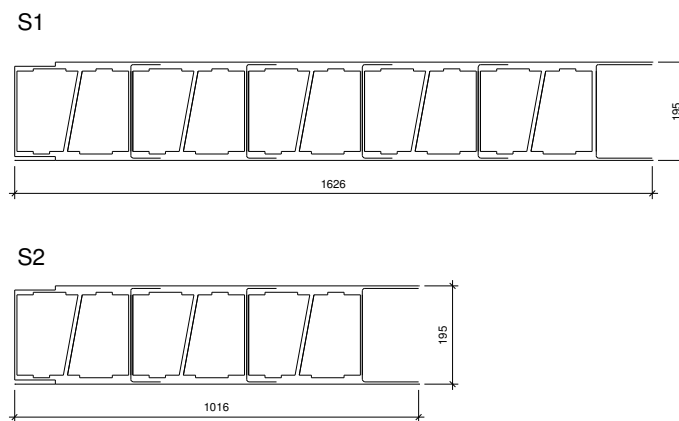
**FIGURA 2.75 – (a) Seção transversal do primeiro protótipo e (b) seção do segundo protótipo para os tabuleiros. Fonte: WILLIAMS et al. (2003).**

KELLER e SCHOLLMAYER (2004) analisaram experimentalmente e numericamente o comportamento bi-direcional de um tabuleiro para pontes pultrudado de PRFV. Os autores ensaiaram à punção dois diferentes protótipos em escala real, Figura 2.76. Na Tabela 2.9 é apresentado um resumo das características de cada um dos protótipos.

**TABELA 2.9 – Dimensões dos tabuleiros de PRFV. Fonte: KELLER e SCHOLLMAYER (2004).**

Dimensões	S1	S2
Número de perfis	5	3
Largura (mm)	1626	1016
Comprimento (mm)	2900	2900
Altura (mm)	195	195

Os autores concluíram que comparado ao comportamento isotrópico de uma placa unidirecional, o comportamento bi-direcional do tabuleiro ortotrópico não foi muito pronunciado. Entretanto, uma vez que o Estado Limite de Serviço governa, na maioria dos casos, o projeto de tabuleiros de PRFV, a possível contribuição da flexão bidirecional da placa não poder ser considerada insignificante e deve ser considerada de maneira a explorar completamente o potencial dos tabuleiros para pontes de PRFV.



**FIGURA 2.76 – (a) Seção transversal do primeiro protótipo e (b) seção do segundo protótipo para os tabuleiros. Fonte: KELLER e SCHOLLMAYER (2004).**

AREF et al. (2005), apresentaram o estudo de uma superestrutura mista de pontes utilizando-se PRF e concreto. O elemento estrutural foi projetado como simplesmente apoiado com um comprimento de 18,3 m, sendo ensaiado a flexão em escala reduzida de 1:5. Três seções trapezoidais de PRFV foram coladas para fornecer uma das pistas de rodagem da superestrutura, possuindo também uma camada de concreto localizada na região de compressão.

Os autores também realizaram um estudo numérico por meio do Método dos Elementos Finitos. Nesta análise o laminado de PRFV foi modelado utilizando-se elementos de casca com quatro nós, enquanto para o concreto foi adotado simulação com elementos sólidos de oito nós. Na interface concreto/PRF foi assumida uma perfeita ligação entre os dois materiais. O comportamento da laje mista foi analisada como linear e não-linear. Segundo os autores a análise linear apresentou-se bastante precisa para simular o comportamento a flexão da laje mista, na fase elástica.

No próximo capítulo é feita uma revisão da micro e macromecânica dos materiais compostos avançados.

### 3. ANÁLISE MICRO E MACROMECAÂNICA DOS COMPOSTOS

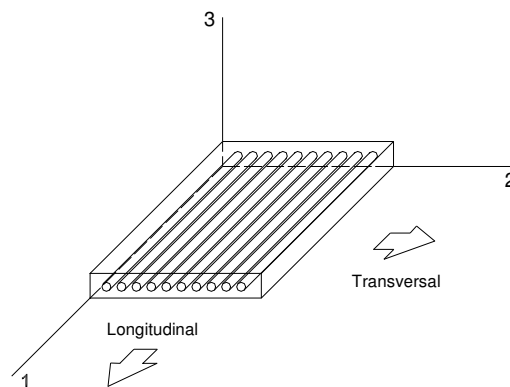
#### 3.1. Análise Micromecânica dos Compostos

Os produtos poliméricos reforçados com fibras sintéticas são os materiais compostos avançados mais utilizados atualmente. O seu estudo e desenvolvimento têm sido fortemente conduzido em função do seu vasto potencial para aplicações estruturais. Alguns dos elementos estruturais ou laminados feitos de compostos fibrosos consistem de várias e distintas camadas de lâminas unidirecionais. Cada lâmina é geralmente feita dos mesmos materiais constituintes, mas uma camada individual pode diferir de outra camada em: (1) volume relativo dos materiais constituintes, (2) forma do reforço utilizado bem como fibras contínuas ou descontínuas, fibra entrelaçada ou não entrelaçada, e (3) orientação das fibras em relação a um eixo comum. Além disso, os compostos híbridos podem ser feitos de camadas com diferentes fibras e/ou matriz. Logo, as propriedades direcionais de uma camada individual podem ser um tanto diferente das outras, resultando desta maneira que a análise e projeto de qualquer elemento estrutural pode requerer um completo conhecimento das propriedades de uma camada individual. Um composto com uma única camada, entretanto, representa a base de construção de um laminado.

Um composto unidirecional consiste de fibras dispostas em direção paralela, embebidas em uma matriz. Porém várias camadas unidirecionais podem ser agrupadas em uma sequência específica de orientação para fabricar um laminado, a fim de se obter a resistência e rigidez necessárias. Cada camada de um composto unidirecional pode ser chamado de lâmina. Na Figura 3.1 é apresentado o esquema de um composto unidirecional. A direção paralela às fibras é geralmente chamada de direção longitudinal (eixo 1) e a direção perpendicular às fibras é conhecida como direção transversal (qualquer direção no plano 2-3).

A lâmina representada nesta figura mostra somente uma fibra através da espessura da lâmina. Na prática este fato pode ser verdade somente para fibras com grandes diâmetros como o boro mas na maioria dos casos, para outras fibras, existem várias fibras dispostas através da espessura da lâmina.

De uma maneira geral as fibras encontram-se dispostas aleatoriamente através da seção transversal da lâmina, podendo estar em contato uma com as outras em alguns lugares. Este tipo de distribuição de fibras na lâmina é típica de vários sistemas fibra-resina, AGARWAL e BROUTMAN (1990).



**FIGURA 3.1 – Representação esquemática de um composto unidirecional. Fonte: AGARWAL e BROUTMAN (1990).**

Em função de sua estrutura um material composto avançado unidirecional apresenta diferentes propriedades nas direções longitudinal e transversal. Pode-se dizer que os compostos unidirecionais são ortotrópicos em relação aos eixos de simetria 1, 2 e 3. Estes compostos unidirecionais apresentam maiores resistência e rigidez na direção longitudinal. Mas, por outro lado, em consequência da distribuição aleatória das fibras na seção transversal o comportamento do material nas outras duas direções é praticamente idêntico. Desta maneira um composto unidirecional pode ser considerado transversalmente isotrópico, ou seja, isotrópico no plano 2-3, AGARWAL e BROUTMAN (1990).

Como visto as propriedades direcionais de uma lâmina individual pode ser um tanto diferente. A análise e o projeto de qualquer elemento estrutural em materiais compostos avançados requer um completo conhecimento das propriedades de uma lâmina individual. Um composto com uma única camada, entretanto, representa a base de construção para os laminados. Assim é oportuno estudar primeiro as propriedades dos compostos unidirecionais.

As propriedades microscópicas do laminado como a resistência e a rigidez dependem portanto das propriedades individuais das lâminas que o compõem, além da orientação das mesmas. Após a construção do elemento, as propriedades mecânicas de uma lâmina podem ser determinadas por ensaios mecânicos, porém na etapa ainda de projeto é importante se fazer previsões sobre estas propriedades. Desta maneira pode-se expressar o problema da seguinte maneira:

- dadas as propriedades mecânicas do tipo escolhido de fibra e resina, e
- dada a porcentagem (em volume) de fibras a ser utilizada,
- determinar as propriedades mecânicas da lâmina.

Uma estimativa para responder a este problema envolve o estudo das alterações microscópicas entre os elementos constituintes da lâmina. Este estudo é conhecido como *Micromecânica da Lâmina*.

Antes da apresentação das propriedades elásticas dos compostos unidirecionais será introduzido o conceito da fração relativa de fibras por unidade de volume e por unidade de peso. Este conceito é crucial uma vez que as expressões teóricas para obter as propriedades de resistência e rigidez de uma lâmina unidirecional são em geral função da fração de volume de fibra. Além disso, como as medidas dos constituintes são geralmente baseadas em seu peso, a fração de peso é também definida.

As frações de peso são mais fáceis de se obter durante o processo de fabricação, contudo as frações de volume são exclusivamente utilizadas nas análises teóricas dos materiais compostos, AGARWAL e BROUTMAN (1990). É desejável portanto conhecer as expressões para conversão entre as frações de peso e de volume.

Cumpra aqui expor algumas definições e relações básicas. Considere  $v_c$  o volume do material composto que consiste do volume das fibras  $v_f$  e do volume da matriz  $v_m$ . Os pesos do material podem ser  $w_c$ ,  $w_f$  e  $w_m$  representando os pesos correspondentes do material composto, das fibras e da matriz, respectivamente. As frações de volume e peso são denotadas pelas letras maiúsculas  $V$  e  $W$ , respectivamente. Desta maneira pode-se definir as frações de volume e peso pelas Equações (3.1):

$$v_c = v_f + v_m \quad (3.1a)$$

$$V_f = \frac{v_f}{v_c}, \quad V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (3.1b)$$

e

$$w_c = w_f + w_m \quad (3.1c)$$

$$W_f = \frac{w_f}{w_c}, \quad W_m = \frac{w_m}{w_c} \quad (3.1d)$$

Para estabelecer as relações de conversão entre as frações de peso e volume, o peso específico,  $\rho_c$ , do material composto deve ser encontrado. O peso específico do material pode ser facilmente obtido em termos dos pesos específicos dos constituintes e sua fração de volume ou fração de peso. Enfim, os pesos na equação (3.1c) podem ser substituídos pelos produtos de correspondência entre peso específico e volume e a equação pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\rho_c v_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (3.2)$$

Dividindo ambos os lados da Equação (3.2) por  $v_c$  e substituindo na definição das frações de volume da equação (3.1b), tem-se:

$$\rho_c = \rho_f \frac{V_f}{V_c} + \rho_m \frac{V_m}{V_c}$$

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (3.3)$$

A Equação (3.3) é a principal relação entre os componentes do composto. Por meio dela pode-se definir uma relação que representa a forma básica das equações que definem as propriedades dos compostos, tal como:

$$(\text{Propriedade X})_c = (\text{Propriedade X})_f V_f + (\text{Propriedade X})_m V_m \quad (3.4)$$

A Equação (3.4) define as propriedades do composto em função das propriedades individuais da fibra e da matriz e da relação entre os seus volumes na mistura. Este tipo de relação é conhecido como *Regra das Misturas*. Várias das propriedades da lâmina podem ser obtidas de forma exata ou aproximada por meio desta relação, KAW (1997).

Em MENDONÇA (2005) pode ser encontrada uma explanação mais detalhada do assunto, não sendo, portanto, apresentadas neste trabalho as equações que definem as propriedades elásticas dos materiais compostos.

As propriedades elásticas dos materiais compostos são fortemente influenciadas pelas propriedades individuais de seus constituintes e sua distribuição no laminado.

Estas propriedades podem ser determinadas por meio de ensaios experimentais que em geral apresentam procedimentos simples e diretos. Contudo uma amostragem do ensaio determina as propriedades de um sistema único fibra-matriz, produzido por um processo de fabricação. Ensaios adicionais são necessários quando qualquer alteração ocorre nas variáveis do sistema tal como o volume relativo entre os constituintes, propriedade dos constituintes e o processo de fabricação. De fato estes experimentos, segundo AGARWAL e BROUTMAN (1990), podem consumir um certo tempo e custos que na maioria dos casos não estão disponíveis.

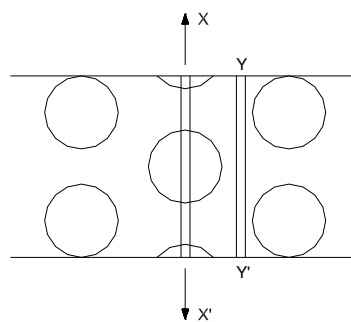
Além dos ensaios experimentais, métodos teóricos e semi-empíricos podem ser utilizados para se determinar as propriedades dos compostos. Estes métodos, segundo AGARWAL e BROUTMAN (1990), podem não apresentar confiança para a obtenção de valores para utilização em projetos e apresentam dificuldade em selecionar um modelo representativo para alguns casos tais como as propriedades transversais dos compostos unidirecionais. Contudo, os modelos matemáticos para estudar as propriedades longitudinais de um composto unidirecional são bastante precisas, HULL (1992).

Na literatura podem ser encontrados três métodos para a determinação destas constantes: (i) pela teoria da Mecânica dos Materiais, (ii) por meio de Modelos Semi-Empíricos e (iii) pela Teoria da Elasticidade. Nos itens a seguir será realizada uma breve explanação com relação aos modelos semi-empíricos.

### 3.1.1 Modelos Semi-Empíricos

As propriedades elásticas transversais são essenciais para um projeto eficaz de estruturas laminadas. Todavia elas fornecem um pequeno discernimento na compreensão física da distribuição das tensões e deformações ao redor das fibras, a qual é necessária para uma interpretação da ruptura transversal, HULL (1992). As suposições adotadas de que  $\sigma_f = \sigma_m$ , e que dentro de cada fase a deformação é uniforme, não é verdadeira em função das fibras não poderem ser representadas como um único elemento na lâmina.

Este fato pode ser demonstrado pela análise da Figura 3.2 que mostra um conjunto hexagonal de fibras em um material composto submetido a uma deformação uniforme externamente aplicada. Pode ser visto que a maioria da deformação na faixa  $XX'$  é absorvida pela resina uma vez que  $E_f \gg E_m$ . A deformação na faixa  $YY'$  que passa completamente através da resina será mais uniforme e a deformação média será muito menor do que da resina na faixa  $XX'$ . Em outras palavras, existe um aumento na deformação na resina entre as fibras. Estas diferentes deformações, segundo HULL (1992), em diferentes partes da resina levam a tensões adicionais e conseqüentemente a uma distribuição não uniforme de tensões.



**FIGURA 3.2 – Representação esquemática do aumento de deformação em um composto unidirecional sujeito a um carregamento transversal. Fonte: HULL (1992).**

Estas implicações nos fazem pensar na necessidade de se estabelecer modelos mais precisos para a determinação destas propriedades. A adoção, segundo KAW (1997), de métodos numéricos tais como o método dos elementos finitos, o método das diferenças finitas e os métodos dos elementos de contorno, convergem para uma complexidade na resolução das equações.



Devido a estas dificuldades alguns modelos semi-empíricos foram desenvolvidos para recomendações de projeto. O mais útil destes modelos semi-empíricos é o de Halphin e Tsai, publicado em 1967, uma vez que pode ser utilizado para uma ampla quantidade de propriedades elásticas e frações em volume de fibra. Estas equações são simples e podem ser facilmente utilizadas em procedimentos de projetos. Contudo, AGARWAL e BROUTMAN (1990) alertam que os resultados obtidos com estas equações são muito precisos para frações de volume de fibra que não se aproximam de 1.

As expressões de Halphin e Tsai para o módulo de elasticidade longitudinal e para o coeficiente de Poisson são idênticas às obtidas pela mecânica dos materiais. Mas por outro lado os valores obtidos para o módulo de elasticidade transversal e módulo de cisalhamento apresentam algumas diferenças. Estas expressões, bem como suas análises podem ser consultadas nas referências AGARWAL e BROUTMAN (1990), JONES (1999), HULL (1992) e MENDONÇA (2005).

### 3.1.2 Resistência de uma Lâmina Unidirecional

A aplicação prática dos materiais compostos avançados, formados exclusivamente por laminados unidirecionais é bastante restrita. Este fato ocorre principalmente em função da baixa resistência na direção transversal e rigidez ao cisalhamento do composto unidirecional, quando comparadas com as correspondentes rigidezes e resistências paralelas às fibras. No entanto é importante conhecer as propriedades de uma lâmina unidirecional para a obtenção das propriedades dos laminados formados por lâminas com diferentes orientações das fibras. Além disso, neste trabalho serão utilizados perfis pultrudados com filamentos dispostos em uma direção, que podem ser tratados como um laminado unidirecional, uma vez que as mantas adicionais tem propriedades similares às da resina.

Um laminado pode apresentar diferentes modos de ruptura. No caso dos projetos em compostos, segundo HULL (1992), é necessário conhecer as resistências de ruptura associadas com os modos de falha para os diferentes sistemas fibra-resina, com as variações das frações volumétricas de fibra. Alguns valores típicos de resistências para os três principais tipos de fibras em resinas de poliéster ou epóxi são apresentadas na Tabela 3.1. A resistência uniaxial é representada por  $\sigma^*$ , na tração (T) ou compressão (C), paralelo ou perpendicular ( $\perp$ ) à direção das fibras. A resistência ao cisalhamento é designada por  $\tau_{\#}^*$ .

**TABELA 3.1 – Propriedades de resistência típicas de compostos unidirecionais,  $V_f \approx 0,50$ . Fonte: HULL (1992).**

Material	$\sigma_T^*$ (MPa)	$\sigma_C^*$ (MPa)	$\sigma_{\perp T}^*$ (MPa)	$\sigma_{\perp C}^*$ (MPa)	$\tau_{\#}^*$ (MPa)
Vidro-poliéster	650-750	600-900	20-25	90-120	45-60
Carbono-epóxi	850-1100	700-900	35-40	130-190	60-75
Kevlar 49-epóxi	1100-1250	240-290	20-30	110-140	40-60

Estes parâmetros podem ser encontrados a partir das propriedades individuais da fibra e da matriz utilizando-se a teoria da Mecânica dos Materiais. Estes parâmetros de resistência são mais difíceis de estimar do que as propriedades de rigidez, uma vez que as resistências são mais sensíveis à não homogeneidade do material e sua geometria, interface fibra-matriz, processos de fabricação e ambiente. Em função destas sensibilidades existem modelos teóricos e empíricos disponíveis para alguns parâmetros de resistência. Por vezes avaliações experimentais destas resistências fazem-se necessárias uma vez que são métodos diretos e confiáveis.

### 3.2. Análise Macromecânica dos Compostos

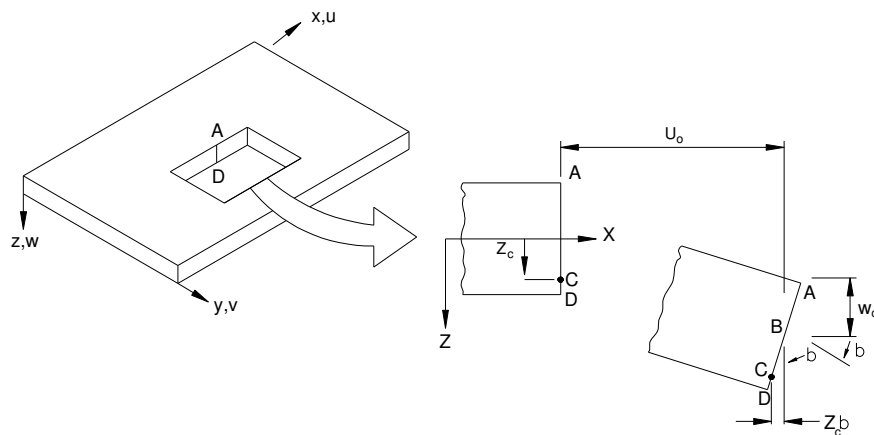
Nos itens anteriores foi mostrado que uma lâmina não apresenta propriedades isotrópicas. Um dos principais casos de corpos não isotrópicos, associado à uma lâmina simples, é o corpo ortotrópico o qual apresenta três planos perpendiculares de simetria, e cujas propriedades em qualquer ponto são diferentes nas três direções perpendiculares. Segundo HULL (1992), uma lâmina de filamentos entrelaçados apresenta comportamento ortotrópico mas, por outro lado, uma lâmina constituída de mantas de fios picados é geralmente adotada de comportamento isotrópico no plano da lâmina, DAVALOS et al. (1997), NAGARAJ e GANGARAO (1997) e MOSALLAM e BANK (1992).

O objetivo deste Capítulo é descrever os métodos utilizados no cálculo das propriedades mecânicas de um laminado a partir das propriedades, orientações e distribuição das lâminas individuais. A aproximação é baseada na Teoria Clássica dos Laminados (TCL), encontrada em publicações como, AGARWAL e BROUTMAN (1990), ASHBEE (1993), HULL (1992), KAW (1997) e MENDONÇA (2005). É importante citar que uma das mais expressivas contribuições na mecânica dos laminados, segundo alguns autores, é encontrada em JONES (1999).

### 3.2.1. Análise Macromecânica do Laminado

Os laminados são fabricados de tal maneira que agem como um material que se comporta como uma única lâmina. Admite-se que a união entre duas lâminas, formando um laminado, é perfeita. Assim, para efeito de cálculo, não há deslizamento de uma lâmina sobre a outra.

Considere a deformação da seção de um laminado no plano  $xz$ , como mostrado na Figura 3.3. Adota-se que uma linha  $ABCD$ , originalmente reta e perpendicular ao plano médio do laminado também permanece reta e perpendicular ao plano médio na configuração deformada. Esta suposição equivale a desprezar as deformações por cisalhamento  $\gamma_{xz}$  e  $\gamma_{yz}$  e é também equivalente a admitir que as lâminas que compõem a seção transversal não deslizam uma em relação às outras. Além disso, admite-se que o ponto  $B$  no centro geométrico do plano médio sofre deslocamentos,  $u_o$ ,  $v_o$  e  $w_o$ , ao longo das direções dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente.



**FIGURA 3.3. – Deformação do laminado no plano  $xz$ . Fonte: JONES (1999).**

O deslocamento  $u$  na direção  $x$  de um ponto  $C$ , localizado na normal  $ABCD$  em uma distância  $z$  do plano médio é dado por:

$$u = u_o - z\alpha \tag{3.5}$$

onde,  $\alpha$ , é a inclinação do plano médio do laminado na direção  $x$ , ou seja:

$$\alpha = \frac{\partial w_o}{\partial x} \tag{3.6}$$

Combinando as Equações (3.5) e (3.6), obtém-se a expressão para o deslocamento  $u$  na direção  $x$ , de um ponto arbitrário a uma distância  $z$ , a partir do plano médio do laminado pela Expressão (3.7).

$$u = u_o - z \frac{\partial w_o}{\partial x} \quad (3.7)$$

Por analogia o deslocamento,  $v$ , na direção  $y$  de um ponto arbitrário em uma distância  $z$  a partir do plano médio geométrico é:

$$v = v_o - z \frac{\partial w_o}{\partial y} \quad (3.8)$$

Logo, o deslocamento,  $w$ , na direção  $z$  para qualquer ponto em  $ABCD$  é o deslocamento  $w_o$  do plano médio mais o alongamento da normal. Admite-se portanto que o alongamento (ou encurtamento) da normal  $ABCD$  é insignificante em comparação ao deslocamento,  $w_o$ , e assim o deslocamento normal de qualquer ponto do laminado é tomado igual ao deslocamento  $w_o$  do ponto correspondente ao plano médio. Desta maneira a deformação normal,  $\varepsilon_z$ , torna-se desprezível. Esta hipótese reduz as deformações de um laminado para  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  e  $\gamma_{xy}$ , onde estas deformações podem ser obtidas derivando os deslocamentos,  $u$  e  $v$ , como visto nas Expressões (3.9):

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_o}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_o}{\partial x^2} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_o}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_o}{\partial y^2} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u_o}{\partial y} + \frac{\partial v_o}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_o}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (3.9)$$

As relações anteriores deformação-deslocamento podem ser escritas em termos das deformações no plano médio e curvaturas da placa, como se segue:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

onde, as deformações no plano médio são:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_o}{\partial x} \\ \frac{\partial v_o}{\partial y} \\ \frac{\partial u_o}{\partial y} + \frac{\partial v_o}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (3.11)$$

e as curvaturas são:

$$\begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

Pode-se analisar pela Expressão (3.10) que as deformações de um laminado variam linearmente ao longo de sua espessura. As tensões em uma lâmina qualquer podem ser obtidas substituindo a Expressão (3.10) na relação tensão-deformação para uma lâmina:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Assim, a variação de tensão através da espessura de um laminado é obtida calculando-se as variações da tensão em todo o laminado. De um modo geral, a variação da tensão através da espessura de um laminado não é linear. Estas tensões são descontínuas na interface de duas lâminas.

### 3.2.2. Forças e Momentos Resultantes no Laminado

As deformações no plano médio e as curvaturas da placa são valores desconhecidos para se obter as tensões e deformações de uma lâmina. A Expressão (3.13) nos fornece, por outro lado, as tensões em cada lâmina em termos de tensões desconhecidas. As tensões em cada lâmina podem ser integradas ao longo da espessura do laminado para fornecer forças resultantes e momentos. Assim, como as forças e momentos aplicados no laminado serão conhecidos, as deformações no plano médio e as curvaturas da placa podem ser encontradas.

Integrando-se as tensões em cada lâmina, obtém-se a força resultante por unidade de comprimento no plano  $x$ - $y$ , ao longo da espessura da lâmina, conforme as Expressões (3.14):

$$\begin{aligned}
 N_x &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz \\
 N_y &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz \\
 N_{xy} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

onde,  $h/2$ , é metade da espessura do laminado.

Do mesmo modo, integrando-se as tensões em cada lâmina tem-se o momento resultante por unidade de comprimento no plano  $x$ - $y$  ao longo da espessura do laminado:

$$\begin{aligned}
 M_x &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz \\
 M_y &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz \\
 M_{xy} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

sendo:

$N_x, N_y$  → força normal por unidade de comprimento;

$N_{xy}$  → força de cisalhamento por unidade de comprimento;

$M_x, M_y$  → momentos fletores por unidade de comprimento;

$M_{xy}$  → momento torsor por unidade de comprimento.

As deformações e curvaturas de um laminado, no plano médio, são independentes da coordenada  $z$ . Além disso, a matriz transformada reduzida  $[Q]_k$  é constante em cada lâmina, JONES (1999), KAW (1997) e MENDONÇA (2005). Desta maneira, pode-se reescrever as expressões da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 A_{ij} &= \sum_{k=1}^n [(Q_{ij})_k] (h_k - h_{k-1}), \quad i=1,2,3; \quad j=1,2,3 \\
 B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [(Q_{ij})_k] (h_k^2 - h_{k-1}^2), \quad i=1,2,3; \quad j=1,2,3 \\
 D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [(Q_{ij})_k] (h_k^3 - h_{k-1}^3), \quad i=1,2,3; \quad j=1,2,3
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

As matrizes  $[A]$ ,  $[B]$  e  $[D]$  são chamadas: matriz de rigidez extensional, matriz de ligação e matriz de rigidez à flexão, respectivamente.

A matriz de rigidez extensional  $[A]$  relaciona as forças resultantes no plano em função das deformações no plano, enquanto a matriz de rigidez à flexão  $[D]$  relaciona os momentos resultantes em função das curvaturas da placa. É a matriz  $[B]$  que relaciona os termos de força e momento em função das deformações e curvaturas no plano médio do laminado. As expressões podem ser reescritas da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon^0 \\ k \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

### 3.3 Considerações Complementares

As expressões da micromecânica dos compostos serão empregadas para estimar as propriedades mecânicas do perfil pultrudado. Nestas estimativas foi adotado o valor para o volume de vazios,  $V_v=0$ , pois no processo de fabricação por pultrusão este índice assume valores próximos de zero.

Nestas estimativas trabalhou-se com os critérios de Hewitt e Malherbe, encontrado em KAW (1997) e MENDONÇA (2005), para os cálculos do módulo de elasticidade transversal e de cisalhamento, pois estes se aproximam mais dos valores experimentais encontrados em referências.

As expressões da macromecânica dos compostos serão utilizadas para o cálculo das propriedades de rigidez do laminado que compõe o perfil pultrudado de PRFV. Estes cálculos serão empregados no Capítulo 4 para a avaliação da rigidez à flexão dos perfis. Além disso, estes valores serão utilizados também para o modelo numérico, pelo Método dos Elementos Finitos, do ensaio de flexão da laje mista, descrito no Capítulo 7.

## 4. RIGIDEZ À FLEXÃO DOS PERFIS PULTRUDADOS

### 4.1. Introdução

Atualmente, perfis em PRF fabricados a partir do processo da pultrusão têm ganho espaço na engenharia civil, presentes cada vez mais nas estruturas em função das propriedades favoráveis dos materiais compostos. Contudo, o seu relativo baixo módulo de elasticidade pode resultar em projetos governados pelas deflexões e limitações de flambagem ao invés das limitações de resistência. Deve-se também levar em consideração a baixa relação entre o módulo de cisalhamento e o módulo de elasticidade longitudinal, que resulta em uma parcela significativa de deformação por cisalhamento nas deformações totais dos elementos, ROBERTS e AL-UBAIDI (2002).

Segundo KUMAR et al. (2003), as investigações do comportamento à flexão de perfis de PRFV em comparação com perfis de aço mostram que os efeitos de deformação por cisalhamento são mais importantes em consequência do relativo baixo módulo de elasticidade da fibra de vidro em comparação com o aço e o baixo módulo de cisalhamento da resina. Além disso, devido ao elevado alongamento de ruptura permitido por ambos, fibra de 4,0 % e a resina 4,5 %, o material composto permanece elástico linear para grandes deflexões e deformações.

NAGARAJ e GANGARAO (1993) caracterizaram o comportamento de perfis tubulares de PRFV submetidos à flexão sob carga estática, de fadiga e cíclica. Os ensaios mostraram que o cisalhamento e o deslizamento interfacial entre as camadas adjacentes do composto apresentam uma influência significativa nas medidas de deflexão e deformação. Em outro trabalho, DAVALOS e QIAO (1997) avaliaram estudos analíticos e experimentais combinados para ensaios de flexão, torção e instabilidade lateral de perfis de PRF. Os autores concluíram que em geral a flambagem e os limites de deflexão tendem a governar os critérios de projeto para perfis correntes de PRF.

NAGARAJ e GANGARAO (1997) afirmam que, de um modo geral, os compostos avançados exibem propriedade anisotrópicas. Contudo, os perfis constituídos pelo processo da pultrusão são essencialmente de comportamento ortotrópico, com as direções principais coincidindo com o eixo longitudinal e o transversal do elemento.

No caso de projetos constituídos por elementos em compostos avançados, DAVALOS et al. (1996) explicam que ambas as propriedades de rigidez e resistência são igualmente importantes e dependem do material e da geometria da seção transversal. Enquanto as



mudanças nas seções dos perfis de PRF são facilmente relacionadas às mudanças na rigidez, as mudanças na constituição do material e na orientação das fibras, por outro lado, não conduzem a resultados tão óbvios. Além disso, o efeito do cisalhamento na deformação dos perfis pultrudados apresenta em geral valores significativos, conduzindo desta maneira, na introdução deste efeito no modelo estrutural dos compostos avançados.

Nos trabalhos de GANGARAO et al. (1999), por exemplo, foram realizados ensaios de flexão a três pontos em tabuleiros de pontes fabricados com PRFV, para três comprimentos: 1,52 m, 2,14 m e 2,74 m, com o objetivo de avaliar a rigidez à flexão na direção predominante das fibras e estudar o efeito da deformação por cisalhamento na rigidez à flexão.

Devido à complexidade dos materiais compostos avançados, as formulações analíticas e os procedimentos de projeto desenvolvidos para elementos constituídos por materiais convencionais podem não ser aplicados com segurança aos perfis em PRF. Por outro lado, métodos numéricos tais como o Método dos Elementos Finitos (MEF) apresentam em geral dificuldades no uso, necessitam de treinamento especializado e, na maioria dos casos, não são sempre acessíveis aos engenheiros projetistas.

Na análise do projeto de uma estrutura em compostos, o projetista deve decidir qual método analítico é o mais apropriado para modelar a estrutura. No entanto, métodos analíticos simplificados são especialmente úteis na fase preliminar de projeto.

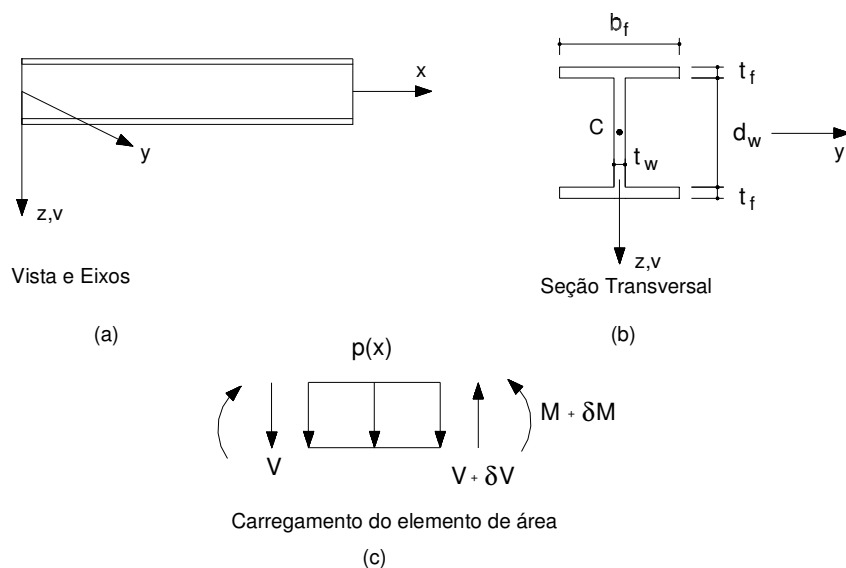
Desta maneira, para se expandir a aplicação estrutural dos perfis pultrudados, métodos de projeto direcionados à aplicação prática da engenharia devem ser desenvolvidos. Tal ferramenta de projeto deve levar em conta a praticidade nas análises das seções padrão, bem como permitir a otimização do projeto com seções inovadoras. No caso de estruturas compostas por barras, o projetista irá frequentemente optar pelo uso da teoria de viga para modelar a estrutura, BANK (1989).

Este Capítulo tem como objetivo apresentar e aplicar uma metodologia para ensaio experimental de vigas submetidas à flexão simples, que permite a determinação simultânea do módulo de elasticidade longitudinal e do módulo de cisalhamento. São ensaiados perfis pultrudados de PRFV, de seção H, submetidos à flexão a três pontos. Descreve-se inicialmente a Teoria de Viga de Timoshenko utilizada para o cálculo das flechas dos perfis pultrudados. Em seguida apresentam-se os aspectos teóricos da metodologia e descrevem-se os ensaios experimentais. Realiza-se também uma modelagem dos perfis por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), com objetivo de avaliar os valores obtidos no modelo numérico com os valores encontrados no ensaio experimental. A Teoria Clássica da Laminação (micro e macromecânica) é utilizada na determinação das propriedades elásticas do perfil de PRFV. Ao final do Capítulo discute-se os resultados e são feitas algumas recomendações relativas aos procedimentos de ensaios de flexão com perfis de materiais compostos avançados. Discutem-

se também os procedimentos das normas americanas ASTM D 790 (1999) e ASTM D 6272 (1998) para o ensaio de flexão em materiais compostos avançados, que preconizam os critérios para a inclusão do efeito da deformação por cisalhamento.

## 4.2. Teoria de Viga

Se uma teoria de viga é utilizada para modelar os elementos de uma estrutura, o projetista necessitará obter as propriedades mecânicas relevantes à teoria escolhida. A escolha desta teoria irá depender de muitos fatores, um dos quais é o grau de anisotropia do material composto. Estes materiais apresentam geralmente relações entre seus módulos de elasticidade longitudinal e de cisalhamento maiores que aqueles para os materiais isotrópicos. Sob esta circunstância as deformações da viga em função do cisalhamento irão aumentar com o aumento desta relação de anisotropia, BANK (1989). Desta maneira, para levar em conta esta deformação por cisalhamento, a Teoria de Viga de Timoshenko pode ser utilizada como um primeiro melhoramento da Teoria de Viga de Euler-Bernoulli, a qual não considera a deformação por cisalhamento.



**FIGURA 4.1 – Flexão de uma viga de seção transversal H.**

Segundo a Teoria de Timoshenko as seções da viga permanecem planas após a deformação, mas não ficam normais à linha neutra.

As equações diferenciais que governam a flexão de um perfil de seção transversal H, como o mostrado na Figura 4.1, podem ser descritas pelas Expressões (4.1) e (4.2), TIMOSHENKO e GERE (1994).

$$E I_y \frac{d^4 v_f}{dx^4} = p(x) \quad (4.1)$$

$$\frac{d^2 v_c}{dx^2} = -\frac{p(x)}{GK_y A} \quad (4.2)$$

Sendo o eixo longitudinal  $x$ , e os eixos principais que passam pelo centróide ( $C$ ) na seção transversal,  $y$  e  $z$ . O valor  $p(x)$  representa a carga transversal distribuída por unidade de comprimento, agindo na direção  $z$ .

As incógnitas  $v_f$  e  $v_c$  correspondem aos deslocamentos em função da flexão e do cisalhamento, respectivamente. A rigidez à flexão  $EI_y$  é o produto do módulo de elasticidade longitudinal  $E$  pelo momento de inércia  $I_y$  da seção em torno do eixo  $y$ . A rigidez ao cisalhamento da viga  $GK_y A$ , é o produto do módulo de cisalhamento  $G$  pelo coeficiente de cisalhamento  $K_y$  e pela área da seção transversal  $A$ .

O fator numérico  $K_y$  pode ser compreendido pelo valor pela qual a tensão média deve ser multiplicada para fornecer a tensão de cisalhamento no centróide da seção transversal; no caso da flexão em torno do eixo de maior inércia,  $y$ . Ele depende da forma da seção transversal, das propriedades do material e, nas análises dinâmicas, da frequência de vibração da viga, KANEKO (1975) apud BANK (1989). A Expressão (4.3) apresentada em TIMOSHENKO e GERE (1994) permite o cálculo deste fator:

$$K_y = \frac{(D - t_f)t_w}{A} \quad (4.3)$$

sendo:

$D$  → altura total da seção transversal do perfil;

$t_f$  → espessura da mesa;

$t_w$  → espessura da alma;

$A$  → área da seção transversal.

A deflexão total  $v$  da viga é a soma da deflexão decorrente da flexão  $v_f$ , com a do cisalhamento,  $v_c$ , logo:

$$v = v_f + v_c \quad (4.4)$$

Assim:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{d^2v_f}{dx^2} + \frac{d^2v_c}{dx^2} = -\frac{M}{EI_y} - \frac{q}{GK_yA} \quad (4.5)$$

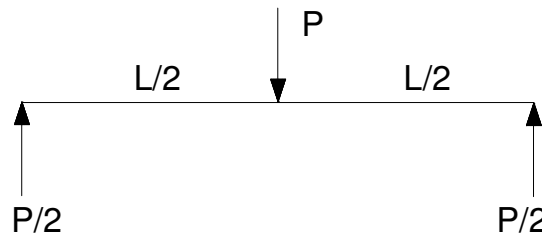


FIGURA 4.2 – Configuração do ensaio de flexão a três pontos.

No caso do ensaio de flexão a três pontos, ilustrado na Figura 4.2, a solução das Equações (4.1) e (4.2) a partir da solução da equação diferencial da linha elástica pode ser expressa por:

$$v = v_f + v_c = \frac{PL^3}{48EI_y} + \frac{PL}{4GK_yA} \quad (4.6)$$

sendo:

$P$ : carga no meio do vão;

$L$ : distância entre os apoios;

$E$ : módulo de elasticidade longitudinal;

$I_y$ : momento de inércia em relação ao eixo  $y$ ;

$G$ : módulo de cisalhamento;

$K_y$ : coeficiente de cisalhamento;

$A$ : área da seção transversal.

### 4.3. Aspectos Teóricos do Ensaio de Flexão nos Perfis Pultrudados

Conforme já foi visto, a deformação por cisalhamento é reconhecida como uma importante influência nos procedimentos de ensaio para se obter o módulo de elasticidade dos materiais compostos.

As normas americanas ASTM D 790 (1999), para o ensaio a flexão a três pontos, e a ASTM D 6272 (1998), para ensaio de flexão a quatro pontos, prescritas para os materiais compostos avançados, preconizam ensaios em pequenas barras sólidas de seção transversal retangular. De acordo com as referidas normas, nas barras de seção retangular a relação vão

livre da viga ( $L$ ) pela altura da seção ( $h$ ) deve ser de pelo menos 60 para ser desprezado o efeito da deformação por cisalhamento.

Todavia, no caso de seções transversais de paredes finas, o critério  $L/h$  não pode ser utilizado, uma vez que a altura da seção transversal não é a única propriedade geométrica de importância. De fato, adotar tal critério implicaria que um perfil de seção  $I$  com 0,20 m de altura precisaria ser ensaiado com um vão livre de 12 m. Nesta situação as grandes deflexões sobre as pequenas cargas podem gerar problemas teóricos e experimentais adicionais.

Neste trabalho, as propriedades geométricas utilizadas para caracterizar as propriedades de flexão são o vão livre ( $L$ ) e o raio de giração ( $r$ ). Logo, a partir destas propriedades pode-se trabalhar com o “índice de esbeltez”  $(L/r)$ , para substituir a relação  $(L/h)$ , como parâmetro para se determinar a contribuição da deformação de cisalhamento no ensaio.

A Teoria de Viga de Timoshenko tem sido utilizada por autores como BANK (1989) e ROBERTS e AL-UBAIDI (2002), tanto para a determinação do módulo de elasticidade na flexão como para a obtenção simultânea do módulo de elasticidade longitudinal e de cisalhamento dos materiais compostos. Com esta finalidade deve-se reescrever a Expressão (4.6) da seguinte maneira:

$$\frac{4A_v}{PL} = \frac{1}{12E} \left( \frac{L}{r} \right)^2 + \frac{1}{GK_y} \quad (4.7)$$

A Expressão (4.7) pode ser ilustrada como uma função de  $4A_v/PL$  versus  $(L/r)^2$ , representando uma linha reta de inclinação  $1/12E$  que intercepta o eixo das ordenadas em  $1/GK_y$ .

Esta equação nos permite determinar ambos, a rigidez à flexão  $EI_y$  e a rigidez ao cisalhamento  $GK_yA$ , por meio do ensaio de flexão a três pontos. Pode-se notar que o índice de esbeltez  $L/r$  aparece na equação como uma variável independente e a quantidade  $4A_v/PL$ , como uma variável dependente.

Como a deformação por cisalhamento é levada em consideração neste experimento, valores precisos das deflexões podem ser obtidos mesmo em vigas com pequenos comprimentos.

Porém, segundo ROBERTS e AL-UBAIDI (2002), este procedimento é muito sensível a pequenas mudanças na alteração da inclinação da reta na regressão linear, no qual pode

resultar em erros relativamente grandes na interceptação. Em função deste fato os autores recomendam repetir os ensaios e tomar a média dos resultados.

O índice de esbeltez pode também ser utilizado para determinar o comprimento necessário no ensaio para se obter o módulo de elasticidade longitudinal na flexão, permitindo-se desprezar o efeito da deformação por cisalhamento. Neste caso um módulo de elasticidade aparente ( $E_a$ ), que leva em conta apenas a deformação por flexão é relacionado com o verdadeiro módulo de elasticidade ( $E$ ) da seção, por meio da Expressão (4.8):

$$\frac{1}{E_a} = \frac{1}{E} \left( 1 + 12 \frac{E/GK_y}{(L/r)^2} \right) \quad (4.8)$$

Como pode ser visto nesta expressão, o módulo de elasticidade aparente é sempre menor do que o verdadeiro módulo à flexão. Para valores maiores do índice de esbeltez e menores relações de anisotropia  $\left( \frac{E}{GK_y} \right)$ , o módulo de elasticidade aparente aproxima-se do módulo longitudinal  $E$ .

Além disso, se a relação de anisotropia é conhecida, pode-se determinar o índice de esbeltez necessário tal que a diferença em porcentagem entre o  $E_a$  e o  $E$ , converja para um valor limite aceitável, menos de 5 %, por exemplo. Segundo BANK (1989), os valores típicos para a relação de anisotropia nos perfis pultrudados variam entre 18 e 30.

Para a aplicação da Equação (4.7), os perfis pultrudados devem ser ensaiados com vãos livres diferentes. Assim, para cada vão a viga é carregada, a carga  $P$  é lida e a deflexão  $v$  medida. Teoricamente apenas dois vãos livres devem ser utilizados para se obter os dois pontos necessários para traçar uma linha reta. Contudo, a utilização de um número maior de vãos livres aumenta o número de pontos experimentais e conseqüentemente reduz a possibilidade de erro. A linha reta é então obtida por regressão linear a partir dos pontos obtidos experimentalmente pelo diagrama  $\left( \frac{L}{r} \right)^2$  versus  $4Av/PL$ , de acordo com a Expressão (4.7). O módulo de elasticidade longitudinal é obtido da inclinação da linha reta, sendo o módulo de cisalhamento determinado pela interseção desta linha com o eixo da ordenada, podendo ser representados pelas Expressões (4.9) e (4.10), respectivamente.

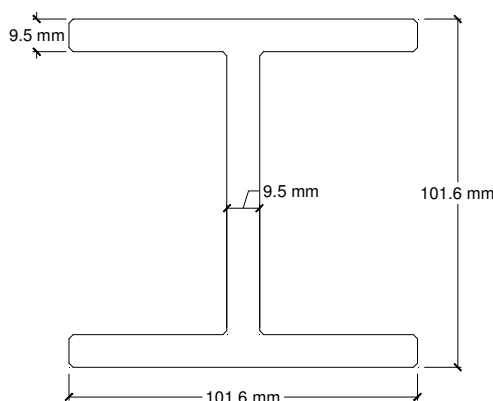
$$E = \frac{1}{12 \times \text{inclinação}} \quad (4.9)$$

$$G = \frac{1}{K_y \times \text{interseção}} \quad (4.10)$$

#### 4.4. Descrição dos Materiais e Preparação dos Ensaios

Neste trabalho os perfis pultrudados de PRF serão ensaiados à flexão a três pontos de acordo com as prescrições da ASTM D 790 (1999). Todavia cabe salientar que a referida norma contempla apenas o ensaio de corpos-de-prova de seção retangular.

Os perfis pultrudados de PRF foram doados por uma empresa conveniada com a UFSC, localizada no município de São José dos Campos/SP. Estes perfis apresentam em sua composição resina do tipo Poliéster Isoftálica e reforços de fibra de vidro (PRFV), em fração de volume de 60 a 70 %.



**FIGURA 4.3 – Dimensões da seção transversal do perfil H pultrudado de FRFV.**

A seção dos perfis foi escolhida em função da disponibilidade da empresa no fornecimento do mesmo, pois a empresa conveniada já possui um molde com estas dimensões, sendo considerada adequada para a proposta desta pesquisa, a partir de alguns estudos de pré-dimensionamento de tabuleiros de passarelas, realizados neste trabalho. Assim será adotado um perfil H de dimensões 101,6 mm x 101,6 mm x 9,525 mm, ou seja, 4" x 4" x 3/8", conforme mostra a Figura 4.3.

Foram ensaiados como vigas simplesmente apoiadas, 02 perfis pultrudados, variando-se o índice de esbelteza, de tal maneira que  $\left(\frac{L}{r}\right)^2$ , seja igual a 100, 200, 300 e 400. Para cada valor de  $\left(\frac{L}{r}\right)^2$  o ensaio foi realizado 3 vezes, totalizando 24 ensaios.

A carga foi aplicada por meio de uma prensa hidráulica marca Mohr & Federhaff AG com capacidade de 200 kN. A flecha no meio do vão foi medida por meio de dois Transdutores

Lineares de Deslocamento (LVDT's), marca HBM WA-20, com campo de leitura de 20 mm, dispostos nas faces laterais do perfil e apoiados em uma régua de alumínio, fixada no perfil na altura da linha neutra sobre os apoios, ambos ligados a um microcomputador por meio de um sistema de aquisição de dados marca HBM/Spider 8 (Software: Catman 4.0) com 4 canais. A carga foi lida por meio de uma célula de carga, marca *Kratos* de capacidade 50 kN, também ligada ao sistema de aquisição de dados.

O objetivo de apoiar os LVDT's na régua de alumínio é para evitar que os deslocamentos externos sejam computados nas leituras dos transdutores. Este sistema fornece maior confiabilidade na aquisição dos resultados, BANTHIA e TROTTIER (1995). Além disso, segundo BANTHIA et al. (1992), o suporte fixado ao corpo-de-prova (perfil) permite a medida direta da deflexão central da viga. De acordo com BARR et al. (1996), o uso deste sistema elimina as deflexões externas resultantes do esmagamento do corpo-de-prova na região dos apoios.

Os pares carga x deslocamento foram medidos automaticamente pelo sistema de aquisição de dados, utilizando-se a média dos valores de deflexão para os dois LVDT's, nas análises posteriores.

Para o ensaio de flexão dos perfis, as distâncias entre os apoios foram determinadas com base nos quatro valores do índice de esbeltez ao quadrado (100, 200, 300 e 400). Estas distâncias encontram-se resumidas na Tabela 4.1. As propriedades geométricas da seção foram determinadas com base nas dimensões fornecidas pelo fabricante dos perfis, e conferidas no laboratório utilizando-se um paquímetro digital. Os cálculos das distâncias e propriedades estão apresentados no Anexo A.

**TABELA 4.1 – Distância entre os apoios dos perfis pultrudados no ensaio de flexão a três pontos, para os 4 valores de índice de esbeltez.**

	Índice de esbeltez ao quadrado: $(L/r)^2$			
	100	200	300	400
Distância entre os apoios (m)	0,41	0,58	0,71	0,82

As máximas deflexões para cada ensaio foram limitadas a  $L/350$ , de modo a permanecerem pequenas o suficiente a fim de se evitar as correções prescritas na ASTM D 790/99. As cargas máximas para cada ensaio foram calculadas levando-se em conta um módulo de elasticidade estimado de 21 GPa, tomado como o limite inferior da Tabela 2.5, para compostos fabricados pelo processo da pultrusão. Estes valores também se encontram calculados no Anexo A.

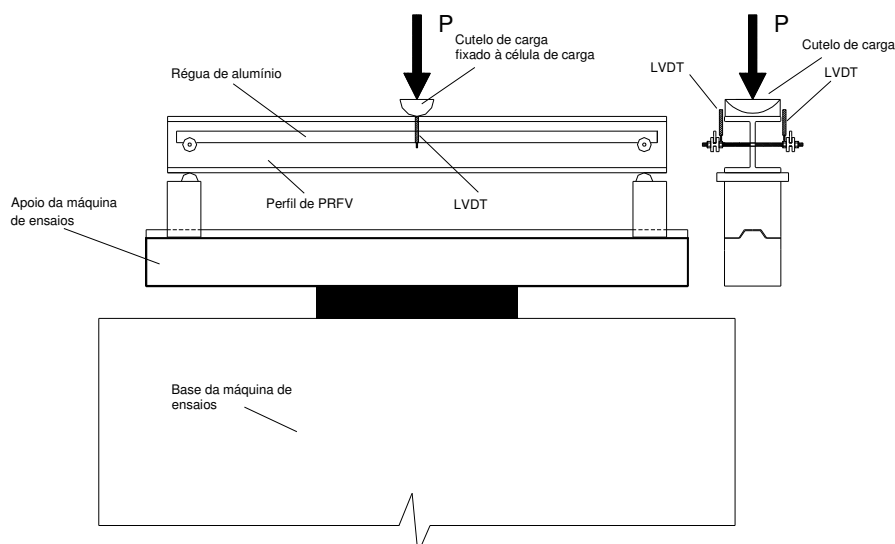


Após a determinação destes dados arbitrou-se que as deflexões sejam tomadas para dois carregamentos: 9 kN e 18 kN, de maneira que o perfil permaneça no regime linear da curva carga-deflexão.

Antes do início do programa experimental, a célula de carga foi calibrada em uma prensa hidráulica marca *Mohr & Federhaff AG*, de capacidade 200 kN, na faixa de leitura de 40 kN com divisão de 0,1 kN. A equação obtida desta calibração foi utilizada no sistema de aquisição de dados para a transformação do sinal elétrico da célula de carga em leitura de carregamento

Os LVDT's da marca HBM WA-20 são facilmente calibrados por meio de correlação direta (sinal elétrico – deslocamento), fornecida no catálogo do produto pelo fabricante.

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Experimentação de Estruturas (LEE) do Departamento de Engenharia Civil da UFSC, sendo o esquema do ensaio apresentado na Figura 4.4.



**FIGURA 4.4 – Esquema de ensaio para os perfis pultrudados submetidos à flexão a 3 pontos.**

O aparato do ensaio impõe que o cutelo de aplicação de carga seja rotulado, reduzindo-se assim possíveis excentricidades no carregamento que possa haver em função de imperfeições no perfil, oriundas do processo construtivo. Desta maneira é possível a aplicação de um carregamento paralelo à alma do perfil e distribuindo igualmente para os dois LVDT's, dispostos no meio do vão em faces opostas do perfil.

Conforme o preconizado pela ASTM D 790-99, o cutelo de carregamento e os apoios devem possuir superfície de forma cilíndrica, sendo o diâmetro do cutelo maior do que os apoios.

A variação na distância entre os apoios, decorrente do ensaio de perfis com diferentes índices de esbelteza, é obtida por meio da movimentação dos apoios sobre uma barra rígida de aço, previamente apoiada e encaixada sobre a máquina de ensaio.

Alguns ensaios preliminares foram realizados com o objetivo de determinar a taxa de carregamento no ensaio. Essa taxa foi calculada em 3,5 kN/min, bastante próxima ao valor adotado por DESKOVIC et al. (1995) de 4 kN/min, sendo portanto adotada nos ensaios desta pesquisa.

#### 4.5. Realização dos Ensaios de Flexão nos Perfis de PRFV

Como já mencionado, o objetivo desta etapa do trabalho é de apresentar uma metodologia para ensaio experimental de vigas submetidas à flexão simples, que permite a determinação simultânea do módulo de elasticidade longitudinal e do módulo de cisalhamento, utilizando-se a metodologia descrita nos parágrafos anteriores.

Desta maneira, os perfis de PRFV foram ensaiados à flexão a três pontos, conforme já mencionado. Na Figura 4.5 é ilustrado a realização do ensaio de um perfil, para dois valores diferentes de  $(L/r)^2$ .



FIGURA 4.5 – Ensaio à flexão dos perfis de PRFV: (a) valor de  $(L/r)^2 = 400$  e; (b) valor de  $(L/r)^2 = 100$ .

Os diagramas carga-deslocamento no meio do vão apresentados nas Figuras 4.6 a 4.9 mostram a média dos valores medidos nos LVDT's nas duas faces do perfil, nas três repetições do ensaio, para cada um dos perfis (corpos-de-prova) ensaiados. Também está apresentada nas figuras a média obtida dos dois corpos-de-prova, que será utilizada no cálculo da rigidez dos perfis de PRFV.

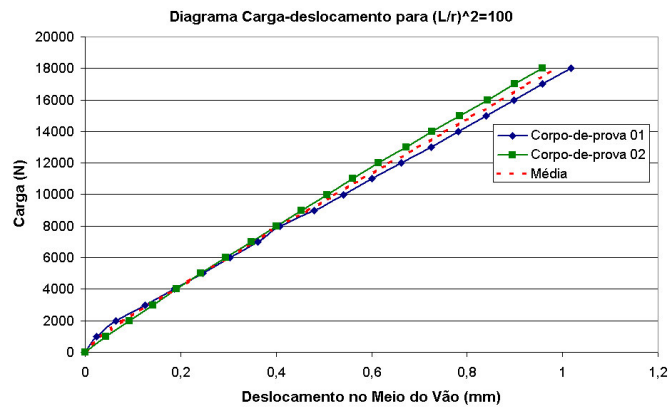


FIGURA 4.6 – Diagrama carga–deslocamento para a relação  $(L/r)^2 = 100$ .

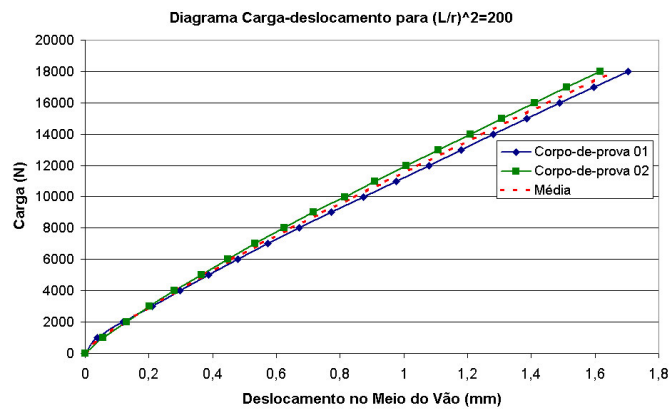


FIGURA 4.7 – Diagrama carga–deslocamento para a relação  $(L/r)^2 = 200$ .

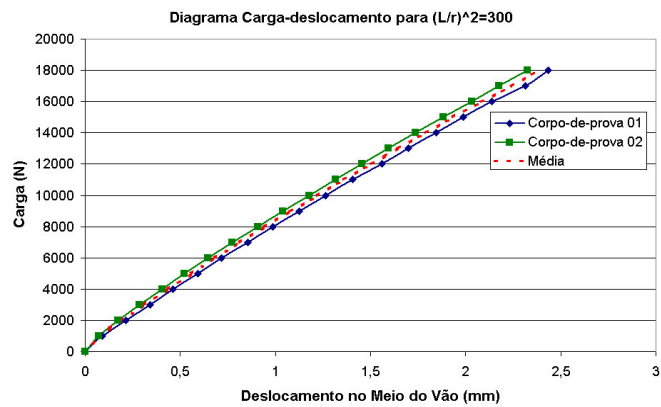


FIGURA 4.8 – Diagrama carga–deslocamento para a relação  $(L/r)^2 = 300$ .

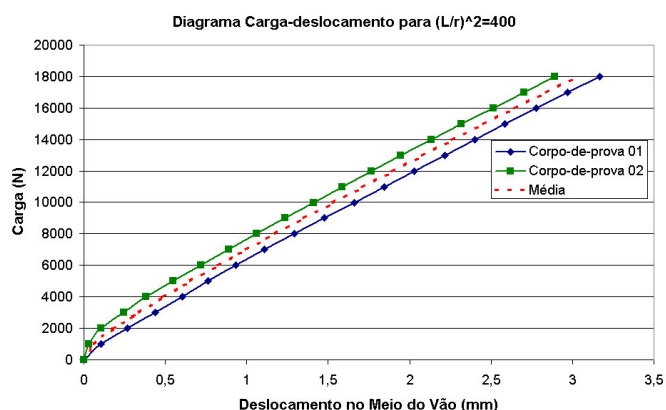


FIGURA 4.9 – Diagrama carga–deslocamento para a relação  $(L/r)^2 = 400$ .

Um diagrama carga-deslocamento com a média das leituras obtidas nos ensaios dos 2 perfis de PRFV e para as quatro variações nos valores de  $(L/r)^2$ , também encontra-se apresentado na Figura 4.10.

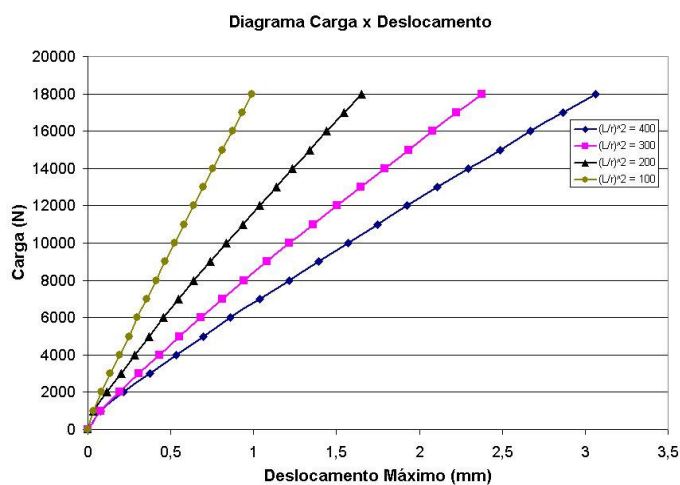
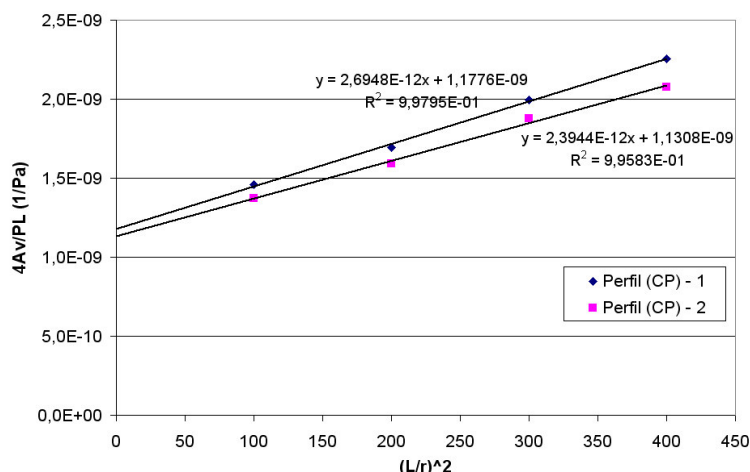


FIGURA 4.10 – Diagrama carga-deslocamento para o ensaio de flexão dos perfis de PRFV, para os quatro valores de  $(L/r)^2$ .

Tomando-se a Expressão (4.7) foi traçado o diagrama ilustrado na Figura 4.11, com a média dos deslocamentos obtidos nos dois perfis de PRFV, para os carregamentos de 9 kN e 18 kN, na quantidade  $4A_v/PL$ , para os quatro valores de  $(L/r)^2$ , ou seja, 100, 200, 300 e 400. Os dados obtidos nos ensaios para o traçados deste diagrama estão apresentados no Anexo B



**FIGURA 4.11 – Diagrama obtido da aplicação da Expressão (4.7), nos resultados do ensaio de flexão dos perfis de PRFV.**

A partir deste gráfico foi realizada uma regressão linear e, utilizando-se as Expressões (4.9) e (4.10), obteve-se os seguintes valores, para cada perfil pultrudado:

**TABELA 4.2 – Propriedades elásticas dos perfis pultrudados ensaiados.**

Programa Experimental	E (GPa)	G (GPa)
Perfil de PRFV (CP) - 1	30,92	2,64
Perfil de PRFV (CP) - 2	34,80	2,69
Média	32,86	2,67

Os valores obtidos para  $E$  e  $G$  aqui calculados são comparados com os obtidos por outros autores, apresentados na Tabela 4.3.

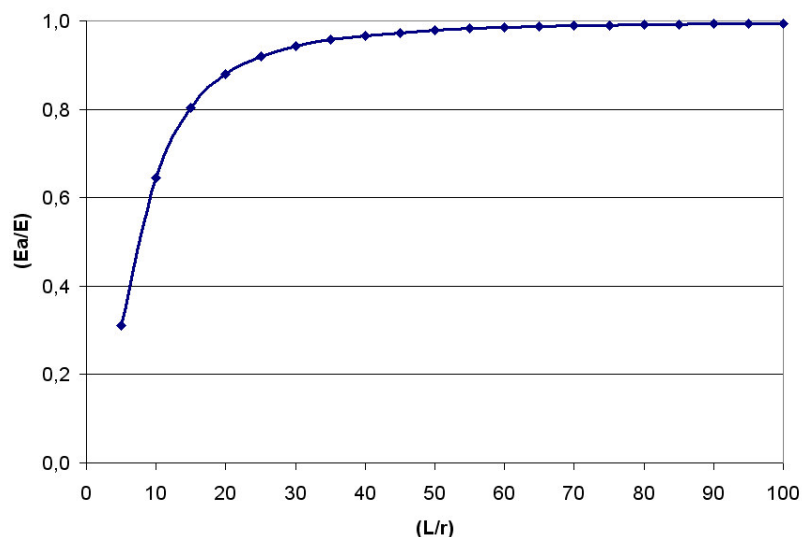
**TABELA 4.3 – Valores resumidos para as rigidezes dos perfis pultrudados, encontrados na literatura.**

Autor	Seção do Perfil/Resina	E (GPa)	G (GPa)
ROBERTS e AL-UBAIDI (2002) ( $V_f$ não disponível)	H 200x200x10/Poliéster	18,9	2,81
	H 150x150x10/Poliéster	23,5	2,74
BANK (1989) ( $V_f$ de 40 a 50%)	H 102x102x6,35/Poliéster	22,75	2,30
	H 102x102x6,35/Viniléster	21,86	2,70

Na Figura 4.12 é apresentada a relação  $E_a/E$  em função do índice de esbeltez  $(L/r)$ , a partir da Expressão (4.8) e utilizando a relação  $E/G$  obtida neste trabalho. Como pode ser visto, para baixos valores de  $(L/r)$  o módulo de elasticidade aparente é significativamente menor do que o módulo de elasticidade longitudinal do composto.

Nesta figura também pode ser visto que um índice de esbeltez de valor igual a 60 é necessário nos perfis para que estes apresentem uma diferença menor que 1,5 % no módulo de elasticidade à flexão ( $E_a/E$ ) e um índice de 80 para esta diferença reduzir para 0,85 %. É interessante notar que o valor necessário de  $(L/r) = 60$  pode ser comparado com a restrição

para corpos-de-prova sólidos de  $(L/h) = 60$ , preconizada pelas Normas Americanas ASTM D 790 (1999) e ASTM D 6272 (1998).

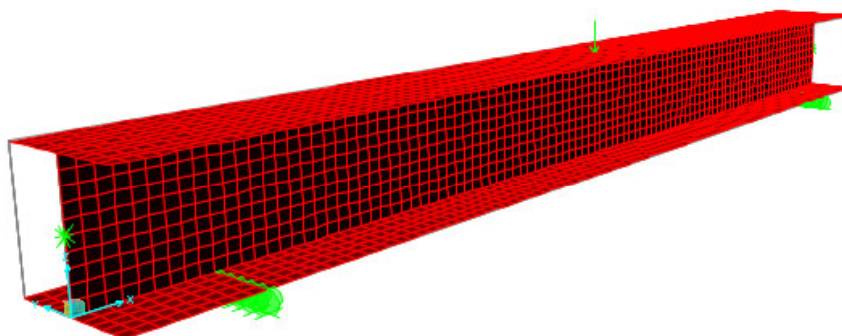


**FIGURA 4.12 – Relação entre o módulo de elasticidade aparente e o módulo de elasticidade do PRFV em função do índice de esbeltez dos perfis.**

#### 4.6. Análise Numérica pelo Método dos Elementos Finitos

Neste trabalho, desenvolveu-se também uma modelagem numérica por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) para verificar os deslocamentos encontrados nos ensaios, para os quatro valores de  $(L/r)^2$ .

A modelagem foi realizada considerando o material elástico-linear e ortotrópico. O modelo foi analisado por meio do programa computacional SAP2000 no Laboratório de Análise de Estruturas (LAE), do Departamento de Engenharia Civil da UFSC.



**FIGURA 4.13 – Malha de elementos finitos utilizada no perfil pultrudado de PRFV.**

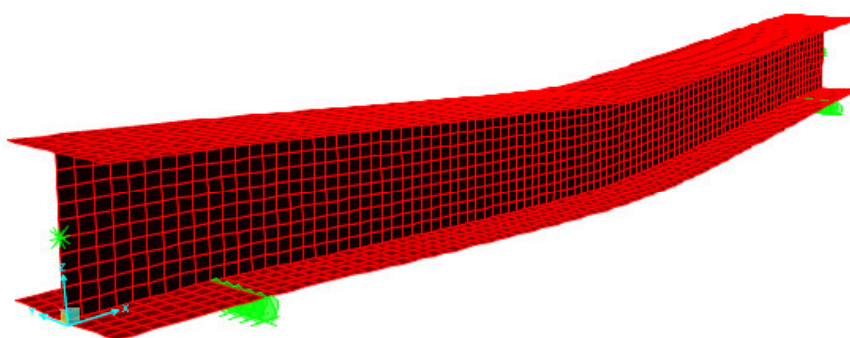
Foi adotada uma malha com elementos planos de casca, de 4 nós, todos quadrados com lados de 0,01 m, Figura 4.13. As propriedades elásticas do perfil pultrudado foram estimadas por meio da micromecânica dos materiais compostos e pela Teoria Clássica da Laminação (TCL), utilizando-se as Expressões e referências apresentadas no Capítulo 3. As propriedades mecânicas adotadas para a fibra de vidro e resina foram fornecidas pelos fabricantes. O perfil é composto de lâminas de “rovings” de fibra de vidro com uma fração volumétrica de fibra de 60 % e de lâminas de filamento contínuo. Os valores das propriedades equivalentes dos laminados no perfil (tanto para as mesas como para a alma) e das propriedades de cada lâmina estão resumidas na Tabela 4.4. O cálculo destes valores podem ser encontrados no Anexo C.

**TABELA 4.4 – Propriedades elásticas das lâminas no perfil de PRFV.**

Material	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$G_{12}$ (GPa)	$\nu$
Manta de Filamentos Contínuos/Resina	7,00	7,00	2,50	0,401
Filamentos (Rovings)/Resina	49,24	6,56	2,39	0,272
Laminado	35,93	7,02	2,43	0,319

onde 1 é a direção longitudinal e 2 a direção transversal às fibras.

Os apoios inferiores do dispositivo de ensaio foram simulados restringindo-se os deslocamentos verticais na base dos perfis de PRFV. A carga foi aplicada na direção vertical, distribuída uniformemente sobre a mesa superior, no centro do perfil. Na Figura 4.14 é apresentada a configuração deformada para o perfil com  $(L/r)^2 = 400$ .



**FIGURA 4.14 – Configuração deformada do perfil pultrudado de PRFV.**

#### 4.7. Comparação entre os Resultados Analíticos, Numéricos e Experimentais

A Teoria de Viga de Timoshenko, utilizando-se as propriedades elásticas obtidas por meio da TCL, também foi utilizada no cálculo dos deslocamentos dos perfis de PRFV. Apresentam-se a seguir, nas Figuras 4.15 a 4.18, gráficos carga-deslocamento no meio do vão, comparando-se os resultados obtidos nos ensaios experimentais, método dos elementos finitos e teoria de viga.

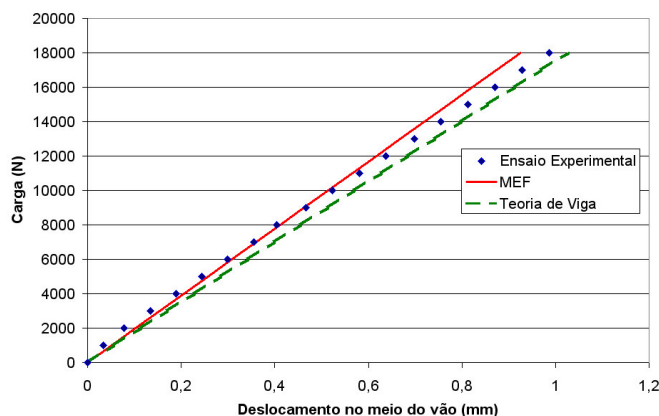


FIGURA 4.15 – Diagrama carga–deslocamento comparativo entre os valores fornecidos pelo ensaio experimental, método dos elementos finitos e teoria de viga, para a relação  $(L/r)^2 = 100$ .

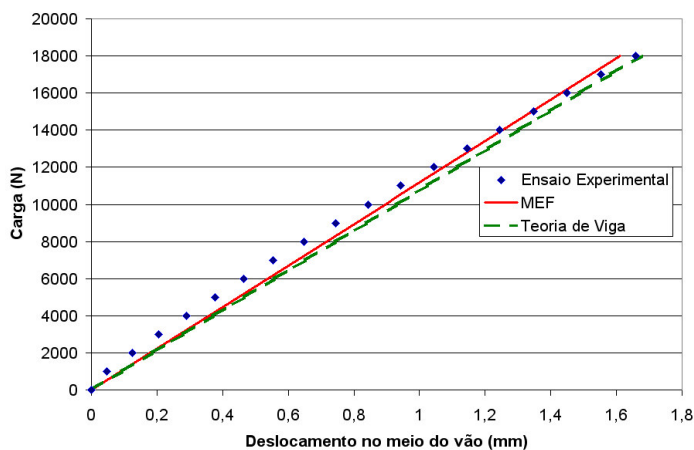


FIGURA 4.16 – Diagrama carga–deslocamento comparativo entre os valores fornecidos pelo ensaio experimental, método dos elementos finitos e teoria de viga, para a relação  $(L/r)^2 = 200$ .

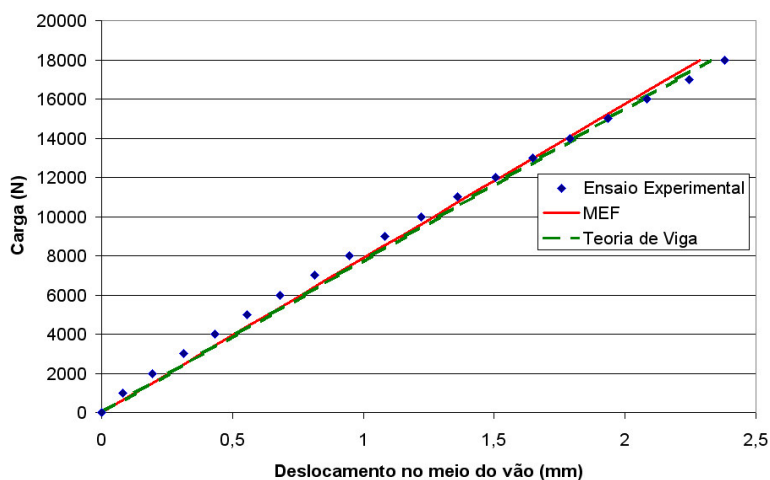
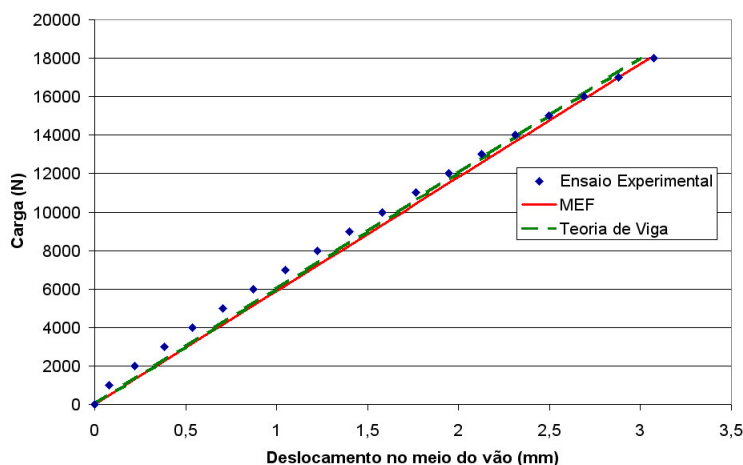


FIGURA 4.17 – Diagrama carga–deslocamento comparativo entre os valores fornecidos pelo ensaio experimental, método dos elementos finitos e teoria de viga, para a relação  $(L/r)^2 = 300$ .





**FIGURA 4.18 – Diagrama carga–deslocamento comparativo entre os valores fornecidos pelo ensaio experimental, método dos elementos finitos e teoria de viga, para a relação  $(L/r)^2 = 400$ .**

Observa-se das figuras que tanto os resultados analíticos da Teoria de Viga de Timoshenko como os numéricos pelo MEF, utilizando-se as propriedades mecânicas a partir da Teoria Clássica de Laminação, fornecem uma ótima aproximação dos resultados obtidos experimentalmente.

Observa-se também que para a relação  $(L/r)^2 = 100$ , ou seja, para o menor vão utilizado ( $L=0,41\text{ m}$ ) a rigidez do perfil obtido pelo MEF é um pouco superior à obtida pela Teoria de Viga, devido às bielas de compressão que ocorrem em vãos curtos, o que não pode ser capturado pela Teoria de Viga. Para vãos maiores a rigidez obtida pelos dois métodos, analítico e numérico, são quase coincidentes.

Além disso, os resultados obtidos nos ensaios experimentais encontram-se bastante próximos aos valores fornecidos pelo MEF e Teoria de Viga de Timoshenko.

#### 4.8. Considerações Complementares

Os ensaios de flexão nos perfis pultrudados de PRFV demonstraram, como esperado, o comportamento elástico linear do material composto avançado, para deflexões dentro do Estado Limite de Serviço.

Os módulos de elasticidade longitudinal e de cisalhamento foram extraídos de um gráfico elaborado a partir de expressões provenientes da Teoria de Viga de Timoshenko (TVT), obtendo-se valores satisfatórios, em comparação com os obtidos por outros autores. No entanto, é importante ressaltar que o valor superior encontrado neste trabalho para o módulo de elasticidade longitudinal na flexão,  $E$ , se deve ao fato de que os perfis aqui ensaiados

apresentam uma fração de volume de fibra ( $V_f$ ) maior do que as frações de volume utilizadas nos perfis de PRFV das publicações de outros autores.

A relação E/G obtida nestes ensaios fornece um valor igual a 12,30, ou seja, superior aos valores típicos apresentados por outros autores. Possivelmente este fato se deve também à utilização de uma fração de volume de fibra mais elevada nos perfis ensaiados, o que levou a uma maior anisotropia do perfil pultrudado de PRFV. Observa-se que esta relação também é bastante superior ao valor fornecido pela Teoria Clássica da Laminação. Ressalta-se que a TCL fornece bons resultados, em relação aos ensaios experimentais em corpos-de-prova (*coupons*), para o caso de fabricação por *wet lay-up*, mas o mesmo não ocorre para o processo de fabricação por pultrusão em função da heterogeneidade do perfil, BANK et al. (1995). Além disso, o valor encontrado experimentalmente para o módulo de elasticidade (E) está bastante próximo ao calculado pela TCL, o que não ocorre para o módulo de cisalhamento (G).

Os resultados dos deslocamentos obtidos nos ensaios demonstram a importância de considerar o efeito da deformação por cisalhamento no cálculo das flechas nos perfis de PRF.

A comparação entre o método analítico da Teoria de Viga de Timoshenko, o Método dos Elementos Finitos, utilizando-se as propriedades elásticas equivalentes a partir da Teoria Clássica da Laminação, e os ensaios experimentais mostrou uma ótima aproximação entre os resultados numéricos e analíticos em relação aos experimentais. Conclui-se assim, que para o projeto de vigas com este perfil pultrudado de seção  $H$ , a Teoria de Viga de Timoshenko pode ser utilizada para avaliação da rigidez e verificação das flechas em serviço.

Ressalta-se a importância da verificação dos modos de instabilidade local e global no projeto de vigas com seções de paredes finas. As verificações no estado limite último também devem ser realizadas, no entanto, devido aos valores elevados de resistência dos laminados de PRFV, costuma-se governar o projeto a limitação das flechas ou a instabilidade do perfil.

Ressalta-se ainda que os procedimentos das normas norte-americanas ASTM D 790 (1999) e ASTM D 6272 (1998) para o ensaio de flexão dos materiais compostos avançados, que preconizam os critérios para a inclusão do efeito da deformação por cisalhamento, podem ser empregados, tomando-se, preferencialmente, no caso de perfis de paredes finas a relação  $(L/r) = 60$ , ao invés da restrição para corpos-de-prova sólidos de materiais compostos de  $(L/h) = 60$ .

No próximo capítulo será apresentado o estudo da influência da adição de fibras curtas de polipropileno ao concreto, pois se pretende substituir, na laje mista, a armadura de distribuição metálica por fibras curtas poliméricas para reduzir os efeitos da fissuração no concreto devido à retração plástica.

## 5. INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO NA FISSURAÇÃO POR RETRAÇÃO PLÁSTICA

### 5.1. Introdução

O concreto é classificado como um material composto, formado por duas fases principais, uma fase contínua resultante da mistura do cimento com a água e uma fase descontínua composta pelos agregados (brita e areia). Este material, definido como concreto convencional, em função de sua fragilidade não absorve os efeitos da retração.

A retração é uma das principais causas da fissuração do concreto. Em virtude deste fato o seu controle é de fundamental importância, pois a sua ocorrência está ligada diretamente à durabilidade do concreto.

De acordo com PINTO JÚNIOR (2001), muitos fatores podem influenciar na retração, tais como: condições ambientais, tipologia, dimensão máxima e propriedades físicas dos agregados, proporção dos materiais que compõem a mistura (principalmente a quantidade de água), microfissuras na interface pasta-agregado, a cura do concreto e outros.

Ainda no estado fresco podem ocorrer fissuras de grande profundidade ou superficiais no concreto, em função da retração plástica, a qual é influenciada por condições ambientais, tais como, umidade relativa do ar, temperatura ambiente e velocidade do vento.

As fissuras por retração plástica ocorrem quando a taxa de evaporação da água do concreto, ainda no estado fresco, que ocorre antes da pega do concreto é maior do que a taxa de exsudação, quando as partículas sólidas ainda dispõem de mobilidade umas em relação às outras. Na retração plástica o surgimento das fissuras ocorre também em consequência de restrições à retração uniforme da pasta cimentícia como, por exemplo, sobre as armaduras e partículas grandes de agregados, ou quando a retração de uma grande área horizontal torna-se mais difícil do que na direção vertical.

Segundo SOROUSHIAN et al. (1995), estas restrições estão sempre presentes, ambas internamente ou externamente, resultando das condições de apoio, das armaduras, ou da secagem não uniforme. Estas restrições induzem o aparecimento de tensões de tração que se aproximam da resistência à tração do concreto, causando desta maneira a fissuração.

A fissuração por retração plástica aumenta a rede de vazios permeáveis, expondo maiores áreas superficiais dos concretos aos agentes ambientais, reduzindo assim sua vida útil, SOROUSHIAN et al. (1995).

É recomendável, para a minimização de seus efeitos, em situações ambientais desfavoráveis, a proteção do concreto contra o sol e vento, assim como uma cura apropriada imediatamente após o lançamento do concreto.

A retração no estado endurecido ou por secagem (hidráulica), por outro lado, é a retração da pasta de argamassa ou concreto, após a pega do cimento. Este fenômeno consiste da retração irreversível decorrente da variação de umidade dos concretos.

No caso da retração por secagem, se não forem tomadas providências que assegurem a perfeita cura do concreto, isto é, se não for impedida a evaporação de água nele contida, os efeitos da retração serão muito mais significativos, podendo o concreto apresentar fissuras ainda em baixas idades, PINTO JÚNIOR (2001).

De modo geral, segundo BASTOS (2001), a retração plástica e por secagem podem causar defeitos irreversíveis no concreto, em consequência da fissuração, aumentando a permeabilidade dos concretos e diminuindo a durabilidade do material.

A incorporação de fibras curtas, de baixo módulo de elasticidade, aos concretos não impede o aparecimento de fissuras causadas pela retração por secagem. Estas, só podem ser evitadas, segundo PINTO JÚNIOR (2001), por meio de um processo de cura adequado. Nesta situação, a introdução de fibras na mistura, apenas limitam a abertura das fissuras nas primeiras idades. Por outro lado, a adição de fibras curtas nos concretos podem controlar, ou mesmo eliminar os efeitos prejudiciais da fissuração por retração plástica.

Apesar de existirem normas americanas e japonesas, os Concretos Reforçados com Fibras (CRF) ainda não possuem métodos de ensaio mundialmente aceitos para seu controle. Não existe consenso para a avaliação da sua capacidade portante pós-fissuração, tão pouco para avaliar a fissuração por retração restringida.

No caso específico das fibras de polipropileno, nos últimos anos foram propostas inúmeras metodologias para avaliação de seu potencial de controle de fissuração causada por retração. No entanto estes procedimentos partem de princípios distintos, evidenciando a ausência de consenso entre pesquisadores que se dedicam a este uso, TANESI (1999).

Este Capítulo tem como objetivo o estudo da adição de fibras curtas de polipropileno e a sua concentração para avaliar a redução da fissuração por retração plástica no concreto.

Este estudo faz-se necessário, pois pretende-se substituir na capa de concreto existente na laje mista em estudo, a malha de aço comumente empregada para o controle da fissuração, pela adição de fibras de polipropileno.

A seguir é apresentado um breve resumo dos estudos já desenvolvidos nesta área e também alguns conceitos.

## 5.2. O Concreto Reforçado com Fibras

São apresentados neste item uma breve introdução sobre o concreto reforçado com fibras e o seu mecanismo de ação na mistura cimentícia.

### 5.2.1. Generalidades

O termo Concreto Reforçado com Fibras (CRF) é definido pelo Committee ACI 116R – Cimento e Tecnologia do Concreto, como o concreto que contém em sua mistura fibras orientadas aleatoriamente, ZOLLO (1997).

O início dos estudos relacionados ao comportamento destes concretos deu-se nos anos 50, com a utilização das fibras de aço e vidro, BENTUR e MINDESS (1990). As fibras poliméricas, por outro lado, foram empregadas apenas em 1965, nos estudos de Goldfein, PINTO JÚNIOR (2001).

Atualmente as fibras poliméricas mais empregadas são as fibras de polipropileno. No entanto cabe aqui salientar que outras fibras poliméricas são empregadas como reforço de matrizes cimentícias, tais como o nylon, o poliéster, o polietileno e a poliamida. Todas estas fibras citadas apresentam-se eficientes na melhoria da resistência do concreto ao impacto. O nylon, por sua vez, é a fibra que apresenta o melhor desempenho neste aspecto, porém a sua mistura é, segundo BENTUR e MINDESS (1990), mais difícil que as demais fibras.

Nos Estados Unidos e na Europa a utilização dos concretos reforçados com fibras de polipropileno é bastante comum, principalmente em pavimentos industriais, onde estas fibras mesmo adicionadas em baixos teores, isto é, 0,1 % em volume, substituem as telas metálicas, destinadas apenas ao controle da fissuração por retração, TROTTIER et al. (1997).

Nos pavimentos, segundo os próprios autores, as operações de acabamento da superfície e a grande área exposta à evaporação facilitam o surgimento destas fissuras, as quais podem atingir toda a espessura do pavimento.

O volume empregado de fibras de polipropileno varia normalmente entre 0,1 % a 0,3 %, em volume, quando o emprego visa principalmente o controle da fissuração nas primeiras horas do lançamento do concreto ou argamassa.

### 5.2.2. Os Mecanismos de Ação das Fibras

Observando-se os valores das deformações de ruptura das fibras e das matrizes cimentícias, pode-se notar que as deformações de ruptura das fibras apresentam valores três vezes maiores que a deformação da matriz. Assim, antes que as fibras estejam solicitadas no seu limite de deformação, a matriz já estará fissurada, HANNANT (1978) apud PINTO JÚNIOR (2001).

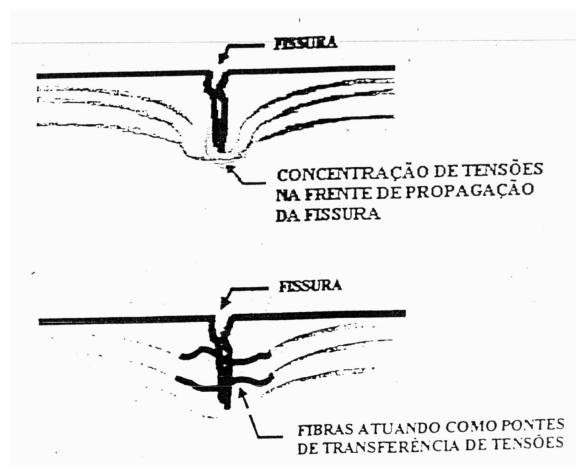
De acordo com BENTUR e MINDESS (1990), após a fissuração da matriz as fibras atuam como uma ponte de transferência de tensões através das fissuras, sendo estas então arrancadas da matriz. Esse é o principal mecanismo de reforço proporcionado pelas fibras. A transferência de tensão da matriz para a fibra ocorre pela combinação de dois mecanismos básicos: *a transferência elástica e a transferência por atrito*.

No caso da transferência elástica, a matriz e a fibra estão aderidas entre si e possuem compatibilidade de deformações, isto é, não há deslocamentos relativos entre a fibra e a matriz. É desenvolvida portanto uma tensão de cisalhamento na interface fibra-matriz, que distribui a solicitação entre elas.

Este mecanismo é dominante enquanto as tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz não superaram o limite de resistência ao cisalhamento, não ocorrendo portanto deslocamento, o que se dá na etapa de pré-fissuração do composto. Até este ponto a fibra não atua como ponte de transferência de tensões através da fissura, PINTO JÚNIOR (2001).

Após a fissuração da matriz, o mecanismo de transferência de tensões passa gradualmente de elástico para o mecanismo por atrito. Neste momento, a tensão de cisalhamento por aderência supera a resistência ao cisalhamento da interface, provocando desta maneira o deslocamento da fibra e o posterior escorregamento e arrancamento da mesma.

Assim, ocorrendo o deslocamento relativo entre a fibra e a matriz, as tensões são transferidas por meio do atrito. Estas tensões de cisalhamento por atrito são admitidas como uniformemente distribuídas ao longo da interface fibra-matriz. A partir deste momento, a fibra age como uma ponte de transferência de tensões, como ilustrado na Figura 5.1.



**FIGURA 5.1 – Mecanismo da ação das fibras curtas. Fonte: PINTO JÚNIOR (2001).**

### 5.3. Fissuração por Retração Plástica em Placas de Concreto

São apresentadas algumas das principais pesquisas relacionadas com o estudo da fissuração por retração plástica em lajes de concreto. Estes trabalhos estão apresentados em ordem cronológica, evidenciando-se de forma resumida os programas experimentais utilizados e as principais conclusões, ligadas ao tema deste trabalho.

KRAAI (1985), descreveu um ensaio para a determinação do potencial de fissuração por retração plástica em placas de concreto. O autor submeteu duas placas, de dimensões 600 mm x 900 mm (largura x comprimento) com 20 mm de espessura, simultaneamente a um conjunto de condições ambientais severas, de maneira a induzir a fissuração no concreto.

A diferença entre as duas placas estava na adição, em uma delas, de fibras de polipropileno na mistura para estudar os efeitos do potencial de fissuração, em função da presença das fibras. As fibras foram adicionadas em uma taxa de 0,7 %, em peso de cimento.

A grande área da superfície exposta da placa permite, segundo o autor acelerar a taxa de evaporação da água e, assim, a retração da pasta cimentícia. Além disso, não foi empregado na mistura agregado graúdo em função da pequena espessura da placa. A relação a/c (água/cimento) empregada foi de 0,70.

De maneira a garantir o movimento da água livre da mistura apenas no sentido ascendente, as faces da fôrma foram cobertas com um filme de polietileno, evitando-se desta maneira a absorção da água pela fôrma. Este filme, afirma Kraai, também permite o livre deslocamento da massa cimentícia na face inferior da fôrma, apresentando assim, ausência de restrição na face inferior.

Além disso, uma malha rígida foi moldada em forma de L, com 12 mm de largura de aba e instalada ao longo das bordas do perímetro interno das fôrmas. A restrição ao movimento da massa cimentícia, gerada por esta malha, em função da retração por secagem contribui para a formação das fissuras nas placas.

Após o término da mistura, as duas placas foram expostas a um vento de velocidade 19,2 km/h, gerado a partir de um exaustor localizado próximo à placa. O início das fissuras ocorreu após 1 hora de ensaio, sendo que a maioria das fissuras ocorreu dentro das primeiras 4 horas.

A avaliação das fissuras nas placas ocorreu 24 horas após o início dos ensaios. Segundo o autor, após este período o surgimento de novas fissuras pode ser considerado desprezível e não ser levado em consideração. Ao mesmo tempo mais numerosas do que as fissuras nas 4 horas de ensaio. Além disso, algumas placas foram avaliadas em 3 e 6 meses

após o término do ensaio e foi constatado que não houve mudanças significativa nos padrões de fissuração.

Os ensaios indicaram uma redução significativa na fissuração das placas devido à presença das fibras de polipropileno na mistura.

SHAELES e HOVER (1988) estudaram a fissuração por retração plástica em painéis (placas) de argamassa, de modo a simular a fissuração em lajes de concreto, utilizando-se os procedimentos empregados por Kraai, em 1985.

O objetivo do estudo dos autores foi investigar a influência de diferentes traços e as operações de construção no desenvolvimento das fissuras por retração plástica, em corpos-de-prova expostos a condições ambientais controladas.

A velocidade das operações de nivelamento foram de 10 m/min em alguns painéis, e de maneira mais lenta em 1 m/min em outros, para avaliar o efeito da fissuração em função da velocidade do nivelamento.

A fissuração por retração plástica desenvolve-se quando a taxa de evaporação na superfície do concreto ultrapassa os 1 kg/m<sup>2</sup>/h. Este valor limite crítico também é sugerido pelo COMMITTEE 305 (1991). Porém, segundo os próprios autores, algumas normas sugerem que as fissuras por retração plástica podem ser esperadas em taxas de evaporação de somente 50 % deste valor.

Para aproximar as proporções geométricas e em particular a relação superfície-área-volume de lajes de concreto usuais, os painéis foram confeccionados com dimensões de 610mmx910mm (largura x comprimento) e 20mm de espessura.

Com a adoção desta espessura, segundo os autores, o uso de agregados graúdos na mistura poderia introduzir restrições ao movimento da massa irreal, além de uma descontinuidade na mistura. Desta maneira Shaeles e Rover utilizaram argamassa, com areia de módulo de finura igual a 3,0.

A relação a/c variou de 0,5 a 0,7 e o traço cimento: areia foi trabalhado com os seguintes valores 1:2,2 (misturas ricas) e 1:3,3 (misturas pobres).

Enquanto que nas pesquisas de KRAAI (1985) foi utilizada uma malha rígida para promover restrição à movimentação da massa, Shaeles e Hover empregaram uma barra de metal, fixada em todo o perímetro das laterais das placas.

A temperatura, a umidade relativa do ar e velocidade do vento foram controladas para simular uma concretagem em condições climáticas quentes. Assim, as temperaturas médias variaram de 25 a 35°C, com umidade relativa variando de 10 a 25%. Para acentuar o efeito da velocidade do vento foram empregados exaustores que geraram velocidades de vento de 11 a 13 km/h, medidas a 150 mm acima da superfície da placa.



Uma modificação do experimento original de Kraai foi à instalação de uma placa vertical, entre as placas, para prevenir não uniformidades de interferência no fluxo de vento entre os dois ventiladores.

Para monitorar a perda de água na mistura durante o ensaio, dois painéis de 300 x 300 mm foram colocados adjacentes às placas de argamassa e frequentemente pesados.

Os exaustores foram ligados 8 min. após completada as operações de nivelamento, o qual corresponde a 30 min. após o início da mistura. Em geral, nas misturas mais sucessíveis à fissuração por retração plástica, as fissuras iniciaram entre 45 a 100 minutos após o funcionamento dos exaustores e continuaram desenvolvendo-se até mais ou menos 2 hs e 30 min.

Embora fosse esperada uma distribuição aleatória das fissuras, tal como observado na secagem de solos, os autores constataram que a orientação preferencial das fissuras ocorria na direção paralela da operação de nivelamento. Os autores acreditam, com base nos ensaios, que a ação do nivelamento rasga a superfície do concreto, ou de outro modo, impõem tensões de tração na superfície que mais tarde somam-se as tensões por retração, causando a formação das fissuras na direção preferencial.

Os autores concluíram que a velocidade de nivelamento apresenta forte influência no surgimento das fissuras. Além disso, a direção na placa desta operação também se apresenta de grande importância na orientação destas fissuras.

BALAGURU (1994), avaliou diferentes métodos de ensaio que utilizavam placas retangulares, para analisar o efeito da contribuição de fibras de aço e sintéticas na redução da fissuração por retração plástica.

As dimensões das placas foram 600x900x19 mm, 900x900x19 mm, 900x900x50 mm e 560x356x100 mm (largura x comprimento x espessura), utilizando diferentes tipos de restrições ao longo do perímetro. Os esquemas destes detalhes podem ser encontrados detalhadamente na publicação de Balaguru.

Os detalhes construtivos da placa seguiram as recomendações de Kraai, em 1985. Um dos tipos de fibras utilizado no trabalho de Balaguru foi a fibra de polipropileno, com comprimento de 19 mm, do tipo fibrilada.

Após a moldagem, as placas foram submetidas a uma velocidade de vento de 19 a 22 km/h. Especialmente para a placa de 50 mm de espessura foi adotado um túnel de vento e construído um exaustor de elevada velocidade, capaz de gerar ventos de 51 km/h.

As fissuras começaram a se desenvolver em 3 hs e 30 min, após o início da mistura dos materiais. Na maioria dos casos, o processo de fissuração encerrava-se após 8 hs de ensaio. A largura e comprimento das fissuras foram medidas após 24 hs do início do ensaio.

Este longo período foi adotado, segundo o autor, para ter certeza de que todas as fissuras já haviam se desenvolvido e estabilizado.

A temperatura durante a realização dos ensaios variou na faixa de  $22\pm 1^{\circ}\text{C}$  e a umidade relativa do ar, ficou na faixa de  $50\pm 3\%$ . As principais conclusões relatadas pelo autor estão relacionadas a seguir.

Os ensaios realizados com elevada velocidade do vento, isto é 51 km/h, não produziram melhora significativa na formação de fissuras, que justifique o alto custo dos equipamentos empregados, sendo portanto adotada a velocidade de 19 km/h nos demais ensaios.

Além disso, as fibras de polipropileno em adições de  $0,9\text{ kg/m}^3$  apresentaram uma redução de fissuração de 91 %. Em geral, as fibras sintéticas contribuíram para a redução da fissuração no concreto até mesmo em baixas frações de volume como por exemplo, 0,1 %.

SOROUSHAN et al. (1995) estudaram os efeitos da adição de fibras curtas de polipropileno na fissuração por retração plástica em placas de concreto. Os autores utilizaram diferentes volumes de fibras de 0,05 à 0,20 %. Além disso avaliaram a fissuração para duas diferentes velocidades de nivelamento 2,7 e 11 m/min. O efeito das operações de acabamento na incidência de fissuras e a direção do nivelamento também foi estudado.

Os autores trabalharam com concreto, utilizando agregado graúdo de diâmetro 13mm, agregado miúdo com módulo de finura 3,0. O traço utilizado na pesquisa foi de 1:2,5:2,0:0,47 (cimento:brita:areia:a/c). O ensaio foi conduzido sob condições ambientais com temperatura de 24 a  $27^{\circ}\text{C}$ , umidade relativa do ar de  $50\pm 5\%$  e velocidade do vento de 12,8 km/h.

O procedimento de ensaio foi o mesmo proposto inicialmente em KRAAI (1985) e refinado por SHAELES e HOVER (1988).

Os autores relatam que o início de formação das fissuras por retração plástica foi monitorado visualmente e que, em geral, as fissuras iniciaram sua formação no intervalo de 40 a 120 min, após o início do funcionamento dos exaustores. Estes foram desligados após 5 horas de ensaio, sendo as larguras e comprimentos das fissuras medidas com uma lente óptica.

A taxa de evaporação de água do concreto encontrada por Soroushan variou de 0,5 a  $0,65\text{ kg/m}^2/\text{h}$ , enquanto que a taxa de evaporação da água livre foi o dobro desta quantidade.

As análises de comparação dos dados obtidos dos ensaios indicaram que em todos os casos, a área total das fissuras nos concretos com fibras foi significativamente menor do que no caso do concreto sem fibras. Exemplo, disso foram as fibras de polipropileno que reduziram a área total das fissuras por retração plástica em 95 %, nas condições mais desfavoráveis, ou seja, elevada velocidade de nivelamento, sem operação de acabamento.

Os autores concluíram que as frações fibras de 0,05%, 0,1 % e 0,2 %, em volume, não apresentam diferença significativa, com 95% de confiabilidade, na redução da área de fissuras por retração plástica.

Além disso, os autores constataram que as fibras de polipropileno reduzem a área total da fissuração plástica mesmo em porcentagens de 0,1 % de fibras, em volume.

WANG et al. (2001) estudaram a influência da adição de diferentes tipos de fibras, inclusive polipropileno, e de cinza leve na fissuração por retração plástica do concreto.

Os autores utilizaram na mistura com fibras de polipropileno as seguintes proporções: relação  $a/c=0,55$ , 30 % de cinza leve ultrafina, em peso e 0,1 % de fibras, em volume. Foram moldadas placas com dimensões de 100x100x8 mm (comprimento x largura x espessura), cobertas com uma camada de filme de polietileno. Uma lixa foi utilizada no fundo das placas para restringir os movimentos da pasta de cimento. As placas foram colocadas em um local com temperatura controlada de 40°C, velocidade do vento de 3 a 5 km/h e umidade relativa do ar de aproximadamente 18 %. O início da fissuração nas placas ocorreu após 2 h de ensaio.

Os autores concluíram que a utilização de fibras de polipropileno reduziu a área total de fissuração em 43 % e 49 %, para teores de fibras de 0,1 e 0,5 %, respectivamente.

NAAMAN et al. (2005) avaliaram o efeito da adição de diferentes fibras de: polipropileno, polivinil acetato (PVA), polietileno de alta densidade (PEAD), carbono e fibras metálicas, nas características da fissuração por retração plástica do concreto, nas primeiras 24 horas de idade do concreto, variando-se o volume de fibras de 0,05 % a 0,4 %.

Os resultados experimentais mostraram que a fração de volume e o diâmetro das fibras são os dois principais parâmetros que mais influenciam no controle da fissuração por retração plástica.

Com base nestes estudos e outras bibliografias consultadas, deu-se início ao programa experimental proposto nesta tese, com a finalidade de avaliar a redução da fissuração por retração plástica, em placas de concreto. Os procedimentos de ensaio e as conclusões obtidas estão apresentadas nos itens a seguir.

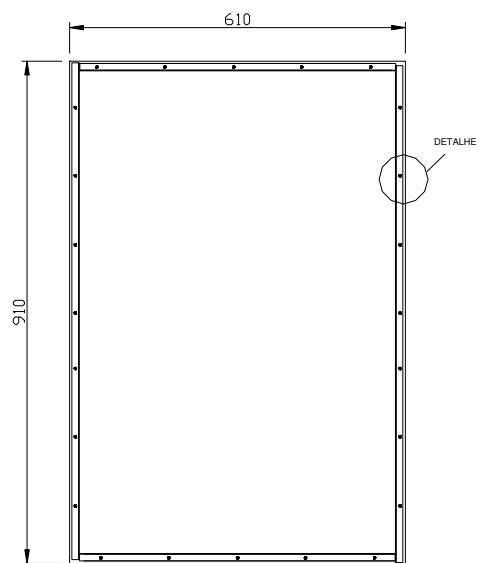
#### **5.4. Programa Experimental**

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), do Curso de Engenharia Civil da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). O

programa de ensaios utilizado neste trabalho foi baseado nos estudos de KRAAI (1985), desenvolvido para avaliar o efeito da adição de fibras curtas na redução da fissuração por retração plástica em lajes de concreto. Outros autores como SHAELES e HOVER (1988) e BALAGURU (1994), também utilizaram este procedimento de ensaio nas suas pesquisas para avaliar a fissuração por retração plástica em placas de concreto.

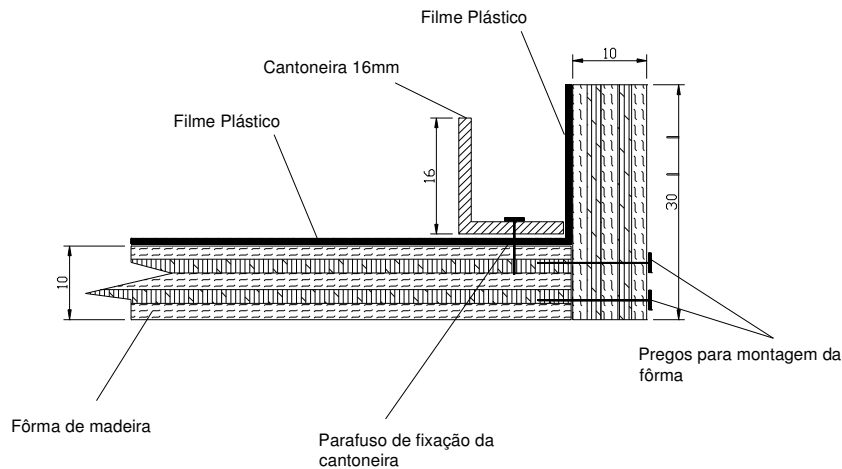
Assim, tomando-se como referência estes e outros trabalhos citados anteriormente, confeccionou-se placas de dimensões 910 mm x 610 mm (comprimento x largura), conforme apresentado na Figura 5.2.

Além disso, com o objetivo de obter uma proporção geométrica aproximada da relação superfície-área-volume de uma laje usual de concreto, as placas foram confeccionadas com uma espessura de 20 mm. Em virtude deste fato o uso de agregado graúdo na mistura poderia introduzir restrições ao movimento da massa irreal e descontinuidade na mistura. Desta maneira as placas foram confeccionadas com argamassa, ao invés de concreto.



**FIGURA 5.2 – Fôrma da placa de argamassa do programa experimental. Dimensões em (mm).**

Uma alteração nos ensaios realizados, em relação ao trabalho preliminar proposto por Kraai, se deu nas restrições nas bordas das placas à movimentação da argamassa. O autor restringiu as bordas por meio de uma malha rígida de arame; esta pesquisa, por outro lado, utilizou cantoneiras metálicas, de 16 mm de largura de aba, fixadas em todo o perímetro da fôrma, como ilustrado na Figura 5.3.



**FIGURA 5.3 – Detalhe 1: Seção transversal parcial da restrição imposta na placa.**

A face inferior e as laterais da fôrma foram cobertas com um filme plástico para evitar a absorção da água da mistura pela madeira, utilizada na confecção da fôrma. Desta maneira o movimento da água livre da argamassa ocorre somente no sentido ascendente, proporcionando também uma maior durabilidade à fôrma.

A retração plástica do concreto reforçado com fibras de polipropileno foi investigada considerando-se a influência da variação do volume de fração de fibra, em porcentagens de: a) 0% (referência); b) 0,05 %; c) 0,10 % e d) 0,15 %, em relação ao volume da argamassa. As dosagens utilizadas estão apresentadas na Tabela 5.1.

Nesta tabela, na Coluna (1), está identificado a proporção de fibra empregada na dosagem e o número da placa ensaiada. Por exemplo, a nomenclatura **D-X-Y**, representa **D**: dosagem, **X**: teor de fibras em 100 e **Y**: número da placa ensaiada. Assim, a linha D-5-1 apresenta informações da dosagem para o teor de fibras de 0,05 %, no ensaio da primeira placa.

Foram moldadas 3 placas para cada mistura, em função do volume de fração de fibra, totalizando 12 placas de argamassa.

A areia utilizada na dosagem das argamassas foi do mesmo lote empregado nos estudos de aderência, que será apresentado no próximo capítulo. Nestes ensaios foi utilizado cimento portland do tipo CP-V-ARI-RS, devido à maior possibilidade de ocorrência de fissuras iniciais neste cimento.

**TABELA 5.1 – Proporções dos materiais e condições ambientais no momento da mistura.**

Coluna (1)	Materiais Componentes					Características da Mistura		
	Coluna (2)	Coluna (3)	Coluna (4)	Coluna (5)	Coluna (6)	Coluna (7)	Coluna (8)	Coluna (9)
Placas	Fibras (%)	Fibras (g)	Cimento (1:m)	Areia (1:m)	Relação a/c	UR (%)	Temperatura (°C)	Consistência Flow table (mm)
D-0-1	0,0	-	1	2,7	0,6	79	27,3	30,0
D-0-2	0,0	-	1	2,7	0,6	81	30,1	30,0
D-0-3	0,0	-	1	2,7	0,6	86	21,4	29,3
D-5-1	0,05	8,2	1	2,7	0,6	95	17,0	30,0
D-5-2	0,05	8,2	1	2,7	0,6	96	17,0	29,3
D-5-3	0,05	8,2	1	2,7	0,6	85	22,3	29,8
D-10-1	0,10	16,3	1	2,7	0,6	81	27,7	29,2
D-10-2	0,10	16,3	1	2,7	0,6	83	26,7	30,0
D-10-3	0,10	16,3	1	2,7	0,6	79	25,4	29,5
D-15-1	0,15	24,4	1	2,7	0,6	94	17,1	29,0
D-15-2	0,15	24,4	1	2,7	0,6	93	18,7	29,5
D-15-3	0,15	24,4	1	2,7	0,6	89	19,5	30,0

As argamassas foram misturadas com a seguinte sequência de colocação dos materiais: primeiro a areia, após a água e, por fim o cimento, sendo a seguir os materiais misturados por 5 minutos. A umidade relativa do ar e a temperatura ambiente, no momento da mistura, foram medidas por meio de um termo-higrômetro, marca *Kestrel 3000* e, estão apresentadas nas Colunas (7) e (8) da Tabela 5.1, respectivamente.

No caso das misturas com fibras de polipropileno, estas foram adicionadas logo após a mistura do cimento. As propriedades físicas e mecânicas das fibras estão mostradas na Tabela 5.2.

**TABELA 5.2 – Caracterização física e mecânica das fibras de polipropileno, de acordo com o fabricante.**

Propriedades	Valores
Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	18
Comprimento (mm)	12
Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )	0,91
Resistência à tração (MPa)	300
Modulo de elasticidade (GPa)	3
Área superficial específica ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	225
Ponto de fusão ( $^{\circ}\text{C}$ )	160
Resistência alcalina	alta

Terminada a mistura, a consistência da argamassa foi medida na mesa de flow table, seguindo-se as recomendações do Anexo B da Norma Brasileira NBR 7215 (1996), conforme Figura 5.4. A consistência medida, em cada ensaio pode ser visualizada na Coluna (9), da Tabela 5.1.



**FIGURA 5.4 – Determinação da consistência na mesa *flow table*.**

As seguir, a argamassa foi colocada na fôrma e nivelada manualmente com uma régua rígida de material plástico, movimentando-a paralelamente à direção de maior comprimento da placa, conforme mostra a Figura 5.5. A velocidade do nivelamento da placa foi de aproximadamente 1m/min.



**FIGURA 5.5 – Nivelamento da placa de argamassa.**

Logo após as placas com argamassa foram expostas às mesmas condições atmosféricas, ou seja, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento, em uma sala fechada, localizada no interior LMCC/UNESC. A temperatura ambiente, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento foram condicionadas para simular uma situação de concretos expostos à ambientes de maior evaporação de água. Em média, as temperaturas variaram próximas a 32°C; e a umidade relativa do ar manteve-se em média de 43 %.

Para aumentar a taxa de evaporação da água na argamassa, foi empregado um exaustor de 580 mm de diâmetro, capaz de gerar uma velocidade média de vento de 13,5

km/h. Além disso, foi construído no laboratório um túnel de vento para melhor direcionar o fluxo do vento sobre as placas, conforme mostra a Figura 5.6. O exaustor foi ligado 5 minutos após o término do processo de nivelamento, o qual corresponde a uns 25 minutos a partir do início da mistura.



**FIGURA 5.6 – Vista do túnel de vento com o exaustor e a placa de argamassa.**

As leituras foram realizadas a uma altura de 100 mm acima da superfície das placas, próximas a saída do túnel de vento. Estas leituras de temperatura ambiente, umidade relativa do ar e velocidade do vento foram medidas a cada 1 hora, até completar 9 horas de ensaio, por meio de um termo-higrômetro digital.

A perda de água na mistura da argamassa também foi monitorada durante o ensaio por meio de uma vasilha de dimensões 220 mm x 140 mm (comprimento x largura), disposta adjacente à placa de argamassa, também colocada dentro do túnel de vento. A leituras do peso desta vasilha também foi realizada a cada 1 hora, em uma balança de precisão 0,01 g, disposta no interior da sala climatizada.

A temperatura no interior da argamassa também foi medida por meio de um termopar, que registrava a temperatura automaticamente, a cada 5 minutos.

As leituras de medição do comprimento total das fissuras foram realizadas 24 horas após o início do ensaio, utilizando-se uma linha disposta sobre as fissuras.

## **5.5. Resultados Experimentais**

Os resultados obtidos no programa experimental para avaliar a fissuração por retração plástica das placas de argamassa, com adição de diferentes volumes de fibras de polipropileno, encontram-se apresentados na Tabela 5.3.

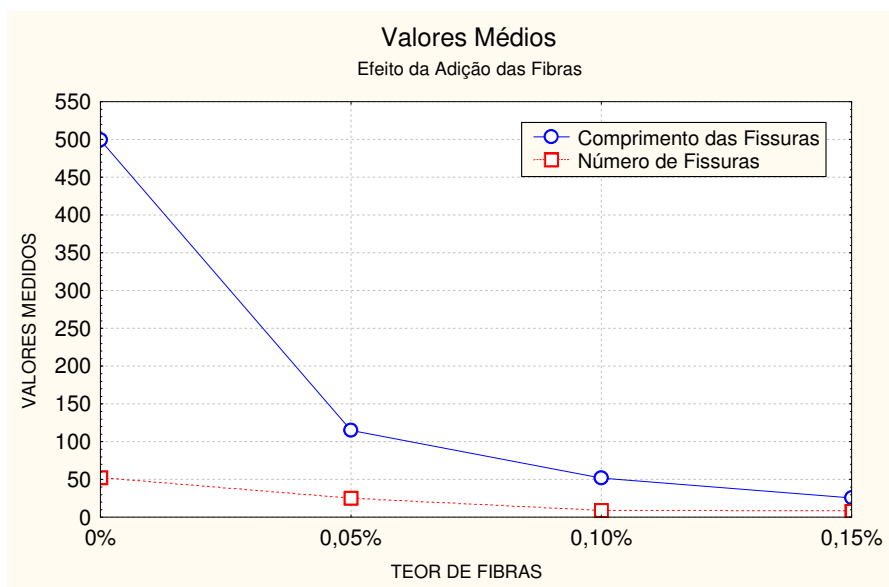


**TABELA 5.3 – Resultados obtidos nos ensaios das placas, em valores médios.**

		Unidade	Dosagem das argamassas			
			0,0% fibras	0,05% fibras	0,10% fibras	0,15% fibras
Condições atmosféricas	Velocidade do vento	Km/h	13,6	13,9	13,7	13,1
	Temperatura média	°C	33,6	31,1	32,4	30,4
	UR média	%	34,6	48,1	36,7	53,4
Condições da mistura	Temperatura média no concreto	°C	32,2	30,5	31,3	32,1
	Perda de massa na mistura	%	5,60	5,54	5,43	5,27
Fissuração	Comprimento total das fissuras	cm	499	115	52	26
	Desvio Padrão	cm	62	44	17	23
	Número de fissuras	unid.	53	25	9	5
	Desvio Padrão	unid.	3,8	11,0	1,1	4,0

Pode-se verificar, de acordo com esta tabela, que as condições atmosféricas na sala do ensaio e da mistura mantiveram-se próximas. Analisando-se o comprimento total das fissuras, em porcentagem, pode-se constatar que a adição das fibras de polipropileno na mistura teve grande influência na redução da fissuração das placas.

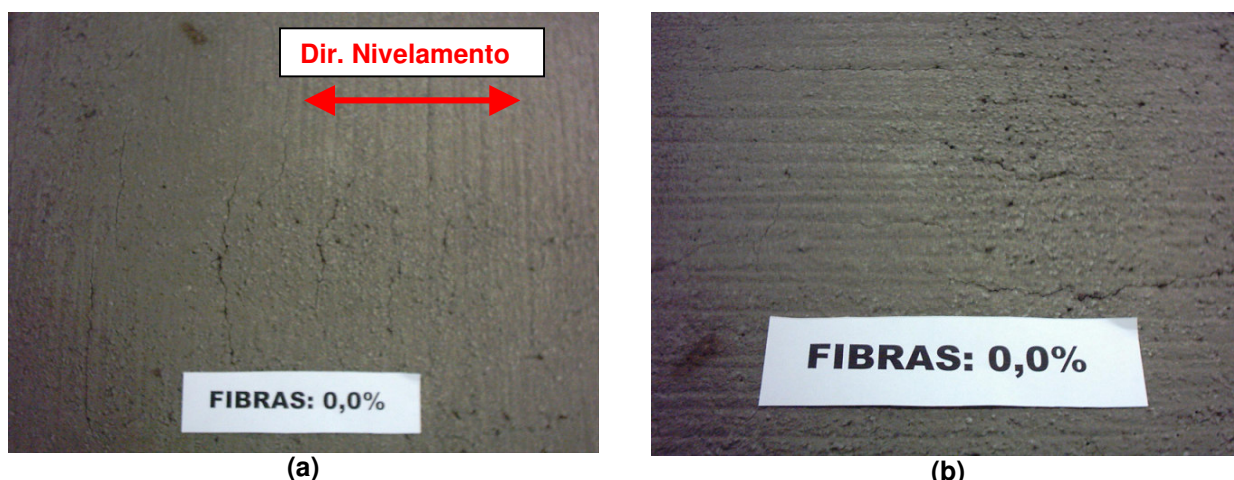
Verifica-se na Figura 5.7 uma redução de 77 % no comprimento total das fissuras na argamassa com adição de 0,15 % de fibras, em relação à argamassa com teor de fibra de 0,05 %. Ao comparar-se a redução da fissuração da argamassa sem a adição de fibras (referência), em relação ao máximo teor observou-se uma redução no comprimento total das fissuras de 95%. Além disso, pode ser visto uma redução de 58 % no número médio de fissuras na argamassa com adição de 0,15 % de fibras, em relação à argamassa com teor de fibra de 0,05 %. Ao comparar-se a redução da fissuração da argamassa sem a adição de fibras (referência), em relação ao máximo teor observou-se uma redução no número médio de fissuras de aproximadamente 92 %.



**FIGURA 5.7 – Avaliação da redução do comprimento e do número das fissuras por retração plástica nas placas de argamassas.**

A verificação do início da fissuração foi monitorada visualmente. Em geral as fissuras começaram a aparecer após 180 minutos da exposição da mistura no vento, onde a maioria das fissuras ocorreu nas primeiras 5 horas.

Pode-se verificar nas Figuras 5.8(a) e (b), a fissuração por retração plástica para o teor de fibras de 0 % (referência). Observa-se valores representativos no comprimento das fissuras, como no seu número de ocorrência. Além disso, pode ser visto que a maioria das fissuras ocorreu perpendicularmente à direção do nivelamento da argamassa na fôrma.



**FIGURA 5.8 – Visualização das fissuras nas placas sem adição de fibras ( $V_f=0,0\%$ ).**

As Figuras 5.9(a) e (b), mostram a fissuração por retração plástica para o teor de fibras de 0,05 %. Embora para um teor de fibras reduzido, como este apresentado, as fissuras já começam a apresentar uma abertura bastante reduzida, similar à espessura de uma linha e, diferente das fissuras que ocorreram para a mistura sem a presença de fibras ( $V_f=0,0\%$ ).

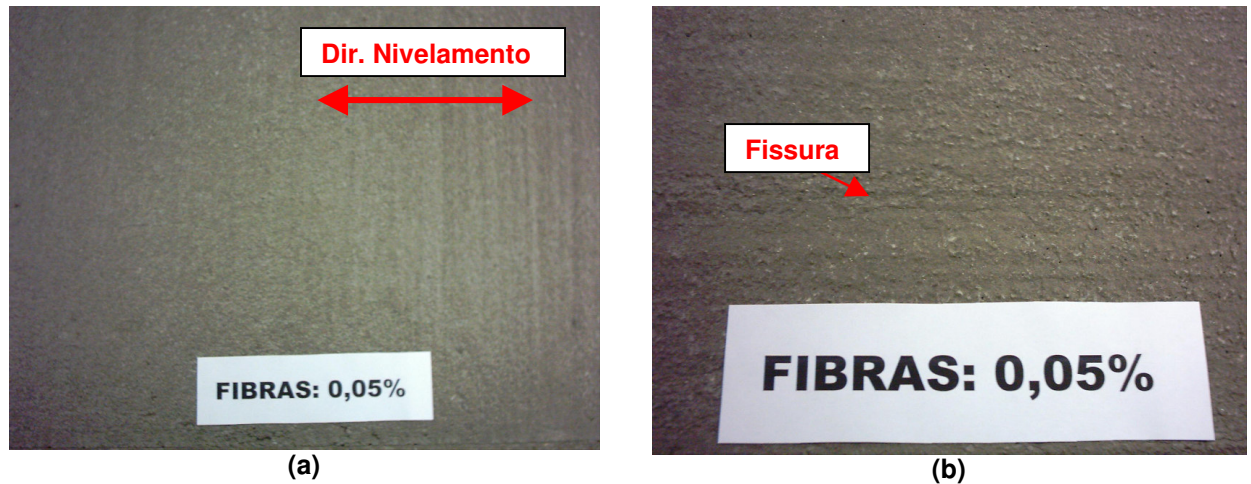


FIGURA 5.9 – Visualização das fissuras nas placas com adição de fibras ( $V_f=0,05\%$ ).

Analisando-se também as Figuras 5.10 e 5.11(a) e (b), observa-se para as placas com adições de 0,10 % e 0,15 % de fibras, que as fissuras apresentam uma abertura bastante reduzida, também similar à espessura de uma linha. Este efeito se deve principalmente à resistência das fibras à tração, imposta à argamassa, causando uma maior restrição à abertura das fissuras.

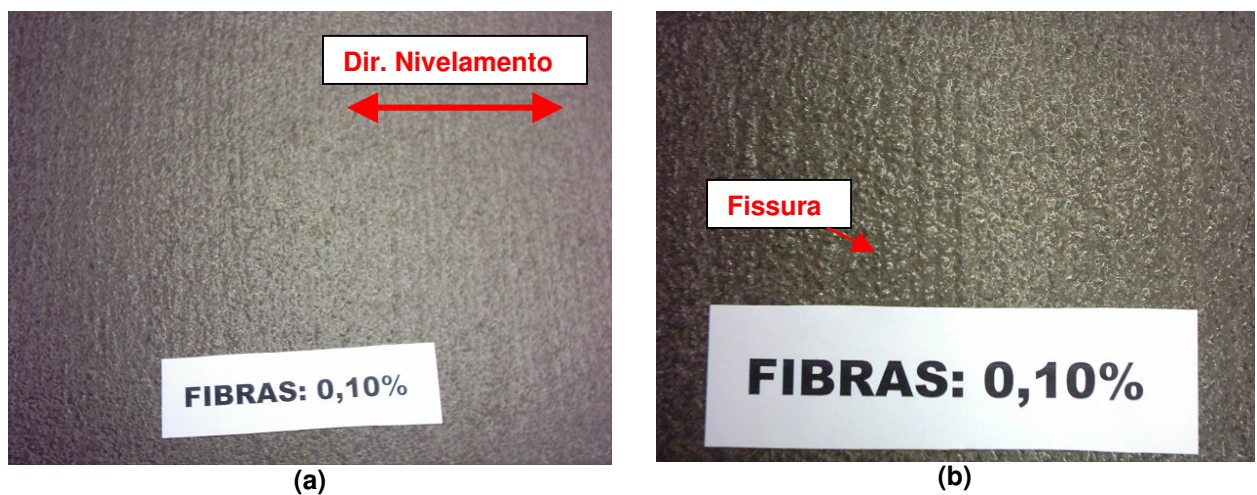


FIGURA 5.10 – Visualização das fissuras nas placas com adição de fibras ( $V_f=0,10\%$ ).



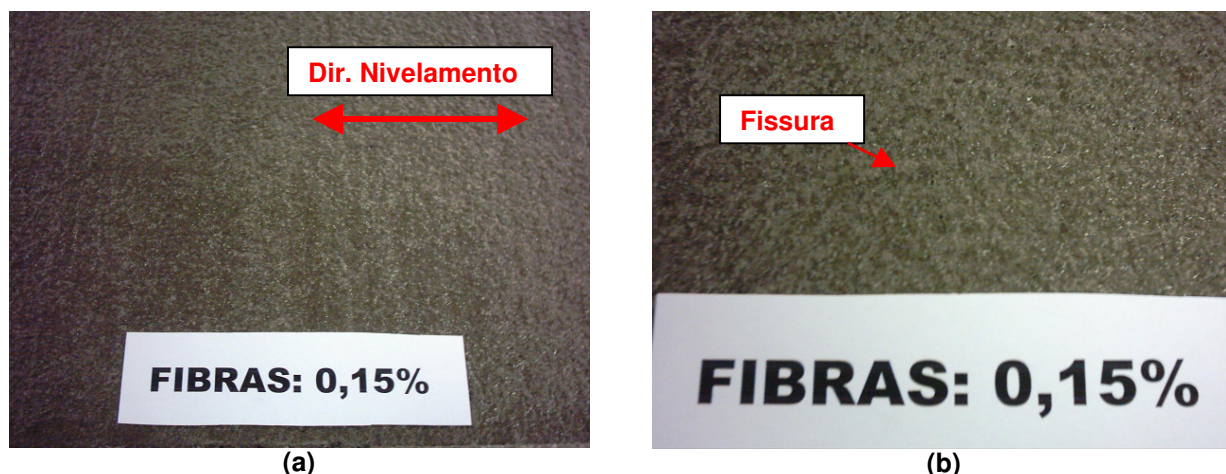


FIGURA 5.11 – Visualização das fissuras nas placas com adição de fibras ( $V_f=0,15\%$ ).

A taxa média de evaporação foi calculada utilizando a medida nas vasilhas adjacentes às placas de argamassa. Para as quatro concentrações de fibras, nas três placas ensaiadas, o valor médio calculado foi de  $0,54 \text{ kg/m}^2/\text{hr}$ . Este valor foi obtido tomando-se a perda total de massa nas vasilhas, dividindo pela área da vasilha, durante as 8 horas de ensaio.

Em comparação, o COMMITTEE 305 (1991), permite simular esta taxa de evaporação em um ábaco, entrando com os valores da velocidade do vento, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e temperatura da argamassa. Os valores obtidos com base nas informações da Tabela 6.3 possibilitaram estimar a taxa de evaporação da umidade da argamassa de  $0,65 \text{ kg/m}^2/\text{hr}$ .

Na Figura 5.12 pode ser visto um gráfico contendo a variação da perda de massa, em porcentagem, na mistura de argamassa, para os quatro teores de fibras ao longo do ensaio.

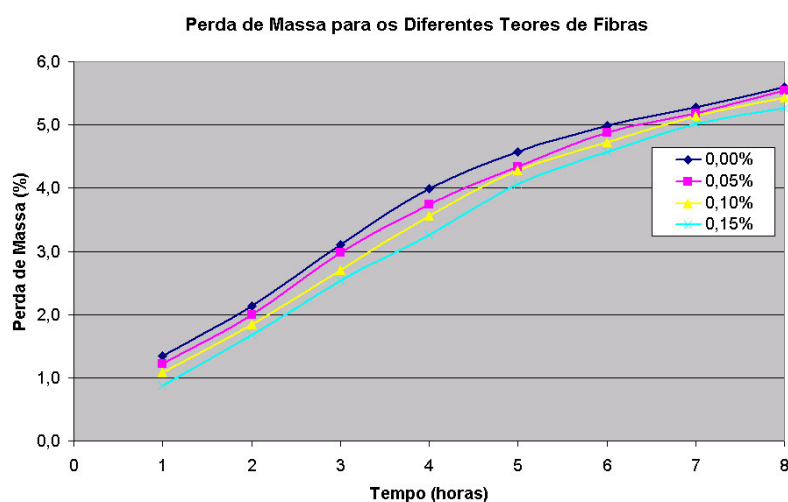


FIGURA 5.12 – Perda de massa média nas misturas das argamassas, para os diferentes teores de fibras.

## 5.6. Análise Estatística dos Resultados Obtidos

Neste item será realizada uma análise estatística para determinar qual a porcentagem de fibras que será empregada posteriormente na capa de concreto da laje mista concreto/PRF.

Para verificar a possível existência ou não de uma diferença significativa entre o comprimento e o número de fissuras entre os teores de fibras empregados, será realizada uma análise de variância (ANOVA).

Esta comparação tem por base a distribuição “F”. O valor resultante da estatística deve ser comparado com a tabela de valores de F, que indica o valor máximo da estatística para o caso da hipótese inicial ser verdadeira, a um determinado nível de significância, neste caso 5 % ( $F_{0,05}$ ). Assim, se  $F > F_{0,05}$  pode-se concluir que existe uma diferença significativa entre as médias analisadas, ou seja, a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada.

Para o desenvolvimento das análises adotou-se a função contida na planilha Excel 2000 – ANOVA fator único.

Tomando-se como base os valores referentes ao número de fissuras obtido para as quatro concentrações de fibras, tem-se a análise apresentada nas Tabelas 5.4 e 5.5.

**TABELA 5.4 – Resumo estatístico para os quatro teores de fibras, para o número de fissuras nas placas de argamassa.**

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Sem Fibras	3	158	52,67	14,33
0,05 % Fibras	3	76	25,33	142,33
0,1 % Fibras	3	28	9,33	1,33
0,15 % Fibras	3	16	5,33	17,33

**TABELA 5.5 – Análise ANOVA para o número de fissuras nas placas de argamassa, para os quatro teores de fibras.**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4153	3	1384,33	31,58	8,76E-05	4,07
Dentro dos grupos	350,6667	8	43,83			
Total	4503,667	11				

Como  $F > F_{\text{crítico}}$ , verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada. Ou seja, existe diferença significativa entre as médias dos quatro teores de fibras, para o número de fissuras, com 95 % de confiabilidade.

Tomando-se como base os valores referentes ao comprimento médio das fissuras obtido para as quatro concentrações de fibras, tem-se a análise apresentada nas Tabelas 5.6 e 5.7.

**TABELA 5.6 – Resumo estatístico para os quatro teores de fibras, para o comprimento das fissuras nas placas de argamassa.**

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
0 % Fibras	3	1498	499,33	3865,33
0,05 % Fibras	3	345	115	1983
0,1 % Fibras	3	156	52	283
0,15 % Fibras	3	77	25,67	562,33

**TABELA 5.7 – Análise ANOVA para o comprimento das fissuras nas placas de argamassa, para os quatro teores de fibras.**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	438616,67	3	146205,56	87,37	1,87E-06	4,07
Dentro dos grupos	13387,33	8	1673,42			
Total	452004	11				

Como  $F > F_{\text{crítico}}$ , verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada. Ou seja, existe diferença significativa entre as médias dos quatro teores de fibras, para o comprimento das fissuras, com 95 % de confiabilidade.

Além disso, realizou-se uma análise para investigar se havia diferença significativa apenas entre as placas com adições de fibras. Isto, em função da elevada diferença entre os valores obtidos para o comprimento e número de fissuras para as placas sem fibras, em relação às placas com adições de fibras.

Desta maneira, tomando-se como base os valores referentes ao comprimento das fissuras obtido para as concentrações de fibras 0,05 %, 0,10 % e 0,15 %, tem-se a análise apresentada nas Tabelas 5.8 e 5.9.

**TABELA 5.8 – Resumo estatístico para os teores de fibras, para o comprimento das fissuras nas placas de argamassa.**

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
0,05 % Fibras	3	345	115	1983
0,1 % Fibras	3	156	52	283
0,15 % Fibras	3	77	25,67	562,33

**TABELA 5.9 – Análise ANOVA para o comprimento das fissuras nas placas de argamassa, para os teores de fibras.**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	12642,89	2	6321,44	6,71	0,03	5,14
Dentro dos grupos	5656,67	6	942,78			
Total	18299,56	8				

Como  $F > F_{\text{crítico}}$ , verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada. Ou seja, existe diferença significativa entre as médias dos três teores de fibras, para o comprimento das fissuras, com 95 % de confiabilidade.

Também tomando-se como base os valores referentes ao número de fissuras obtido para as concentrações de fibras 0,05 %, 0,10 % e 0,15 %, tem-se a análise apresentada nas Tabelas 5.10 e 5.11.

**TABELA 5.10 – Resumo estatístico para os teores de fibras, para o número de fissuras nas placas de argamassa.**

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
0,05 % Fibras	3	76	25,33	142,33
0,1 % Fibras	3	28	9,33	1,33
0,15 % Fibras	3	16	5,33	17,33

**TABELA 5.11 – Análise ANOVA para o número de fissuras nas placas de argamassa, para os teores de fibras.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	672	2	336	6,26	0,03	5,14
Dentro dos grupos	322	6	53,67			
Total	994	8				

Como  $F > F_{\text{crítico}}$ , verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada. Ou seja, existe diferença significativa entre as médias dos três teores de fibras, para o número de fissuras, com 95 % de confiabilidade.

Com relação ao cálculo de “F”, NANNI (1986) esclarece que quando o valor de “F” indicar uma diferença significativa entre as médias é necessário realizar uma análise posterior para definir a média, ou médias, que diferem significativamente entre si. Neste estudo esta análise será feita pelo Método de Duncan, para avaliar esta diferença somente entre as placas com adição de fibras.

**TABELA 5.12 – Resultado para o Método de Duncan para a análise dos comprimentos médios das fissuras nas placas de argamassa, para os teores de fibras de: 0,05 %, 0,10 % e 0,15 %.**

Teor de Fibras	Valores encontrados para um nível de significância de 0,05		
	0,05 %	0,10 %	0,15 %
0,05 %	-	0,046	0,014
0,10 %	0,046	-	0,33
0,15 %	0,014	0,33	-

Por meio do Método de Duncan pode-se concluir, com 95 % de confiabilidade, para os comprimentos médios das fissuras, para os três teores de fibras que:

- Existe diferença significativa entre o comprimento das fissuras obtidas com o teor de 0,05% com os demais teores de 0,10 % e 0,15 %.
- Não existe diferença significativa entre os comprimentos das fissuras obtidas entre os teores com 0,10 % e 0,15 % de fibras.

**TABELA 5.13 – Resultado para o Método de Duncan para a análise o número de fissuras nas placas de argamassa, para os teores de fibras de: 0,05 %, 0,10 % e 0,15 %.**

Teor de Fibras	Valores encontrados para um nível de significância de 0,05		
	0,05 %	0,10 %	0,15 %
0,05 %	-	0,037	0,018
0,10 %	0,037	-	0,53
0,15 %	0,018	0,53	-

Por meio do Método de Duncan pode-se concluir, com 95 % de confiabilidade, para o número médio de fissuras, para os três teores de fibras que:

- Existe diferença significativa entre o número de fissuras obtidas com o teor de 0,05% com os demais teores de 0,10 % e 0,15 %.
- Não existe diferença significativa entre o número médio de fissuras obtidas entre os teores com 0,10 % e 0,15 % de fibras.

Também foi realizado um estudo estatístico para verificar se existe a influência do teor de fibra no comportamento da perda de massa da mistura. Para este estudo, foi utilizada a distribuição *t* (conhecida como distribuição de *Student*). No Anexo D estão apresentados os valores obtidos para a perda de massa, para os quatro teores de fibras. Nestas tabelas pode ser visto que as placas número 3, dos teores de fibra 0,05 % e 0,10 %, devem ser eliminadas das análises posteriores, pois seus resultados encontram-se fora do intervalo de confiança. Na Tabela 5.14 encontram-se os valores das perdas de massa, para os quatro teores de fibra, durante a realização do ensaio.



**TABELA 5.14 – Valores médios da perda de massa, para os quatro teores de fibras.**

Horas	Teor de Fibra			
	0%	0,05 %	0,10 %	0,15 %
1	1,364	1,085	1,265	0,873
2	2,121	1,985	2,410	1,740
3	2,730	3,270	3,420	2,535
4	4,001	4,140	4,450	3,257
5	4,558	4,800	5,165	4,065
6	4,988	5,360	5,615	4,569
7	5,280	5,760	6,110	5,021
8	5,587	6,210	6,290	5,580

Para verificar a influência do teor de fibra no comportamento da perda de massa, será realizada uma análise de variância (ANOVA). Nas Tabelas 5.15 e 5.16 encontram-se resumidos os valores da análise.

**TABELA 5.15 – Resumo estatístico dos teores de fibra, no comportamento da perda de massa.**

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
0 %	8	30,628	3,828	2,471
0,05 %	8	32,610	4,076	3,362
0,10 %	8	34,725	4,341	3,326
0,15 %	8	27,639	3,455	2,725

**TABELA 5.16 – Análise ANOVA para os teores de fibra, no comportamento da perda de massa.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,407	3	1,136	0,382	0,767	2,947
Dentro dos grupos	83,188	28	2,971			
Total	86,596	31				

Como  $F < F_{\text{crítico}}$ , verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais não pode ser rejeitada. Ou seja, não há influência do teor de fibra no comportamento da perda de massa, com 95 % de confiabilidade.

## 5.7. Considerações Complementares

A fissuração por retração plástica aumenta a permeabilidade do concreto, reduzindo-se assim, a durabilidade das estruturas em função do aumento dos efeitos das patologias ligadas à presença de umidade. Como visto nos resultados apresentados anteriormente, a adição de fibras de polipropileno possibilita reduzir consideravelmente a ocorrência destas fissuras nas misturas cimentícias.

Constatou-se nos ensaios realizados uma melhoria no comportamento das placas de argamassa à fissuração por retração plástica nos teores de fibra acima de 0,10 %. Adição esta recomendada em algumas literaturas para evitar, de maneira mais eficiente, a fissuração por retração, principalmente em pisos, pavimentos e estruturas expostas à ambientes de atmosfera agressiva.

Analisando-se também as fissuras, pôde ser observado que a maioria das fissuras ocorreram na direção paralela à operação de nivelamento, como já constatado por outros autores.

A perda de massa calculada neste trabalho esteve também com valores próximos aos encontrados em outras literaturas. Além disso, a taxa média de evaporação medida, embora menor do que o valor crítico estabelecido nas recomendações do Committee ACI foi semelhante ao encontrado por outros pesquisadores. Além disso, foi constatado que o teor de fibras não influencia no comportamento da perda de massa.

A análise estatística realizada nos resultados obtidos nas placas indicou a existência de diferença significativa entre nas fissurações das placas entre os teores de fibra estudado.

Uma análise mais aprofundada pelo Método de Duncan indicou diferença significativa nas fissurações das placas com adição de 0,05 % de fibras, em relação às outras adições.

Em função disto, será adotado um teor de fibras de 0,10 % para a execução da capa de concreto, que será empregada na confecção da laje mista. A excelente resposta deste teor de adição de fibras na redução das fissuras por retração plástica também foi obtida por outros pesquisadores em ensaios experimentais em placas (lajes) de concreto.

## 6. ADERÊNCIA CONCRETO/PRF

### 6.1. Introdução

Atualmente muitas pesquisas têm se direcionado ao reforço de estruturas de concreto aplicando-se materiais compostos colados às estruturas na forma de mantas ou fitas, CHEN e TENG (2003) e JUVANDES (1999). Nestas pesquisas fibras de carbono unidirecionais são aplicadas com sucesso em vigas e lajes para reforço e recuperação de estruturas, fornecendo vantagens significativas em relação às placas de aço:

- resistência, peso e durabilidade das placas;
- facilidade no transporte;
- versatilidade de forma e projeto;
- redução do período de construção;
- facilidade na preparação da superfície;
- redução no uso de fixadores mecânicos;
- melhora na resistência ao fogo.

As características de aderência entre o concreto e os materiais compostos avançados dependem da morfologia da superfície do composto. A resistência de uma ligação é governada pelo valor máximo da aderência entre os materiais envolvidos na ligação.

Uma questão importante levantada por muitos pesquisadores é como determinar a aderência entre o composto e o concreto. Vários investigadores concluíram que a melhor forma de quantificar esta aderência é recorrer a modelos experimentais, embora a literatura não se refira a nenhum ensaio em especial para ser adotado.

Neste mesmo sentido, KARBHARI et al. (2000) esclarecem que, em consequência da grande variedade de produtos em compostos oferecidos no comércio, não é possível recomendar um modelo genérico aderência-deslizamento com parâmetros típicos para todos os materiais compostos.

O critério atualmente tem sido ajustar modelos utilizados nos trabalhos de aderência concreto-aço às condições de uso dos materiais compostos de PRF. Estes experimentos são

distinguidos pela natureza da ação principal do ensaio, ou seja, ensaios de cisalhamento, ensaios de flexão ou ensaios de tração direta e torção (ensaio de arrancamento).

Em particular, de acordo com os levantamentos de JUVANDES (1999), os ensaios de cisalhamento são amplamente empregados na caracterização dos estudos de aderência em mantas de PRF, utilizadas como reforço de estruturas. Estes ensaios podem ser realizados com plano de cisalhamento simples ou duplo.

De fato a maioria dos trabalhos existentes atualmente na literatura tem seu enfoque direcionado ao estudo da aderência entre o concreto e o material PRF quando este é utilizado no reforço e recuperação de estruturas em concreto armado, como por exemplo, BIZINDAVYI e NEALE (1999); NGUYEN et al. (2001); BUYUKOZTURK et al. (2004).

Por outro lado o estudo da aderência do PRF com o concreto ainda no estado fresco tem se limitado a pesquisas localizadas. Estes estudos têm sido realizados por pesquisadores com o objetivo de aplicar o PRF em estruturas mistas de concreto/composto. A maioria dos trabalhos tem se dirigido para a aplicação dos compostos como elementos de vigas e tabuleiros de pontes recobertos com uma capa de concreto na face superior.

DESKOVIC e TRIANTAFILLOU (1995a) desenvolveram elementos estruturais mistos aplicando uma camada de concreto na face superior de um perfil de seção caixão em fibra de vidro. Para produzir uma fôrma sobre a viga de PRF foram utilizadas placas de compensado, fixadas lateralmente à alma do perfil por grampos. Os autores aplicaram antes da camada de concreto um adesivo epóxi de maneira a formar um filme de 0,5 mm de espessura. A seguir foi deixado para curar por 20 min e depois lançado o concreto.

No ensaio da primeira viga mista à flexão os autores perceberam uma ruptura por descolamento na interface concreto/PRFV. Em função deste fato e com o objetivo de aumentar a resistência ao cisalhamento, os autores posicionaram conectores de cisalhamento na forma de pinos metálicos dispostos verticalmente na camada de concreto e na mesa superior do perfil, posicionados longitudinalmente na viga em duas fileiras, espaçados uniformemente a cada 190 mm. Os conectores aumentaram a resistência ao cisalhamento concreto/PRFV, porém, segundo os próprios autores, o estudo de técnicas de ligação concreto/PRFV não era o objetivo do trabalho.

HALL e MOTTRAM (1998) adotaram um ensaio no qual se empurra o corpo-de-prova “push-out test”, constituído de um perfil pultrudado embebido em concreto, para determinar o diagrama carga-deslocamento de uma ligação concreto/PRFV. Os autores consideram que há mais desvantagens do que vantagens nos ensaios de aderência submetidos a esforços de tração do que a esforços de compressão. O ensaio de aderência foi realizado com objetivo de quantificar o aumento na resistência fornecido pela aplicação de um adesivo a base de epóxi (Sikadur 31) na interface entre o PRF e o concreto. A resistência média encontrada para a

ligação na interface para corpos-de-prova com adesivo epóxi e sem adesivo foi de 5,2 e 3,3 MPa, respectivamente. O incremento no carregamento adotado pelos autores foi de 5 kN/min.

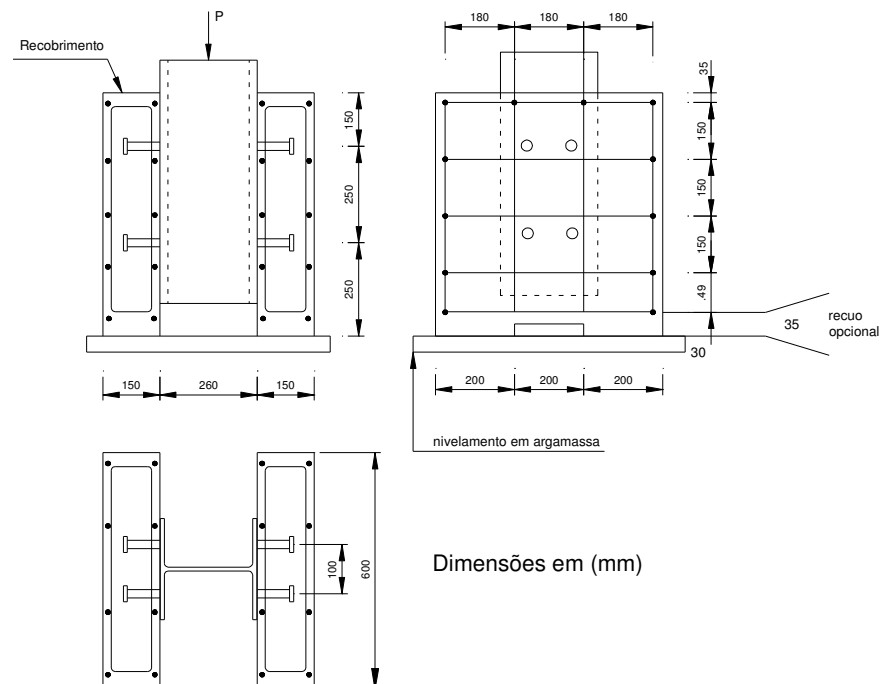
CANNING et al. (1999) dedicaram-se ao estudo da aderência do composto ao concreto no estado fresco. Os autores fabricaram e ensaiaram à flexão vigas mistas de seção caixão. Neste trabalho, a interface de aderência entre os dois materiais foi investigada a partir do ensaio de seis diferentes técnicas na ligação composto/PRF. Estas seis técnicas incluem o uso de nervuras verticais nas paredes da fôrma de concreto permanente; conectores de cisalhamento por meio de parafusos atravessando ambos, o concreto e a fôrma permanente, dispostos horizontalmente; dois métodos utilizando injeção de resina em arestas deixadas entre o concreto e a fôrma permanente; e finalmente, aplicando-se um adesivo compatível com o concreto fresco. Os autores concluíram que o método mais prático é o uso do adesivo aplicável com o concreto fresco no qual fornece um nível adequado de ação entre o composto e o concreto.

Recentemente, a partir da pesquisa de uma viga *T* mista concreto/PRF, HULATT et al. (2003b) desenvolveram um estudo preliminar para determinar a resistência ao cisalhamento em diferentes interfaces da ligação concreto/PRF. Os autores desenvolveram um ensaio de tração para determinar a resistência ao cisalhamento na interface da ligação. Neste ensaio foram avaliados quatro diferentes adesivos para produzir a reação de aderência do composto ao concreto ainda no estado fresco: *Sikadur 32*, *Sikadur 31*, *SikaTop Armatec 110 Epocem* e o *Resicrete*.

Os resultados dos ensaios mostraram que o adesivo *Sikadur 31* apresentou-se não somente adequado em termos de facilidade de aplicação, mas também em termos de desempenho, atingindo uma resistência média na ligação de 3,47 MPa.

KARBHARI et al. (2000) realizaram ensaios de tração direta em barras retangulares de fibra de carbono. Para melhorar as características de aderência os autores realizaram um tratamento superficial na barra, ou seja, esta foi lixada e após pintada com um adesivo epóxi e em seguida mergulhada na areia. Tratamento semelhante pode ser encontrado em BAKIS et al. (2002), que para obter uma boa ligação com o concreto os autores fixaram agregados finos à superfície do PRF.

Para as estruturas mistas aço/concreto o EUROCODE 4 (2001) preconiza o ensaio de cisalhamento duplo, utilizando-se um perfil de aço, com os conectores em estudo embebidos em prismas de concreto, como mostra a Figura 6.1. A resistência de aderência é determinada no ensaio de compressão do perfil de aço, tomando-se a relação da carga de ruptura pela área de contato do concreto com o perfil metálico.



**FIGURA 6.1 – Ensaio de aderência para estruturas mistas aço/concreto. Fonte: EUROCODE 4 (2001).**

Neste Capítulo é desenvolvido o estudo da aderência entre o concreto e o PRFV para a aplicação na laje mista. São desenvolvidos estudos preliminares em corpos-de-prova para investigar a melhor interface de aderência, utilizando-se três tratamentos previamente escolhidos. Também é avaliada a influência da resistência à compressão do concreto na aderência da ligação.

Para estas análises foi desenvolvido um novo dispositivo de ensaio de aderência, pois este ainda não é normatizado nem se encontra disponível na literatura, baseando-se no ensaio de aderência da norma Eurocode 4. É importante salientar que também foram realizadas análises pelo MEF que demonstraram o bom desempenho do ensaio. Os resultados destas análises também são apresentadas neste Capítulo.

## 6.2. Estudo Experimental da Interface Concreto/PRF

Com a finalidade de se verificar a melhor interface de transferência de cisalhamento entre o material composto avançado e o concreto na laje mista, foi realizado um estudo entre três tipos diferentes de interfaces de aderência:

- **Sikadur 31:** adesivo tixotrópico de dois componentes, a base de resina epóxi e cargas minerais, isento de solventes. Esta resina é aplicada sobre o perfil pultrudado, sendo em seguida colocada em contato com o concreto, ainda no estado fresco;

- **Sikadur 32 Gel:** adesivo de dois componentes a base de resinas epóxi, isento de solventes. Esta resina será aplicada sobre o perfil, sendo em seguida pulverizada uma camada de areia, deixando-se curar o conjunto resina/areia por 2 dias, para após lançar o concreto;
- **Sem tratamento superficial:** o concreto será aplicado diretamente sobre o perfil, sem a utilização de produtos ou conectores mecânicos para a transferência dos esforços de cisalhamento.

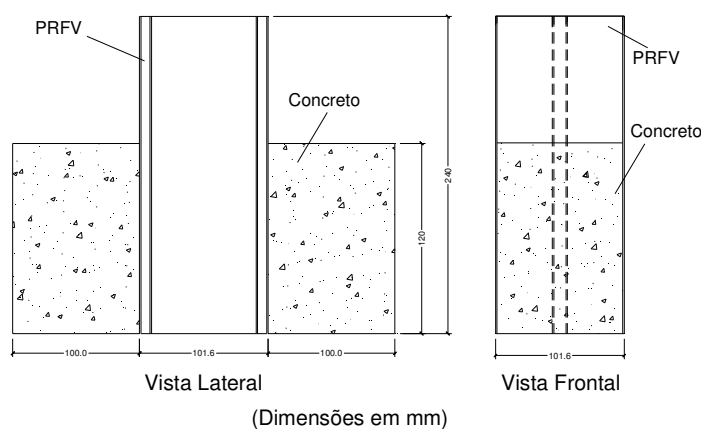
As resinas foram fornecidas pela empresa fabricante dos produtos, conveniada com a UFSC. Na Tabela 6.1 pode ser visto o resumo das principais características técnicas para cada uma das resinas citadas nos itens acima.

**TABELA 6.1 – Características técnicas das resinas.**

Resina	Propriedades*				
	Massa específica	Pot life	Resistência à compressão	Aderência	Consumo
Sikadur 31	1,70kg/litro	a 20°C – 55min.	1 dia – 60MPa	>18,6MPa	1,7kg/m <sup>2</sup> /mm
Sikadur 32 Gel	1,55kg/litro	a 20°C – 60min.	1 dia – 50MPa	>13MPa	1,55kg/m <sup>2</sup> /mm

\* As propriedades foram tomadas das Fichas Técnicas dos produtos, fornecidas pelo fabricante das resinas.

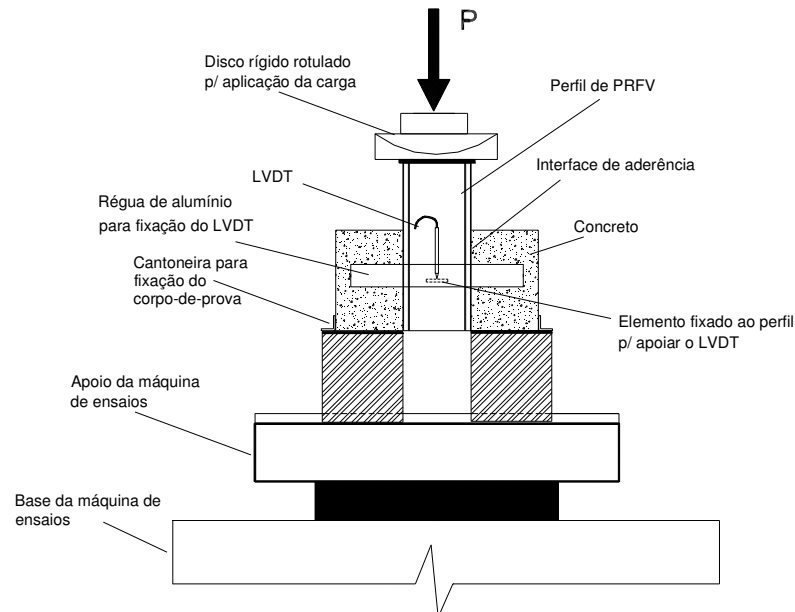
Para o estudo da aderência utilizaram-se corpos-de-prova retirados do próprio perfil de PRFV que será utilizado posteriormente na confecção da laje mista. Assim, os corpos-de-prova serão compostos por um perfil *H* de seção 101,6 mm x 101,6 mm x 9,525 mm e por dois prismas de concreto de dimensões 101,6 mm x 100 mm x 120 mm, dispostos nas mesas do perfil pultrudado, conforme mostra a Figura 6.2.



**FIGURA 6.2 – Detalhe dos corpos-de-prova para o ensaio de aderência.**

A resistência de aderência do conjunto PRFV/concreto é obtida por meio do ensaio de cisalhamento duplo. O carregamento é aplicado de maneira a pressionar o perfil pultrudado,

ocasionando esforços de compressão longitudinal no conjunto. A resistência é obtida pela máxima carga aplicada, dividida pela área de contato da mesa do perfil com o prisma de concreto. O layout do ensaio encontra-se apresentado na Figura 6.3.



**FIGURA 6.3 – Layout do dispositivo para o ensaio de aderência na interface concreto/PRFV.**

### 6.3. Análise Numérica Preliminar do Ensaio de Aderência

Anterior a definição final do corpo-de-prova proposto, optou-se em realizar uma análise por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) para analisar as tensões atuantes no corpo-de-prova e verificar o funcionamento do ensaio.

O corpo-de-prova foi modelado com dois tipos de elementos, considerando os materiais elástico-linear. Elemento plano de casca com 4 nós, com material ortotrópico, para a discretização do perfil de PRFV e elemento do tipo sólido de 8 nós e material isotrópico para a representação dos prismas de concreto. O modelo foi analisado por meio do programa computacional SAP2000 no Laboratório de Análise de Estruturas (LAE), do Departamento de Engenharia Civil da UFSC.

Para melhor representar as condições do ensaio experimental, a aplicação do carregamento foi simulada por meio de uma chapa metálica de elevada rigidez, a fim de representar o cutelo de aplicação de carga na máquina de ensaio.

Os apoios inferiores do dispositivo de ensaio foram simulados restringindo-se os deslocamentos verticais na base dos prismas de concreto. A carga foi aplicada na direção vertical, distribuída uniformemente sobre a chapa metálica.



Para a verificação das tensões atuantes no corpo-de-prova, foi adotado um carregamento que produzisse uma tensão média de 3,5 MPa, próximo aos 3,47 MPa encontrado em HULLAT et al. (2003b), nas interfaces concreto/PRFV. Desta maneira a carga vertical total aplicada no modelo numérico foi de 105 kN.

Foi adotada inicialmente uma malha com os elementos de casca discretizados em elementos retangulares com lados de 0,01 m, sendo os elementos do tipo sólido com dimensões de 0,02x0,01x0,01 m. Em seguida esta malha foi refinada para verificar a convergência na solução, comparando-se os resultados da malha refinada com os da malha adotada inicialmente. Como não houve diferença significativa entre os valores obtidos, escolheu-se utilizar a malha original, apresentada na Figura 6.4.

As constantes elásticas do perfil de PRFV utilizadas na análise foram estimadas por meio da Teoria Clássica da Laminação (TCL), conforme já apresentado na Tabela 4.3, do Capítulo 4.

As propriedades do concreto foram determinadas conforme as recomendações da NBR 6118 (2003), utilizando-se um coeficiente de Poisson de 0,2. O módulo de elasticidade longitudinal foi calculado utilizando-se as Expressões (6.1) e (6.2).

$$E_{ci} = 5600\sqrt{f_{ck}} \quad (6.1)$$

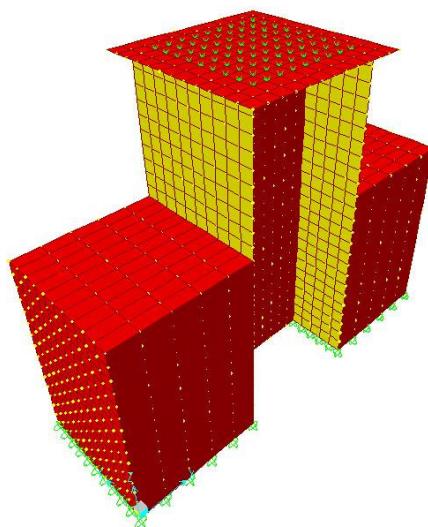
$$E_{cs} = 0,85E_{ci} \quad (6.2)$$

Sendo:

$E_{ci}$  → Módulo de elasticidade tangente na origem.

$E_{cs}$  → Módulo de elasticidade secante.

Desta maneira, tomando-se um concreto com  $f_{ck}=30$  MPa, este apresenta um módulo de elasticidade secante de 26,1 GPa.



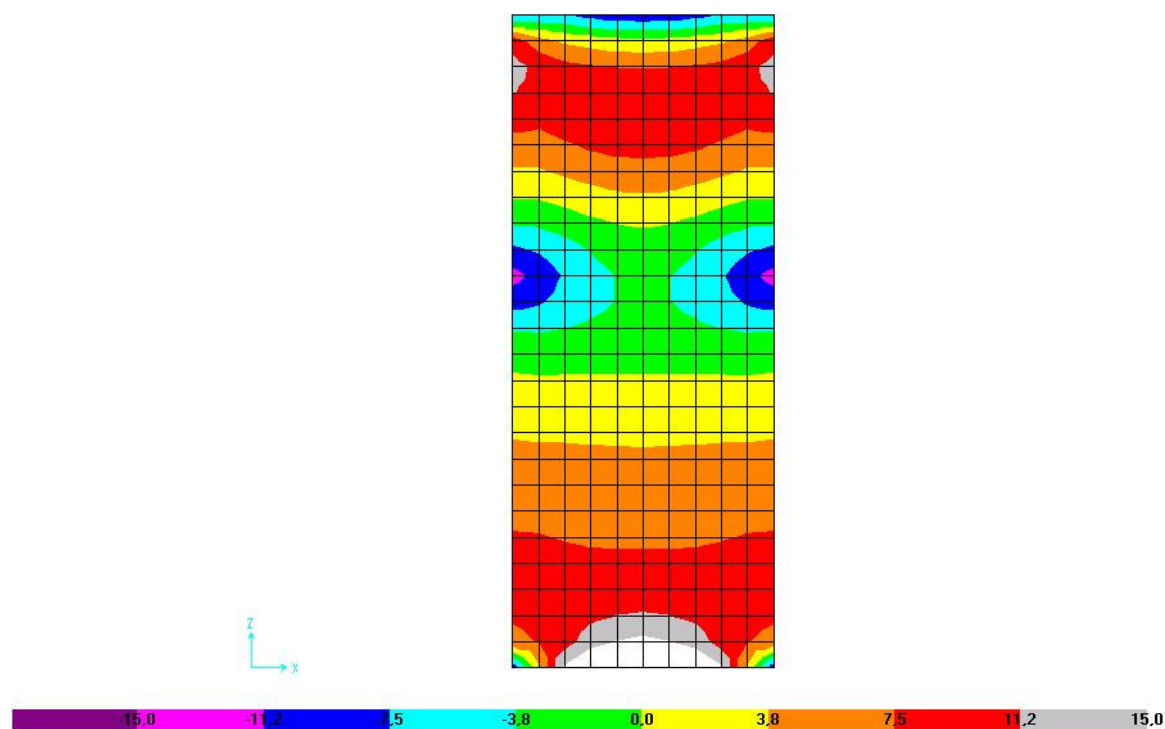
**FIGURA 6.4 – Malha de elementos para o cálculo das tensões na interface concreto/PRFV.**

Para comparar as tensões resultantes da análise numérica, foram calculadas por meio da Mecânica dos Materiais e Equações de Halphin e Tsai, as resistências do composto. As expressões utilizadas neste cálculo estão apresentadas no Capítulo 3 e os cálculos podem ser encontrados no Anexo C. Os valores finais encontrados estão resumidos na Tabela 6.2.

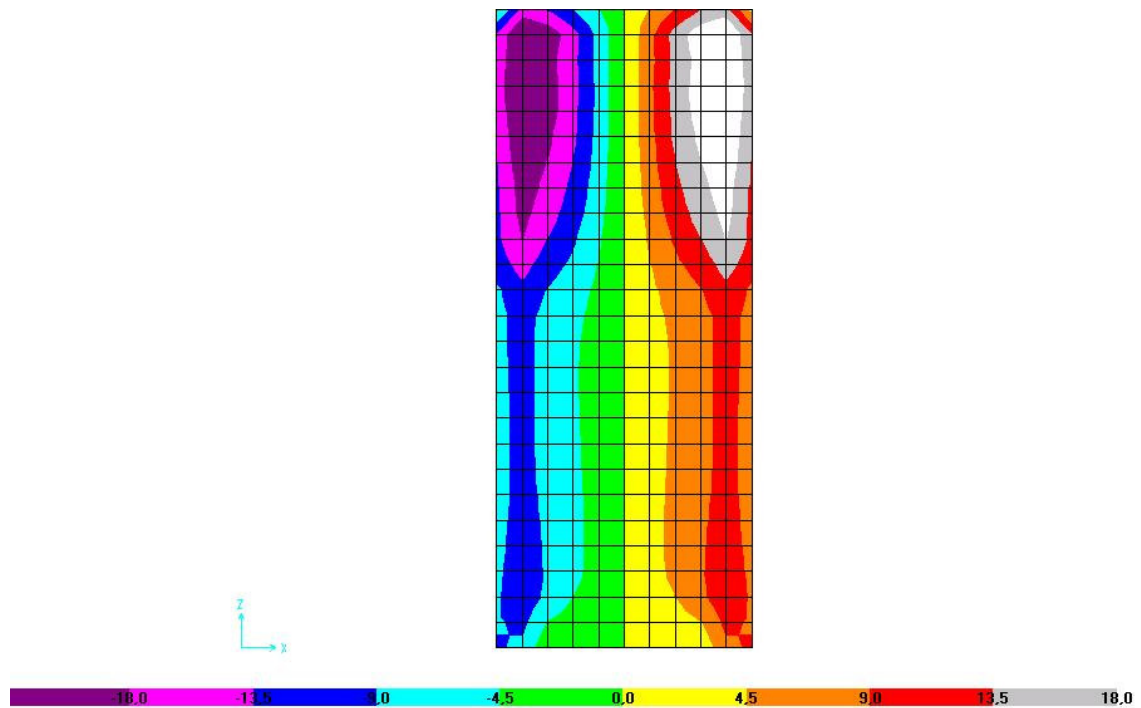
**TABELA 6.2 – Resistências mecânicas calculadas para um laminado fibra de vidro/poliéster, com  $V_f=0,6$ .**

Propriedade mecânica	Conforme item 3.3 (MPa)
Resistência à tração longitudinal	990,00
Resistência à tração transversal	51,71
Resistência ao cisalhamento	20,59

Os valores obtidos na análise numérica estão apresentados nas Figuras 6.5 e 6.6, para as tensões de tração na direção transversal às fibras e de cisalhamento, respectivamente.

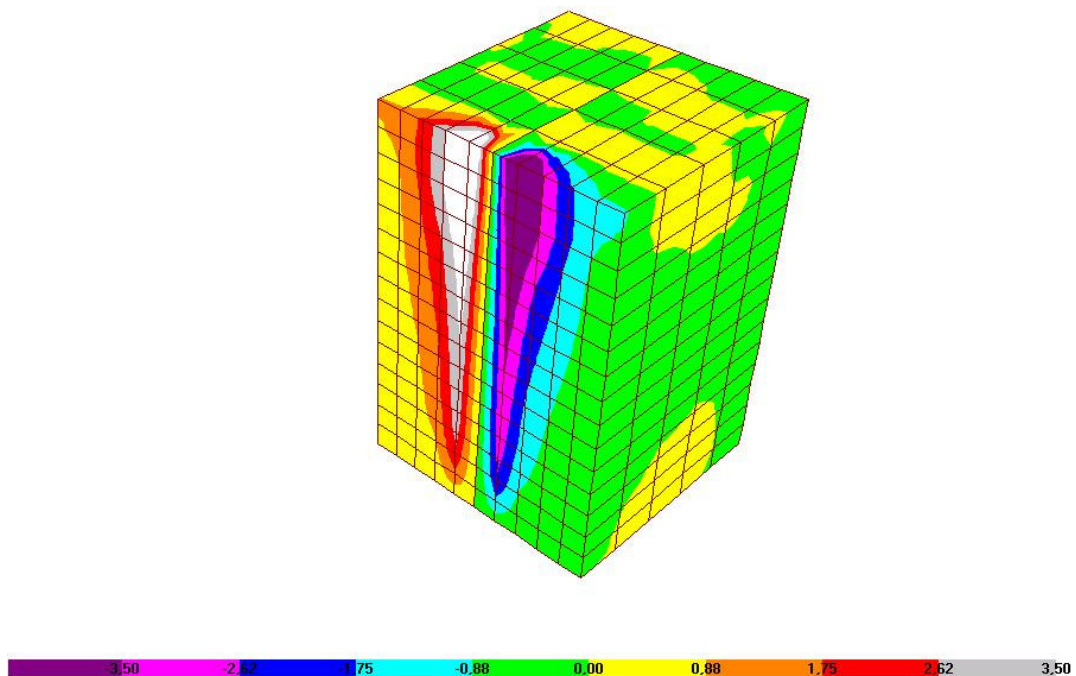


**FIGURA 6.5 – Tensão normal na direção transversal às fibras, na alma do perfil de PRFV, em MPa.**



**FIGURA 6.6 – Tensão de cisalhamento no plano da alma do perfil de PRFV, em MPa.**

As tensões de cisalhamento na interface do prisma de concreto com o perfil de PRFV podem ser vistas na Figura 6.7.



**FIGURA 6.7 – Tensão de cisalhamento na interface do prisma de concreto/PRFV, em MPa.**

As tensões na direção longitudinal do corpo-de-prova não foram apresentadas em função da elevada resistência do PRFV nesta direção.

As tensões fornecidas pelo modelo numérico mostram a viabilidade do ensaio proposto para o estudo da aderência concreto/PRFV. As tensões observadas nos modelos do perfil mostraram-se abaixo dos seus valores de ruptura. Desta forma a ruptura possivelmente ocorrerá na interface prisma de concreto/perfil de PRFV e não no perfil.

#### 6.4. Análise Experimental da Aderência Concreto/PRF

Nesta etapa do trabalho foi previsto o ensaio preliminar de um corpo-de-prova com tratamento interfacial com a resina *Sikadur 31*, em função de sua facilidade de aplicação. Este ensaio piloto teve como objetivo verificar o comportamento do experimento e se necessário realizar alguns ajustes pertinentes ao ensaio, Figura 6.8. O ensaio foi realizado no LEE, do Departamento de Engenharia Civil da UFSC.

Neste ensaio obteve-se uma tensão de aderência de 3,87 MPa, e a ruptura na interface perfil/concreto, sendo portanto considerado satisfatório.

Concluída esta etapa preliminar passou-se a definição do traço do concreto a ser empregado nos ensaios definitivos para o estudo da aderência e posteriormente das lajes mistas.



**FIGURA 6.8 – Ensaio piloto de aderência concreto/PRFV: (a) dispositivo do ensaio e (b) ruptura do corpo-de-prova.**

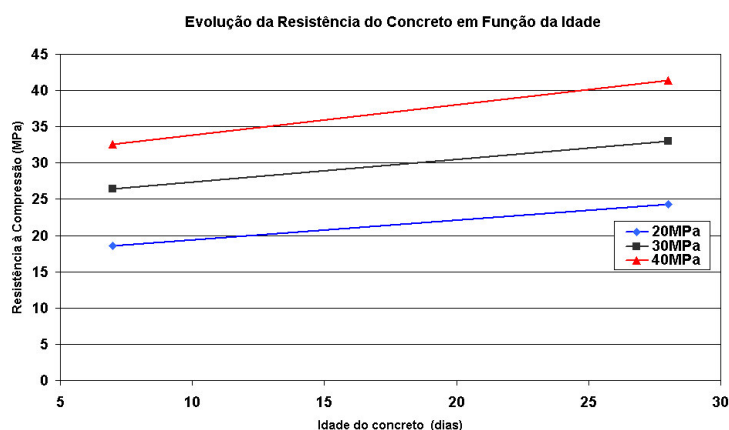
Para estudar também a influência da resistência do concreto na aderência PRFV/concreto, foram determinadas três resistências de concreto,  $f_{ck}=20$  MPa, 30 MPa e 40 MPa.

As dosagens foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção (LMCC), do Curso de Engenharia Civil, da UNESC. As proporções dos materiais adotadas foram tomadas com base nas recomendações de HELENE e TERZIAN (1998), e encontram-se apresentadas na Tabela 6.3.

**TABELA 6.3 – Traços utilizados na determinação da resistência à compressão do concreto.**

Traço em massa	Número	T – 1 (20 MPa)	T – 2 (30 MPa)	T – 3 (40 MPa)
	1:m	1:6,5 (pobre)	1:5 (normal)	1:3,5 (rico)
	1:a:p	1:2,98:3,52	1:2,18:2,82	1:1,39:2,11
Teor de argamassa (%)		53	53	53
Massa específica do concreto (kg/m <sup>3</sup> )		2400	2400	2400
Relação a/c		0,65	0,52	0,43
Consumo por m <sup>3</sup> de cimento (kg)		294	368	487
Abatimento do tronco de cone, NBR NM 67/98 (mm)		60±10	60±10	60±10
Número de corpos-de-prova		05	05	05
Resistência à compressão axial aos 7 dias (MPa)		18,19	25,82	32,14
		19,01	27,55	32,34
		18,44	25,94	33,18
Média (MPa)		18,55	26,44	32,55
Número de corpos-de-prova		05	05	05
Resistência à compressão axial aos 28 dias (MPa)		24,93	32,98	37,51
		24,40	29,99	46,61
		23,59	36,22	39,98
Média (MPa)		24,31	33,06	41,37

O concreto foi preparado seguindo-se as prescrições da Norma Brasileira NBR 12821 (1993), utilizando-se cimento do tipo CP-II-Z-32. Para avaliar a resistência à compressão da dosagem foram confeccionados 10 corpos-de-prova cilíndricos, de seção 10x20 cm (5 corpos-de-prova para ensaio aos 7 dias de idade e 5 corpos-de-prova para o ensaio aos 28 dias de idade do concreto). Os corpos-de-prova foram moldados conforme a NBR 5738 (1994) e ensaiados à compressão, seguindo-se as recomendações da NBR 5739 (1994). Também a consistência da mistura foi obtida por meio do abatimento do tronco de cone, NBR NM 67 (1998).

**FIGURA 6.9 – Resistência média à compressão para os três traços, aos 7 e 28 dias de idade do concreto.**

O gráfico da Figura 6.9 apresenta os valores médios dos corpos-de-prova do concreto, para as três resistências, aos 7 e 28 dias de idade do concreto. Como pode ser visto nesta figura e na Tabela 6.3, os valores da resistência à compressão do concreto aos 28 dias obtiveram valores dentro do esperado para os traços especificados. Desta maneira estes traços foram adotados para o estudo da aderência concreto/PRFV e para a laje mista, no caso do traço para a resistência de 30 MPa.

Definido o programa experimental, passou-se para a próxima etapa, ou seja, iniciar os ensaios de aderência para a definição da interface que será empregada na laje mista.

Os corpos-de-prova de aderência foram serrados dos perfis pultrudados, do mesmo lote de fabricação dos perfis que serão empregados na confecção da laje mista. Depois de cortados, estes foram lixados na região da interface, com uma lixa do tipo resinada, número 220. Esta operação, ilustrada na Figura 6.10, teve como finalidade retirar a camada externa de resina, de maneira a propiciar uma melhor interação entre os materiais, e compreendeu um período de aproximadamente 5 minutos, para cada face.

A interface com Sikadur 32 Gel foi preparada no dia anterior à mistura do concreto, de maneira a propiciar a cura da resina com a areia. Seu processo consistiu em misturar os componentes, aplicar sobre o perfil a resina e após derramar uma camada uniforme de areia, de 2,0 cm de altura, de maneira a fornecer uma igual pressão sobre a resina em toda a superfície do perfil. Assim, foi confeccionada uma fôrma em madeira compensado para possibilitar esta acomodação da areia sobre a seção do perfil submetida ao tratamento da interface, como pode ser visto na Figura 6.11. A areia empregada foi a mesma utilizada na dosagem dos concretos.



**FIGURA 6.10 – Remoção da camada superficial de resina dos perfis de PRFV.**

Para cada uma das faces dos perfis foi preparada a mistura e logo após aplicada sobre o perfil com um pincel, foi aplicada a areia. Depois de 2 horas, o corpo-de-prova foi virado para a aplicação na outra face. Duas horas após a fôrma de areia foi retirada e o corpo-de-prova foi



deixado no laboratório para a cura da resina. Este tempo de duas horas foi estipulado, respeitando-se o tempo de vida útil da mistura, de 1 hora, mais 1 hora para a cura inicial da resina. Este processo foi realizado 24 horas antes da adição do concreto na fôrma, para confecção do corpo-de-prova de aderência.



(a) (b)  
**FIGURA 6.11 – (a) Aplicação da camada de areia sobre o perfil, para a interface com Sikadur 32 Gel; (b) Cura dos corpos-de-prova no laboratório.**

Por outro lado, na interface com Sikadur 31, foi aplicada a resina diretamente sobre o perfil, no momento anterior à preparação do concreto. A mistura foi aplicada empregando-se uma espátula, como pode ser visto na Figura 6.12.



**FIGURA 6.12 – Aplicação da camada de Sikadur 31 sobre o perfil.**

As dimensões nominais para as duas misturas bem como suas proporções e tempo de mistura foram seguidas de acordo com as especificações do fabricante e estão apresentadas na Tabela 6.4.

Importante salientar que antes da aplicação de cada uma das interfaces, isto é: (a) sem tratamento superficial, (b) Sikadur 31 e (c) Sikadur 32 Gel, a superfície do perfil foi limpa com um solvente, de maneira a retirar as impurezas presentes na superfície, tais como pó e graxas (em função do contato no manuseio do perfil).

**TABELA 6.4 – Características das resinas utilizadas, fornecidas pelo fabricante.**

Propriedades	Sikadur 31	Sikadur 32 Gel
Tempo de mistura manual (min)	5	5
Espessura nominal da camada (mm)	1,5	0,5
Componentes A:B (em peso)	1:1,18	2:1

Após o término da preparação dos corpos-de-prova, deu-se início a fabricação do concreto (com os traços indicados na Tabela 6.3). Os 9 corpos-de-prova, para cada traço estudado, foram confeccionados na seguinte ordem, 1º dia: 40 MPa; 2º dia: 30 MPa; 3º dia: 20 MPa. Na Figura 6.13 é mostrado um panorama destes corpos-de-prova para a resistência de 40 MPa. Também foram coletados 6 corpos-de-prova cilíndricos de 10x20cm para a verificação da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto.

**FIGURA 6.13 – Panorama dos corpos-de-prova de aderência, para a resistência de 40MPa.**

Logo após a moldagem, conforme a NBR 5738 (1994), os corpos-de-prova foram cobertos, com uma lona plástica, com a finalidade de evitar a perda de água do concreto. No dia seguinte foi realizado o trabalho de desfôrma dos corpos-de-prova. Agora, estes já se encontravam na sua geometria para a realização do ensaio de aderência, conforme mostra a Figura 6.14.

**FIGURA 6.14 – Corpos-de-prova de aderência após a etapa de desfôrma.**

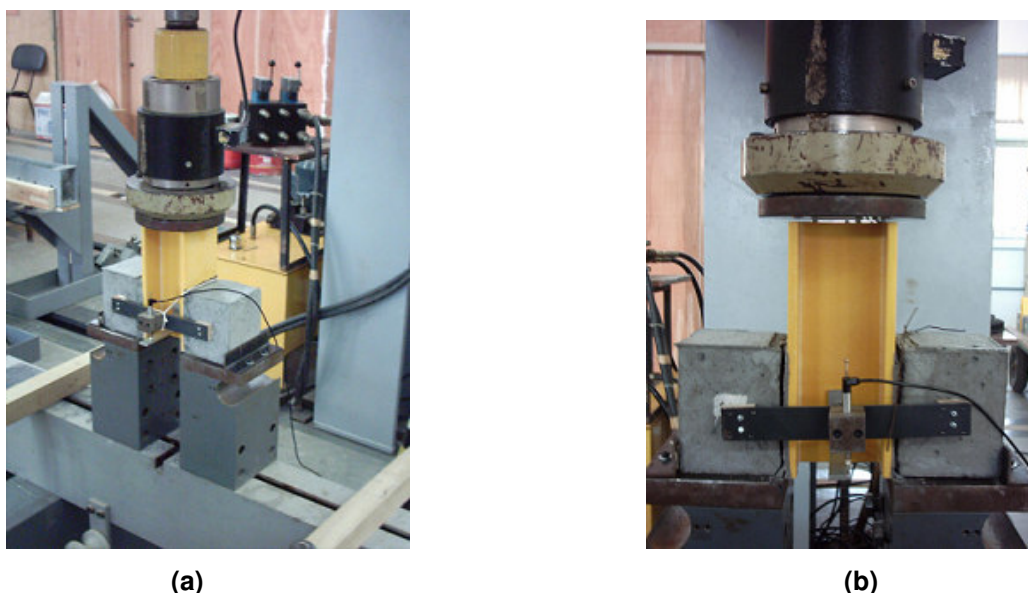


Todos os corpos-de-prova foram etiquetados para conhecimento da resistência do concreto, tipo de tratamento superficial e número do corpo-de-prova. As nomenclaturas adotadas para a distinção dos corpos-de-prova segue a seguinte ordem: CP: corpo-de-prova; 1,2 ou 3: número do corpo-de-prova; SI, S32 e S31: sem interface, interface com Sikadur 32Gel e interface com Sikadur 31, respectivamente. Em seguida, 40, 30 ou 20, as resistências à compressão de 40 MPa, 30 MPa e 20 MPa, respectivamente.

Exemplificando, tem-se que o corpo-de-prova de nomenclatura CP-2-S32-40 significa, o corpo-de-prova número 2, da interface com Sikadur 32Gel, para o concreto de resistência 40 MPa.

Após a desfôrma dos corpos-de-prova, as alturas dos prismas de concreto foram medidas com um paquímetro digital, marca Mitutoyo, de precisão 0,01 mm. Foram medidos os dois prismas no corpo-de-prova, tomando-se também em cada prisma, as medidas em cada lado. Assim, para cada corpo-de-prova foram tomadas quatro leituras de altura do prisma de concreto, em seguida calculada sua altura média, para a determinação da área da interface concreto/PRFV e posteriormente a tensão de aderência do corpo-de-prova.

Os ensaios foram realizados aos 28 dias de idade do concreto, sendo previsto o ensaio de 3 corpos-de-prova para cada interface, para cada valor de resistência do concreto, totalizando 27 corpos-de-prova. A interface que apresentar o melhor desempenho de resistência será utilizada na confecção da laje mista. A Figura 6.15 ilustra a realização do ensaio de aderência concreto/PRF.



**FIGURA 6.15 – Ensaio de aderência para o estudo da interface concreto/PRF.**

O carregamento foi aplicado por meio de um pistão hidráulico, marca *Sperry Vickers*, de curso 300 mm, com capacidade de 250 kN, fixado a um pórtico de reação, sendo este fixo em uma laje de reação. Os deslocamentos relativos entre o perfil pultrudado e o prisma de

concreto foram medidos por meio de dois Transdutores Lineares de Deslocamento (LVDT's), marca HBM WI-10-T, com campo de leitura de 10 mm, dispostos nas faces laterais do perfil, e fixados em réguas de alumínio, fixas na altura média dos prismas de concreto, ambos ligados a um microcomputador por meio de um sistema de aquisição de dados marca *HBM/Spider 8* (Software: Catman 4.0) com 4 canais. A carga foi lida por meio de uma célula de carga, marca *Kratos*, de capacidade 200kN, fixada ao pistão hidráulico e ligada ao sistema de aquisição de dados.

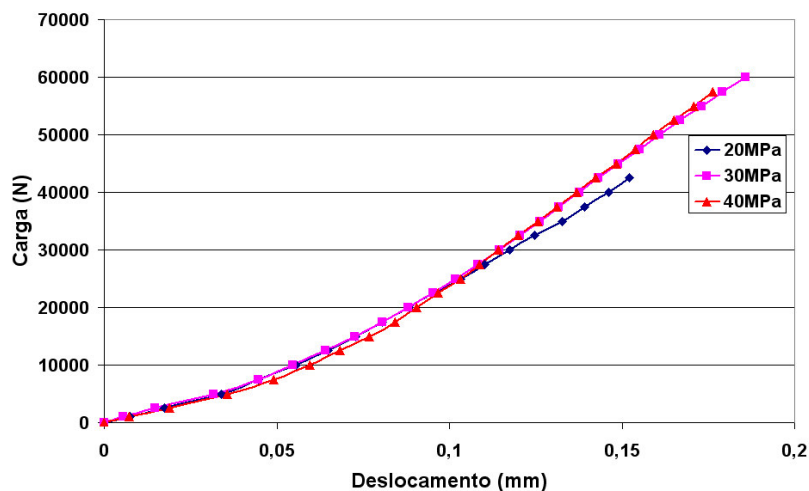
Os pares carga x deslocamento foram medidos automaticamente pelo sistema de aquisição de dados até a ruptura do conjunto concreto/PRFV, tomando-se a média dos valores dos deslocamentos para os dois LVDT's nas análises posteriores.

O dispositivo do ensaio impõe que o cutelo de aplicação de carga seja rotulado, reduzindo-se assim possíveis excentricidades no carregamento e possibilitando a aplicação de um carregamento vertical e igualmente distribuído nos dois LVDT's. A taxa de carregamento empregada nos ensaios foi de 10 kN/min. Este valor foi adotado com base em trabalhos de outros pesquisadores, como por exemplo, HALL e MOTTRAM (1998), que utilizaram uma taxa de carregamento de 5 kN/min e AIELLO e PECCE (2001), que no ensaio de cisalhamento duplo adotaram uma taxa de 15 kN/min. Na Tabela 6.5 estão apresentadas as cargas de ruptura e a tensão de aderência para cada corpo-de-prova.

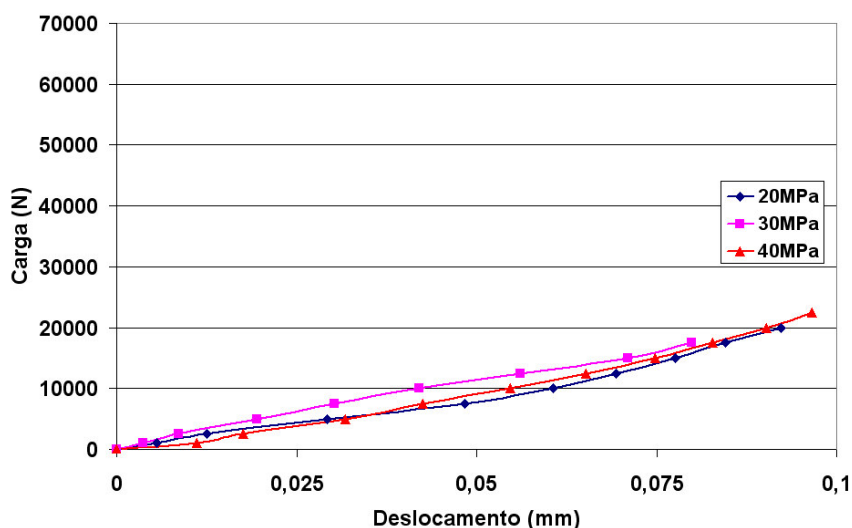
**TABELA 6.5 – Resumo com os carregamentos de ruptura e a tensão de aderência, para cada corpo-de-prova, nas três resistências do concreto.**

	Nomenclatura dos corpos-de-prova	Altura média (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga de Ruptura (N)	Tensão de Aderência (MPa)	Planos de Ruptura
Concreto 40MPa	CP-1-SI-40	119,63	12154,66	817,57	0,03	2
	CP-2-SI-40	120,18	12210,03	485,80	0,02	1
	CP-3-SI-40	119,58	12149,58	1350,77	0,06	1
	CP-1-S32-40	120,28	12220,70	45879,00	1,88	1
	CP-2-S32-40	119,07	12097,51	44504,53	1,84	2
	CP-3-S32-40	120,27	12219,69	41743,73	1,71	2
	CP-1-S31-40	119,94	12185,40	68984,40	2,83	1
	CP-2-S31-40	119,72	12163,30	68948,80	2,83	2
	CP-3-S31-40	120,69	12261,60	57787,20	2,36	2
Concreto 30MPa	CP-1-SI-30	119,59	12150,09	746,48	0,03	2
	CP-2-SI-30	-	-	-	-	-
	CP-3-SI-30	119,49	12139,93	1457,41	0,06	2
	CP-1-S32-30	119,06	12095,99	18271,03	0,76	1
	CP-2-S32-30	120,10	12202,41	12713,90	0,52	1
	CP-3-S32-30	118,02	11990,83	15687,96	0,65	1
	CP-1-S31-30	120,21	12213,34	60536,11	2,48	2
	CP-2-S31-30	119,75	12166,60	62870,35	2,58	2
CP-3-S31-30	120,38	12230,10	70169,28	2,87	2	
Concreto 20MPa	CP-1-SI-20	120,61	12253,47	1729,90	0,07	2
	CP-2-SI-20	119,98	12189,46	936,06	0,04	2
	CP-3-SI-20	119,51	12141,71	1279,68	0,05	2
	CP-1-S32-20	121,53	12346,94	28970,60	1,17	2
	CP-2-S32-20	119,84	12175,74	19372,98	0,80	1
	CP-3-S32-20	120,27	12219,43	30262,13	1,24	2
	CP-1-S31-20	121,34	12328,14	66780,49	2,71	2
	CP-2-S31-20	120,89	12281,92	52573,64	2,14	1
	CP-3-S31-20	120,15	12207,49	43781,74	1,79	2

Além disso foram traçados diagramas carga x deslocamento dos ensaios para os corpos-de-prova com interface com Sikadur 31 e Sikadur 32Gel. Não foi traçado o diagrama para os corpos-de-prova sem interface, pois os resultados das tensões de aderência mostraram-se bastante reduzidos. Nas Figuras 6.16 e 6.17 estão apresentados os diagramas carga x deslocamento para os corpos-de-prova com as interfaces com Sikadur 31 e Sikadur 32 Gel, respectivamente. Para a representação do diagrama é utilizada a média dos valores dos deslocamentos obtidos nos três ensaios, para cada interface e resistência do concreto.

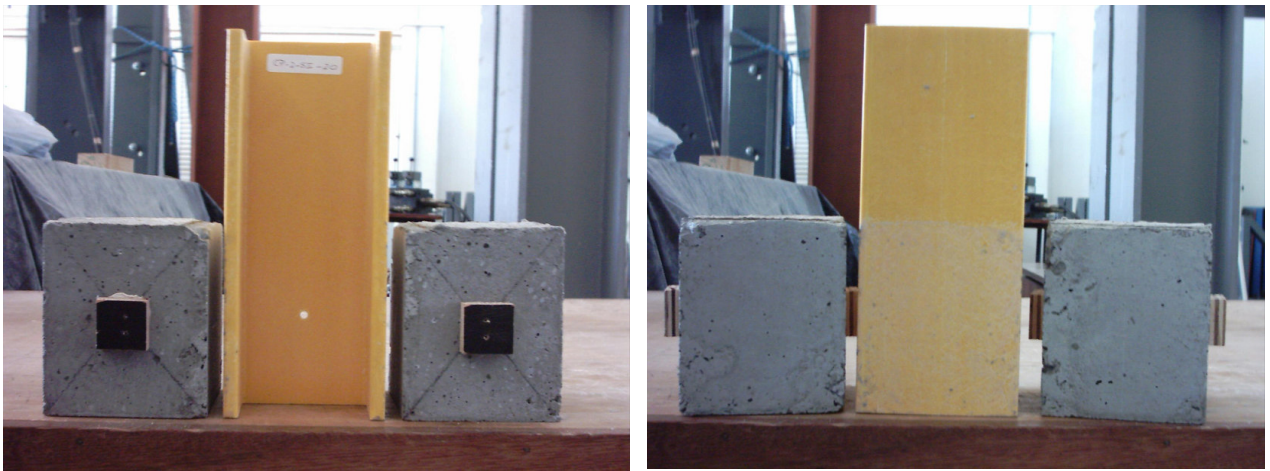


**FIGURA 6.16 – Diagrama carga x deslocamento para os corpos-de-prova com interface de Skadur 31, para as três resistências de concreto.**

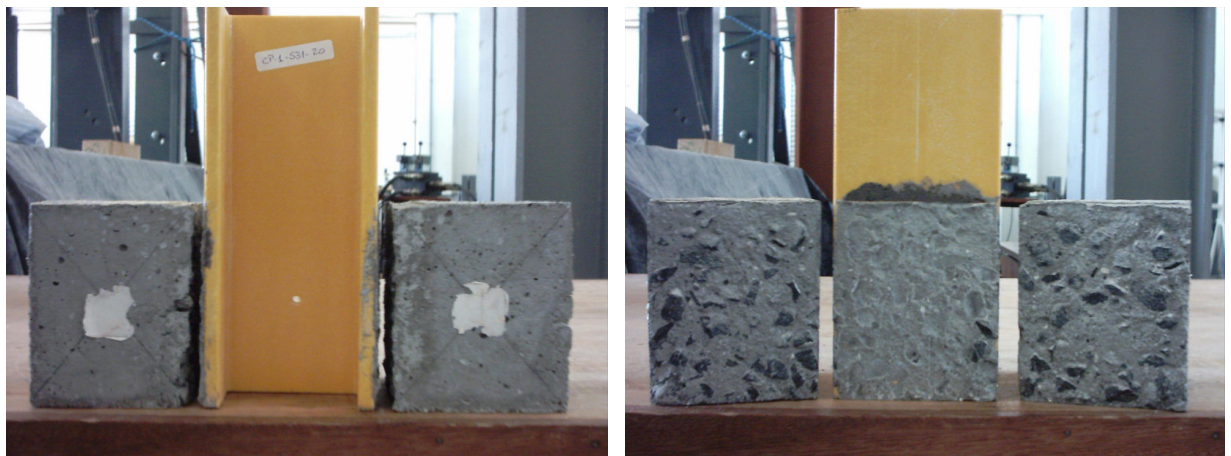


**FIGURA 6.17 – Diagrama carga x deslocamento para os corpos-de-prova com interface de Skadur 32 Gel, para as três resistências de concreto.**

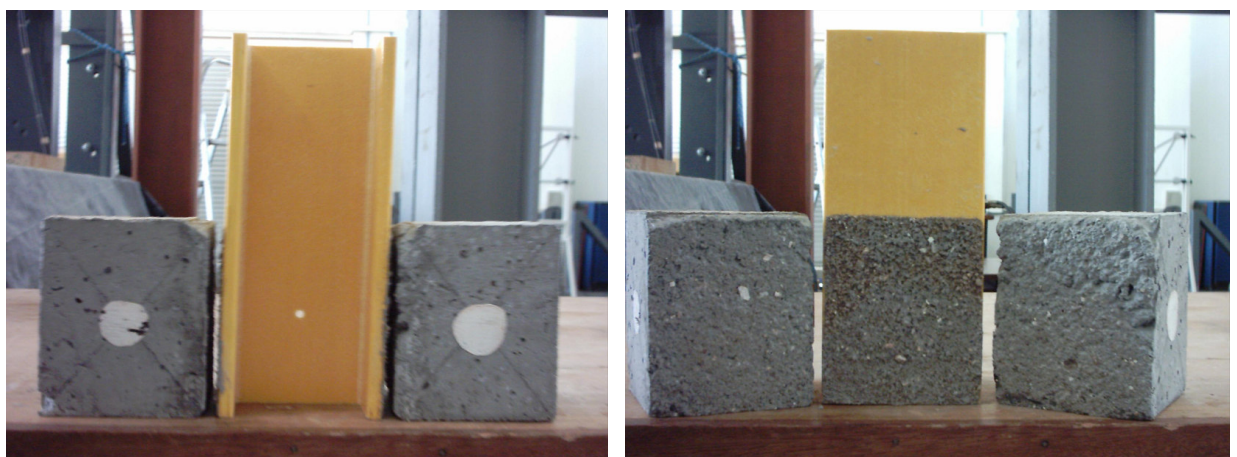
As rupturas típicas para cada tipo de interface estão apresentadas nas Figura 6.18, 6.19 e 6.20, para os corpos-de-prova sem tratamento na interface, interface com a resina Sikadur 31 e interface com a resina Sikadur 32 Gel, respectivamente.



(a) (b)  
**FIGURA 6.18 – Ruptura típica dos corpos-de-prova sem tratamento na interface.**



(a) (b)  
**FIGURA 6.19 – Ruptura típica dos corpos-de-prova com tratamento na interface com Sikadur 31.**



(a) (b)  
**FIGURA 6.20 – Ruptura típica dos corpos-de-prova com tratamento na interface com Sikadur 32Gel.**



Também foram retirados 6 corpos-de-prova cilíndricos, de seção 100x200 mm, para cada uma das dosagens do concreto (20, 30 e 40 MPa), para a determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias. Destes 6, 3 foram utilizados para a determinação da resistência à compressão e, os outros 3, para o cálculo do módulo de elasticidade.

Os corpos-de-prova foram moldados logo após a confecção dos prismas de concreto para o ensaio de aderência, e, no dia seguinte, desmoldados e imersos em solução de água e cal.

Os corpos-de-prova foram ensaiados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), do Curso de Engenharia Civil, da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), seguindo-se as preconizações da NBR 8522 (1984). No ensaio foi empregada uma prensa com capacidade de 2000 kN, marca EMIC, modelo PCI-200. Na Tabela 6.6 encontra-se um resumo dos valores encontrados para as três dosagens de concreto.

**TABELA 6.6 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos utilizados no estudo de aderência.**

	Unidade	Concreto 40 MPa		Concreto 30 MPa		Concreto 20 MPa	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Resistência à compressão	MPa	42,64	0,90	33,84	2,28	23,05	1,20
Módulo de elasticidade	GPa	45,23	2,37	35,64	1,97	29,05	1,65

### 6.5. Análise dos Resultados da Aderência Concreto/PRF

Na maioria das situações em que a distribuição da média amostral é aplicada, o desvio-padrão populacional é desconhecido. No lugar dele, o desvio-padrão de uma única amostra precisa ser usado. Embora o valor esperado da variância amostral seja a variância populacional, o desvio padrão amostral é um número aleatório e seu uso pode ser entendido como o uso de algo que acrescenta incerteza à distribuição amostral, NEUFELD (2003). Desta maneira, a distribuição  $t$  (conhecida como distribuição de *Student*) é usada no lugar da distribuição  $z$ , quando o desvio-padrão populacional é desconhecido. Todavia, antes de usar a distribuição  $t$ , o valor da média amostral deve ser transformada de maneira idêntica ao modo usado para padronizar a média amostral a uma variável  $z$ . Nas Tabelas 6.7 a 6.9 são apresentadas as análises da distribuição de *Student* para os corpos-de-prova com as três diferentes interfaces e resistências à compressão do concreto.

**TABELA 6.7 – Análise da média com a distribuição  $t$ , para os corpos-de-prova sem interface.**

Corpo-de-prova (Sem Interface)	Resistência do concreto		
	C40	C30	C20
CP-1 (MPa)	0,06	0,03	0,07
CP-2 (MPa)	0,03	0,06	0,05
CP-3 (MPa)	0,02	-	0,04
Média	0,037	0,045	0,053
Desvio Padrão	0,021	0,021	0,015
tmax	1,121		1,091
tmin	0,801		0,873
t <sub>2;0,45</sub>	0,931		0,931
<b>Valor adotado</b>	0,025	0,045	0,045

**TABELA 6.8 – Análise da média com a distribuição  $t$ , para os corpos-de-prova com resina Sikadur 32Gel.**

Corpo-de-prova (Sikadur 32 Gel)	Resistência do concreto		
	C40	C30	C20
CP-1 (MPa)	1,88	0,76	1,24
CP-2 (MPa)	1,84	0,65	1,17
CP-3 (MPa)	1,71	0,52	0,8
Média	1,810	0,643	1,070
Desvio Padrão	0,089	0,120	0,236
tmax	0,788	0,971	0,719
tmin	1,125	1,027	1,142
t <sub>2;0,45</sub>	0,931	0,931	0,931
<b>Valor adotado</b>	1,860	0,705	1,205

**TABELA 6.9 – Análise da média com a distribuição  $t$ , para os corpos-de-prova com resina Sikadur 31.**

Corpo-de-prova (Sikadur 31)	Resistência do concreto		
	C40	C30	C20
CP-1 (MPa)	2,83	2,87	2,71
CP-2 (MPa)	2,83	2,58	2,14
CP-3 (MPa)	2,36	2,48	1,79
Média	2,673	2,643	2,213
Desvio Padrão	0,271	0,203	0,464
tmax	0,577	1,119	1,070
tmin	1,155	0,806	0,912
t <sub>2;0,45</sub>	0,931	0,931	0,931
<b>Valor adotado</b>	2,830	2,530	1,965

Como pode ser visto nestas tabelas, para todas as interfaces e resistências do concreto, encontraram-se valores fora dos limites de confiabilidade estabelecidos para a análise. Desta maneira estes valores foram descartados e a média foi novamente calculada (**valor adotado**).

Além disso, na Tabela 6.8, para o concreto de resistência 30 MPa, a análise indica que o resultado do ensaio deve ser eliminado ou refeito.

Refazendo os cálculos, tem-se as médias das resistências que serão adotadas nas análises estatísticas, Tabela 6.10.

**TABELA 6.10 – Médias das resistências para os ensaios de aderência concreto/PRFV.**

Interface	Unidade	Concreto 40 MPa	Concreto 30 MPa	Concreto 20 MPa
Sem Interface	MPa	0,025	0,045	0,045
Sikadur 31	MPa	2,83	2,53	1,965
Sikadur 32Gel	MPa	1,86	-	1,205

Agora será realizada uma análise estatística para determinar se há influência entre os valores de aderência, entre os tratamentos interfaciais para uma mesma resistência de concreto e, entre as diferentes resistências.

Para verificar a influência da resistência do concreto nos resultados dos ensaios foi realizada uma análise de variância (ANOVA). Esta comparação tem por base a distribuição “F”. O valor resultante da estatística deve ser comparado com a tabela de valores de F, que indica o valor máximo da estatística para o caso da hipótese inicial ser verdadeira, a um determinado nível de significância, neste caso 5 % ( $F_{0,05}$ ). Assim, se  $F > F_{0,05}$  pode-se concluir que existe uma diferença significativa entre as médias analisadas, ou seja, a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada. Para o desenvolvimento das análises adotou-se a função contida na planilha Excel 2000 – ANOVA fator único.

Tomando-se assim os valores referentes à aderência concreto/PRFV para as três interfaces, nos concretos de 20 MPa (C20), 30 MPa (C30) e 40 MPa (C40), têm-se as análises apresentadas nas Tabelas 6.11 e 6.12.

**TABELA 6.11 – Resumo estatístico para as diferentes resistências do concreto.**

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
C40	6	9,43	1,572	1,624
C30	4	5,15	1,288	2,060
C20	6	6,43	1,072	0,761

**TABELA 6.12 – Análise ANOVA para as diferentes resistências do concreto.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,754	2	0,377	0,271	0,767	3,806
Dentro dos grupos	18,102	13	1,392			
Total	18,856	15				

Como  $F < F_{crítico}$ , verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais não pode ser rejeitada. Ou seja, não existe influência da resistência do concreto nos resultados dos ensaios, com 95 % de confiabilidade.



Para verificar também a influência do tipo de interface de aderência nos resultados dos ensaios foi realizada uma análise de variância (ANOVA). Os valores referentes das análises de aderência concreto/PRFV para as três interfaces, nos concretos de resistências 40 MPa, 30 MPa e 20 MPa, encontram-se apresentadas nas Tabelas 6.13 e 6.14.

**TABELA 6.13 – Resumo estatístico para as diferentes interfaces de aderência.**

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Sem Interface	3	0,115	0,038	0,000
Sikadur 32 Gel	2	3,065	1,533	0,215
Sikadur 31	3	7,325	2,442	0,193

**TABELA 6.14 – Análise ANOVA para as diferentes interfaces de aderência.**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	8,792	2	4,396	36,598	0,001	5,786
Dentro dos grupos	0,601	5	0,120			
Total	9,393	7				

Como  $F > F_{\text{crítico}}$ , verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais pode ser rejeitada. Ou seja, existe influência da interface de aderência nos resultados dos ensaios, com 95 % de confiabilidade.

Verificou-se também se há influência das resistências dos concretos, ou seja, nos traços de 40 MPa, 30 MPa e 20 MPa, nas resistências de aderência obtidas pelas resinas Sikadur 31 e Sikadur 32Gel. Para esta análise adotou-se a função contida na planilha Excel 2000 – Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes. Os valores da análise estão apresentadas na Tabela 6.15.

**TABELA 6.15 – Teste t, para as diferentes interfaces de aderência, com as resinas Sikadur 31 e Sikadur 32 Gel.**

	<i>Sikadur 31</i>	<i>Sikadur 32 Gel</i>
Média	2,442	1,533
Variância	0,193	0,215
Observações	3	2
Variância agrupada	0,2001	
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	3	
Stat t	2,226	
P(T<=t) uni-caudal	0,056	
t crítico uni-caudal	2,353	
P(T<=t) bi-caudal	0,112	
t crítico bi-caudal	3,182	

Como  $t < t_{\text{crítico (bi-caudal)}}$ , verifica-se que a hipótese de que as médias são iguais não pode ser rejeitada. Ou seja, não existe influência da resistência do concreto nos resultados dos ensaios de aderência entre as resinas Sikadur 31 e Sikadur 32 Gel, com 95 % de confiabilidade.

## 6.6. Considerações Complementares

A análise numérica pelo MEF mostrou que as tensões no corpo-de-prova de aderência permanecem, durante o ensaio, em níveis reduzidos, quando comparadas com as resistências do concreto e PRF, indicando assim, a viabilidade do ensaio.

As análises estatísticas mostraram nos corpos-de-prova ensaiados que a resistência do concreto não influenciou nos resultados de aderência entre o concreto e o PRF. Além disso, descartando nas análises os resultados da interface sem tratamento, foi constatado que não houve influência da resistência do concreto nos ensaios de aderência entre as resinas Sikadur 31 e Sikadur 32 Gel.

Também foi constatado nas análises que há influência da interface de aderência nos resultados dos corpos-de-prova ensaiados.

Como a resina Sikadur 31 resultou na melhor interface concreto/perfil de PRFV, esta foi selecionada para a utilização na laje mista desenvolvida neste trabalho. No próximo Capítulo será apresentada uma descrição detalhada do sistema de laje mista proposto. Além disso, serão desenvolvidos os procedimentos utilizados no seu dimensionamento.

## 7. DIMENSIONAMENTO E ENSAIOS DE FLEXÃO DA LAJE MISTA

### 7.1. Introdução

O concreto armado convencional é amplamente utilizado na indústria da construção em função de sua disponibilidade, baixo custo do aço e concreto, conhecimento por parte dos engenheiros dos critérios e normas de projeto e da vasta experiência na sua utilização. Por outro lado, a degradação de muitas estruturas em concreto armado construídas há 40 ou 50 anos atrás tem sido a principal suscetibilidade da armadura de aço em sofrer corrosão, e este é atualmente um dos maiores problemas econômicos na engenharia. É sabido que a ocorrência desta patologia trouxe na última década um crescimento tecnológico bastante intenso nas técnicas de recuperação destas estruturas.

No final da última década houve um considerável progresso para estabelecer o nascimento de tecnologias de construção utilizando o PRF como material de reforço nas estruturas de concreto. Os principais focos de atenção destes trabalhos foram a substituição das barras de aço convencionais por barras equivalentes em PRF e a utilização de mantas para o reforço de elementos estruturais comprometidos, geralmente com composições unidirecionais em fibras de vidro ou carbono e resinas poliméricas. Um minucioso estado-da-arte para estruturas de concreto com PRF foi realizado pelo Committee 440 do Instituto Americano do Concreto, COMMITTEE ACI 440R (1996).

Por outro lado nenhuma destas abordagens propostas inicialmente apresentava as vantagens de se utilizar o composto avançado como fôrma permanente para o concreto. Somente em 1990 uma abordagem mais inovadora foi proposta por Hillman e Murray. Os autores combinaram placas pultrudadas com concreto para produzir lajes com peso próprio reduzido, sendo a função do PRF de atuar como armadura e fôrma para o concreto.

Também nos anos 90 teve início por DESKOVIC et al. (1995a) a pesquisa de uma viga mista de seção caixão em PRF e concreto. Segundo os autores as seções retangulares de paredes finas são mais eficientes para vigas e são de fato as mais comumente utilizadas nos perfis pultrudados. Todavia estas seções apresentam algumas desvantagens:

- a mesa comprimida é consideravelmente mais fraca do que a mesa tracionada em função do PRFV apresentar uma resistência à compressão em torno da metade de sua resistência à tração, em função do fenômeno da flambagem local da fibra;

- a ruptura é geralmente catastrófica, sem aviso, em função dos materiais compostos apresentarem comportamento elástico linear até a ruptura;
- o projeto é geralmente governado pelos limites de deslocamentos para cargas em serviço, devido ao problema de baixo módulo de elasticidade do PRFV.

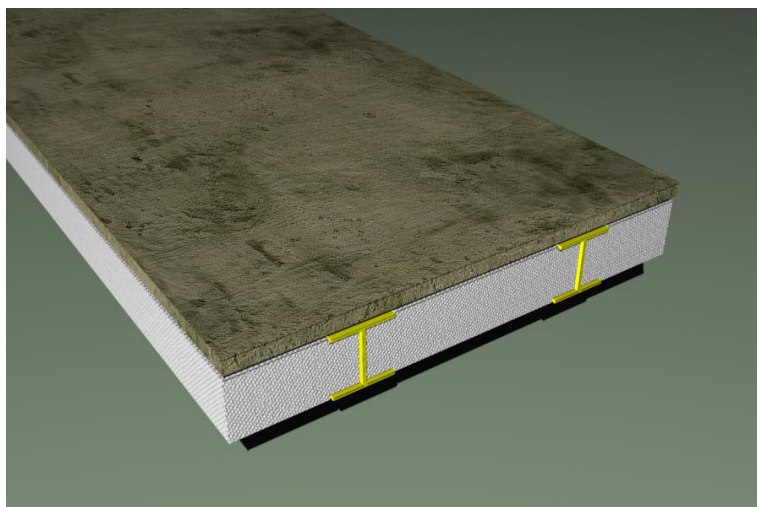
Em virtude deste conjunto de fatos alguns pesquisadores têm direcionado suas pesquisas para o desenvolvimento de uma seção mais eficiente, por meio da associação do material composto avançado com o concreto. O princípio de funcionamento desta seção é que a tensão de compressão pode ser resistida por um material com alta resistência à compressão e rigidez. Desta maneira a mesa comprimida do PRFV pode ser “eliminada” e substituída por uma camada de concreto. A tensão de tração é, por outro lado, resistida por um material com elevada resistência à tração, ou seja, o composto avançado.

Este trabalho propõe o estudo de uma laje mista utilizando perfis pultrudados de fibra de vidro, com enchimento em blocos de EPS e uma capa de concreto, na qual são adicionadas fibras curtas de polipropileno. A utilização principal da laje é em passarelas, podendo-se também utilizá-la em lajes de estruturas marítimas, edificações residenciais e industriais.

Uma descrição mais detalhada deste sistema de laje e suas dimensões encontram-se apresentadas nos itens a seguir. Além disso, são desenvolvidos os procedimentos que serão utilizados no dimensionamento da laje. Também estão apresentados os ensaios realizados de flexão a quatro pontos na laje mista e a modelagem numérica pelo MEF. Apresenta-se também a descrição do ensaio de fluência, com carregamento uniformemente distribuído sobre a laje mista, no período de 120 dias. Os resultados obtidos são analisados e as considerações relativas aos ensaios são apresentadas.

## 7.2. Laje Proposta em Concreto/PRFV

O sistema estrutural da laje mista proposta neste trabalho consiste de uma capa de concreto disposta sobre vigas de perfis *H* pultrudados em fibra de vidro, com enchimento em blocos de EPS, Figura 7.1. O conjunto de perfis e blocos funcionam como fôrma para o concreto fresco, não sendo necessário o uso de escoramentos, devendo assim a fôrma suportar também as cargas construtivas. Após a cura do concreto, os dois materiais concreto e PRFV combinam-se estruturalmente funcionando como uma laje pré-moldada de concreto. Também serão adicionados à capa de concreto fibras curtas de polipropileno com o objetivo de evitar a fissuração do concreto, devido à retração plástica. O estudo da dosagem destas fibras foi apresentado no Capítulo 5.



**FIGURA 7.1 – Arranjo da laje mista proposta em concreto/PRFV.**

A dimensão preliminar do comprimento da laje foi definida em função da flecha nas condições de construção e serviço, seguindo-se as seguintes considerações:

*i)* No primeiro momento foram determinadas as cargas construtivas referentes ao peso próprio da laje mista e considerando o concreto ainda no estado fresco, ou seja, sem parcela resistente. A partir dos pesos específicos dos materiais: concreto,  $\gamma_c=24 \text{ kN/m}^3$ , NBR 6118 (2003); perfil pultrudado,  $\gamma_{\text{PRFV}}=19,5 \text{ kN/m}^3$ , ENMAC (2003), e blocos de EPS,  $\gamma_{\text{EPS}}=0,18 \text{ kN/m}^3$ , ABRAPEX (2001), foi calculado o carregamento uniformemente distribuído ao longo do comprimento da laje, somando-se os pesos próprios destes materiais. Em outra situação, foi considerado nos cálculos um carregamento de 1,0 kN, no meio do vão, referente ao peso de um operário atuando sobre a laje e o peso próprio da laje (perfis+EPS). Em seguida, para cada uma das duas situações, foi adotada uma flecha limite de  $L/250$ , para determinar o comprimento máximo da laje mista na etapa construtiva. Este cálculo, mostrado no Anexo E, apresentou o valor de 4,79 m para o comprimento da laje.

*ii)* Em seguida foi verificado qual a flecha na situação de serviço (Estado Limite de Serviço – ELS) para a laje, considerando-se agora a contribuição resistente da camada de concreto. A estrutura foi calculada como mista, ou seja, dois materiais (concreto+PRFV), desprezando-se a contribuição de resistência do EPS. Na análises, também apresentada no Anexo E, foi adotado o método da seção transformada.

Visando a aplicação em passarelas, foi adotado um carregamento uniformemente distribuído de intensidade  $5 \text{ kN/m}^2$ , sem impacto e agindo em toda a área do passeio, conforme estabelece a NBR 7188 (1982). Além do peso próprio dos materiais, foi adotada uma carga uniformemente distribuída de  $1,5 \text{ kN/m}^2$ , referente ao peso de um elemento de revestimento.

O cálculo da solicitação de serviço foi realizado de acordo com a NBR 6118 (2003), para combinações quase-permanentes, adotada para as verificações de deformação, CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO (2004), empregando-se a Expressão (7.1).

$$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + \sum \psi_{2j} F_{qj,k} \quad (7.1)$$

Sendo:

$F_{g,k}$  → valor característico das ações permanentes;

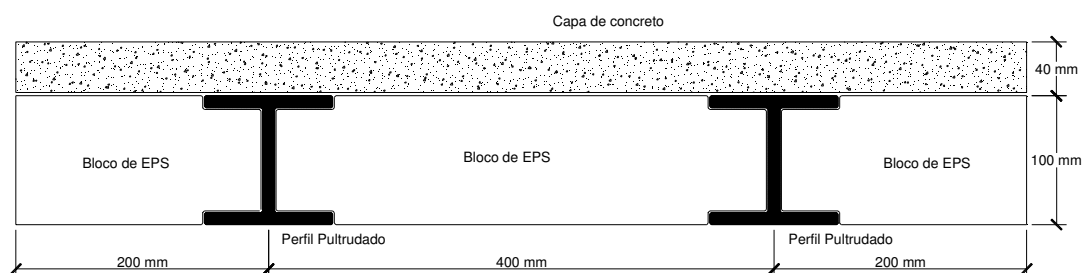
$F_{q,k}$  → valor característico das ações variáveis;

$\psi_2$  → fator de redução de combinação quase-permanente para ELS (igual a 0,4).

Os resultados mostraram que um comprimento de 4,79 m fornece uma flecha maior do que o valor limite, logo este comprimento deve ser reduzido, ou seja, quem governa o dimensionamento é o ELS e não a carga construtiva. Dimensionando então a laje para atender o limite de flecha pelo ELS, o comprimento máximo encontrado para a laje foi 4,64 m. Estes cálculos estão apresentados no Anexo E.

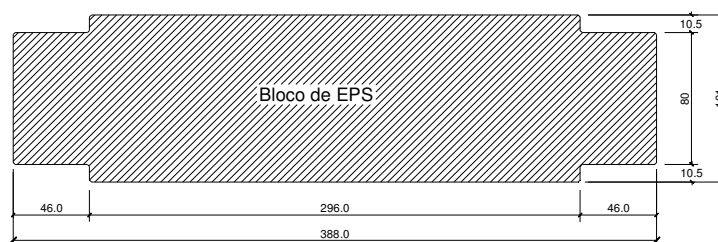
Embora os cálculos tenham apresentado um valor de 4,64 m para o comprimento da laje, foi adotado para os ensaios de flexão da laje um comprimento de 2,80 m, em virtude da facilidade na execução do ensaio e também das condições de fornecimento da empresa fabricante do perfil de PRF.

As lajes foram ensaiadas adotando-se como seção transversal uma fatia representativa de dimensões: 0,80 m de largura e 0,14 m de altura. Na Figura 7.2 é apresentada a fatia representativa da laje mista. A seção transversal dos perfis de PRFV é a mesma descrita no Capítulo 4 (apresentada na Figura 4.3).



**FIGURA 7.2 – Fatia representativa da laje mista concreto/PRFV.**

Os blocos de EPS apresentam dimensões usuais para lajes pré-moldadas de concreto, possuindo neste sistema apenas função de enchimento e, foram confeccionados por uma empresa conveniada do estado de Santa Catarina. A seção destes blocos está mostrada na Figura 7.3, possuindo 1,40 m de comprimento.



**FIGURA 7.3 – Dimensões da seção dos blocos de EPS das lajes mistas.**

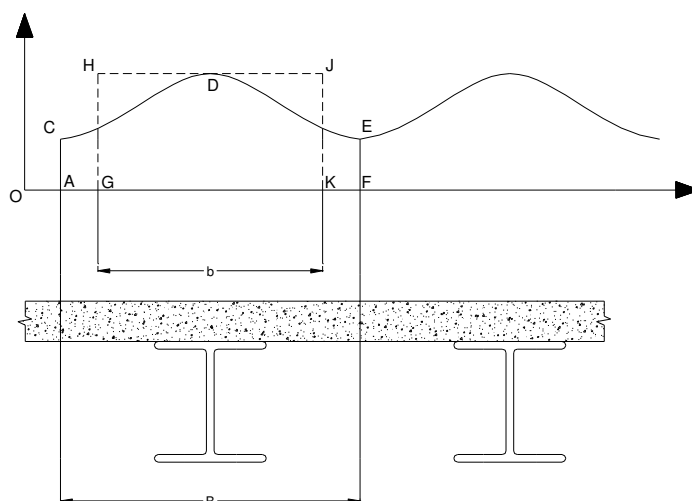
A NBR 6118 (2003) especifica que a espessura da mesa de concreto, quando não houver tubulações horizontais embutidas, deve ser maior ou igual a  $1/15$  da distância entre as nervuras e não menor que 30 mm. Além disso, a NBR 14859-1 (2002) permite considerar a capa de concreto como parte resistente se sua espessura for no mínimo igual a 30 mm; no caso da existência de tubulações, a espessura da capa acima destas deverá ser no mínimo de 20 mm. Também devem ser observados os limites da Tabela 7.1.

**TABELA 7.1 – Espessura mínima da capa de concreto. Fonte: NBR 14859-1 (2002)**

Altura total da laje (mm)	100	110	120	130	140	160	170	200	210	240	250	290	300	340
Espessura mínima da capa resistente (mm)	30	30	40	40	40	40	40	40	40	40	50	50	50	50

Desta maneira a capa de concreto adotada na laje mista proposta neste trabalho apresenta uma espessura de 40 mm.

O sistema de laje mista adotado nesta pesquisa consiste de vigas pultrudadas de seção  $H$  paralelas, com uma mesa em concreto larga e delgada. A presença de deformações de cisalhamento no plano da laje de concreto faz com que as seções não mais permaneçam planas, provocando desta maneira uma variação das tensões normais ao longo da largura da mesa, efeito conhecido como *shear lag*. Neste caso, a tensão é maior imediatamente sobre a viga, decrescendo à medida que se vai distanciando da linha de centro, conforme ilustra a Figura 7.4. Desta maneira, a contribuição da mesa de concreto não é totalmente efetiva, que leva ao conceito de largura colaborante ou largura efetiva. Considerando por exemplo nesta figura que, se a largura real  $B$  for substituída por uma largura fictícia  $b$ , de tal maneira que a área  $GHJK$  seja a mesma que a área  $ACDEF$ , a teoria convencional da flexão simples pode ainda fornecer o valor correto da máxima tensão.



**FIGURA 7.4 – Largura efetiva da laje. Fonte: JOHNSON (1994) apud QUEIROZ et al. (2001).**

Segundo JOHNSON (1994) apud QUEIROZ et al. (2001), pesquisas baseadas na teoria da elasticidade mostram que a relação  $b/B$  é muito complexa e depende da relação  $B$  com o vão  $L$ , do tipo de carregamento, das condições de contorno, da posição da seção ao longo do vão, entre outras variáveis. Em consequência disto, as normas preconizam expressões simplificadas para o cálculo da largura efetiva. A norma CEB-FIP (1998) estabelece que a largura  $b_f$  da mesa deve seguir as seguintes hipóteses.

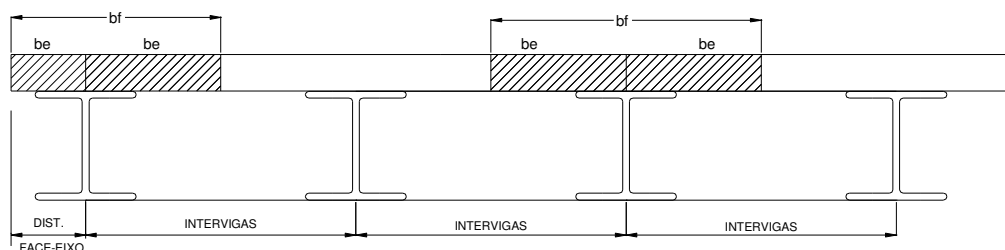
- $b_f \leq 0,1L_0$  (sendo  $L_0$ , a distância entre pontos de momentos nulos);
- $b_f \leq 3h_{t2}$  (sendo  $h_{t2}$ , a espessura do concreto pré-moldado);
- $b_f \leq 0,50a$  (sendo  $a$ , a distância entre as faces das nervuras);
- $b_f \leq b_a$  (sendo  $b_a$ , a distância da face da nervura à mesa livre).

No Brasil, o projeto de norma NBR 8800 (2003), que se encontra neste momento em estudo, para estruturas de aço e estruturas mistas aço-concreto indica que a largura efetiva  $b_f$  de uma laje é igual à soma das larguras efetivas  $b_e$  para cada lado do eixo da viga, Figura 7.5, devendo ser maior que:

- $L/8$  ( $L$  é o vão da viga);
- $1/2$  da distância até o eixo da viga adjacente (intervigas);
- Distância até a face da laje (distância do eixo à face da laje).

Analisando estes valores como referência para a definição da largura efetiva da laje, pode-se verificar que as distâncias entre os perfis atende as especificações tanto do CEB-FIP (1998), como da NBR 8800 (2003).





**FIGURA 7.5 – Larguras efetivas da laje. Fonte: CARVALHO et al. (2004).**

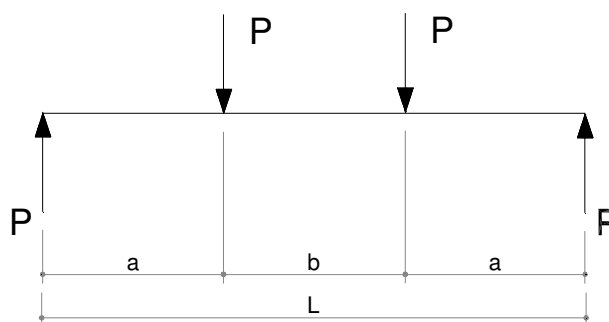
Concluída a etapa de definição e verificação das dimensões do comprimento e da seção transversal da laje mista concreto/PRFV, passou-se para a etapa seguinte de definição dos critérios de dimensionamento.

### 7.3. Análise Teórica

A laje mista foi analisada teoricamente por meio de um método simplificado, admitindo-se que esta trabalha em apenas uma direção (a do eixo longitudinal do perfil), assim como usualmente é admitido nas lajes pré-moldadas, utilizando-se o método da seção transformada, descrito em TIMOSHENKO e GERE (1994).

Este método permite que uma seção transversal formada por mais de um material seja transformada em uma seção equivalente de um único material admitindo-se que os diferentes materiais estejam perfeitamente ligados. Nas análises apresentadas a seguir, o conjunto concreto/PRFV foi transformado em uma seção equivalente de PRFV, permitindo desta maneira o cálculo simplificado da posição da linha neutra e do momento de inércia da seção.

A flecha máxima no meio do vão foi calculada pela soma de duas parcelas (deflexão em função da flexão e do cisalhamento), admitindo-se a laje flexionada em apenas uma direção, seguindo-se a configuração de ensaio esquematizada na Figura 7.3, sendo  $L$  o comprimento entre os apoios da laje.



**FIGURA 7.3 – Esquema do ensaio de flexão a quatro pontos para a laje mista concreto/PRFV.**

A deflexão total é portanto calculada pela soma das parcelas de flexão e cisalhamento, conforme a Expressão (7.2):

$$\delta_{m\acute{a}x.} = \delta_{flex\tilde{a}o} + \delta_{cisalhamento} \quad (7.2)$$

Sendo as componentes calculadas pelas Expressões (7.3) e (7.4).

$$\delta_{flex\tilde{a}o} = \frac{Pa}{24EI}(3L^2 - 4a^2) \quad (7.3)$$

$$\delta_{cisalhamento} = \frac{Pa}{GA} f_s \quad (7.4)$$

sendo:

$\delta_{flex\tilde{a}o}$  → parcela de deformação devido à flexão;

$\delta_{cisalhamento}$  → parcela de deformação devido ao cisalhamento;

$EI$  → rigidez à flexão da seção;

$GA$  → rigidez ao cisalhamento da seção;

$P$  → carga em cada cutelo de aplicação;

$a$  → distância do apoio ao cutelo de carregamento;

$L$  → distância entre apoios;

$f_s$  → fator de forma da seção.

O fator de forma,  $f_s$ , é uma variável importante neste tipo de seção transversal, em função da elevada parcela da deformação por cisalhamento. O cálculo deste fator foi obtido a partir do Princípio dos Trabalhos Virtuais, TIMOSHENKO e GERE (1994).

$$f_s = \frac{A}{I^2} \int_A \frac{Q^2}{b^2} dA \quad (7.5)$$

Sendo:

$Q$  → Momento estático da seção;

$b$  → Largura da seção transversal;

$A$  → Área da seção transversal;

$I$  → Momento de inércia da seção.

Admitindo-se uma variação linear das deformações específicas ao longo da altura da seção, obtém-se a deformação específica na superfície superior do concreto,  $\varepsilon_c$ , e nas fibras localizadas na face externa da mesa inferior do perfil de PRFV,  $\varepsilon_f$ :

$$\varepsilon_c = \frac{M}{EI} y_1 \quad (7.6)$$

$$\varepsilon_f = \frac{M}{EI} y_2 \quad (7.7)$$

Sendo  $y_1$  e  $y_2$  as distâncias da linha neutra às faces de maior compressão e tração, respectivamente, e  $M$  o momento fletor atuante.

#### 7.4. Critérios de Dimensionamento

De maneira simples, sem levar em consideração a forma da seção do PRF, geometria do reforço ou tipo do material, BAKIS et al. (2002) explicam que existem dois modos de ruptura possíveis para os sistemas estruturais em materiais compostos associados com o concreto. As seções com pequenas quantidades de composto rompem por tração do PRF, enquanto grandes quantidades de PRF resultam em rupturas por esmagamento do concreto na região comprimida, antes de atingir a deformação última à tração da camada mais afastada do material composto. Por outro lado, de acordo com DESKOVIC et al. (1995a), outras rupturas estão associadas a estas estruturas: (1) a alma pode flambar ou romper em função das tensões de cisalhamento, resultando desta maneira em ruptura por cisalhamento; (2) a ligação entre a interface PRFV e o concreto pode falhar causando descolamento relativo entre os dois materiais e (3) se a camada de concreto é fina o concreto pode falhar por cisalhamento.

A capacidade resistente à flexão da laje mista proposta é calculada a partir do comportamento constitutivo do concreto e PRF, utilizando-se a compatibilidade de deformações e o princípio do equilíbrio interno das forças, considerando-se desprezível a resistência à tração do concreto e admitindo-se uma perfeita ligação entre o concreto e o material composto avançado. Admite-se no dimensionamento que o PRF é um material elástico-linear e o concreto é elástico não-linear.

A forma da expressão analítica dependerá do modo de ruptura. O Bloco Retangular Equivalente (BRE) de tensões é adequado para a estimativa da capacidade resistente à flexão

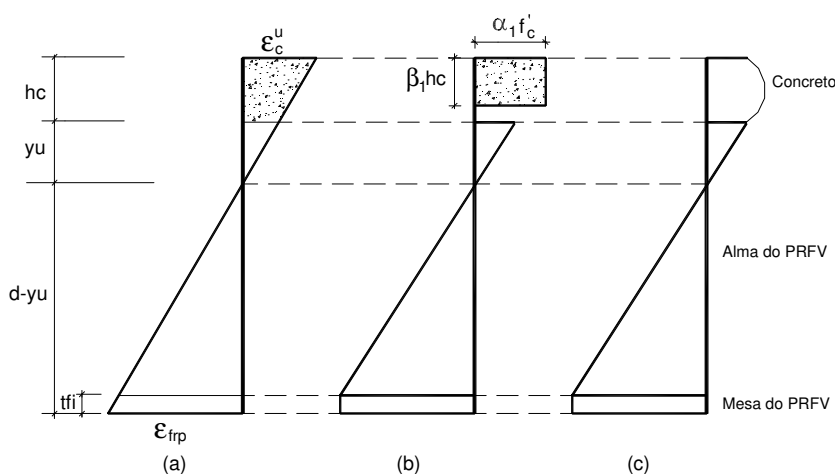
quando a ruptura na região comprimida ocorrer na seção de concreto, desde que a compatibilidade de deformações seja usada para determinar as forças de tração do PRF.

A maioria das normas para projeto de estruturas de concreto propõe a utilização do BRE, como uma simplificação da relação entre a tensão e a deformação do concreto, para o cálculo da ruptura das seções submetidas a flexo-compressão.

Neste trabalho foi adotado o BRE recomendado pelo COMMITTEE ACI 318 (1999), proposto inicialmente por Whitney em 1937, a partir de ensaios experimentais em concretos com resistências variando entre 10 e 40 MPa.

A norma americana foi utilizada nesta pesquisa, pois não há normalização nacional que preconize a utilização de estruturas mistas concreto-PRF. Além disso, muitos trabalhos lidos de autores estrangeiros citam, em sua maioria, a norma ACI 318. No entanto algumas considerações das normas brasileiras de concreto armado, de ações e segurança e de estruturas mistas aço-concreto foram incorporadas ao trabalho.

O bloco é definido por dois parâmetros,  $\alpha_1$  e  $\beta_1$ . O valor  $\alpha_1$  representa a relação entre a tensão no bloco retangular equivalente e a resistência à compressão do concreto,  $f'_c$ , na parábola normalizada; e  $\beta_1$  é a razão entre a altura do bloco e a altura da camada de concreto comprimido. A norma do COMMITTEE ACI 318 (1999) recomenda os seguintes valores para  $\alpha_1$  e  $\beta_1$ :  $\alpha_1=0,85$  e  $\beta_1 = 0,85 - 0,08 \frac{(f'_c - 30)}{10} \geq 0,65$ .



**FIGURA 7.4 – Resistência à flexão da seção transversal: (a) distribuição das deformações específicas; (b) distribuição simplificada das tensões; (c) distribuição exata das tensões.**

A deformação específica normal e a distribuição das tensões correspondentes a resistência à flexão da seção transversal estão mostradas na Figura 7.4. A altura da linha neutra,  $y_u$ , é estabelecida por meio do equilíbrio de forças, de acordo com a expressão (7.8):

$$y_u = \frac{(-2\alpha_1 f_c' \beta_1 h_c^2 l_p + E_{prf} t_w \epsilon_c'' d^2 + E_{prf} t_w \epsilon_c'' t_f^2 - 2E_{prf} t_w \epsilon_c'' d t_f + 2E_{prf} t_f b_f \epsilon_c'' d)}{(2\alpha_1 f_c' \beta_1 h_c l_p - 2E_{prf} t_w \epsilon_c'' t_f + 2E_{prf} t_w \epsilon_c'' d + 2E_{prf} t_f b_f \epsilon_c'')} \quad (7.8)$$

O equilíbrio dos momentos fornece o momento último na flexão da seção transversal, conforme mostra a Expressão (7.9):

$$M_u = 2\alpha_1 f_c' \beta_1 h_c l_p \left( d + h_c - \frac{\beta_1 h_c}{2} \right) + E_{prf} y_u^2 t_w \epsilon_c'' \frac{\left( \frac{d - y_u}{3} \right)}{h_c + y_u} - E_{prf} t_f^2 b_f \epsilon_c'' \frac{d - y_u}{h_c + y_u} - E_{prf} t_w \epsilon_c'' \frac{(d - y_u - t_f)^2 (d - y_u + 2t_f)}{h_c + y_u} \frac{1}{3} \quad (7.9)$$

Esta equação é válida desde que o material PRFV, localizado na face externa da mesa inferior não apresente ruptura, ou seja,  $\epsilon_{prf} < \epsilon_{prf}'$ , estabelecido conforme o critério da Expressão (7.10).

$$y_u > \frac{(d \epsilon_c'' - h_c \epsilon_{prf}')}{\epsilon_{prf}' + \epsilon_c''} \quad (7.10)$$

sendo:

$y_u$  → altura da linha neutra medida a partir da face superior da mesa do perfil;

$d$  → altura do perfil pultrudado;

$h_c$  → espessura da capa de concreto;

$b_f$  → largura da mesa do perfil;

$t_f$  → espessura da mesa do perfil;

$t_w$  → espessura da alma do perfil;

$E_{prf}$  → módulo de elasticidade do perfil de PRFV;

$l_p$  → largura da capa de concreto entre dois perfis adjacentes;

$\epsilon_{prf}$  → deformação específica no perfil de PRFV;

$\epsilon_{prf}'$  → deformação específica na ruptura do perfil de PRFV;

$\epsilon_c''$  → deformação específica na ruptura do concreto;

$f_c'$  → resistência característica do concreto.

O cálculo da altura da linha neutra e do momento resistente último da laje mista pode ser visualizado no Anexo F.

Além da resistência à flexão, deve-se verificar também, segundo DESKOVIC et al. (1995a), a possibilidade de ruptura de cisalhamento na alma do perfil. Assim, foi calculada a tensão na alma do perfil, bem como a tensão de cisalhamento na ligação mesa-alma, adotando-se como carga o valor encontrado na resistência à flexão. Os valores das tensões atuantes são encontrados no Anexo F.

Para estimar o carregamento máximo a ser aplicado na laje mista, durante a etapa de programação do ensaio, foram calculadas as cargas de ruptura considerando-se as seguintes hipóteses: (1) ruptura por compressão na mesa de concreto; (2) ruptura por cisalhamento na alma do perfil e, (3) ruptura por cisalhamento na interface concreto/PRFV.

Os cálculos destes valores encontram-se no Anexo F, sendo os resultados aqui apresentados:  $P_{ult.1}=179,07$  kN para a primeira hipótese, considerando o concreto com  $f_{ck}=30$  MPa;  $P_{ult.2}=98,04$  kN para a segunda hipótese, considerando a resistência ao cisalhamento do perfil de PRFV de 20,59 MPa (calculado no Anexo C);  $P_{ult.3}=141,34$  kN para a terceira hipótese, considerando a resistência de aderência do concreto/PRFV, de 2,64 MPa, obtido nos ensaios de aderência concreto/PRFV, para o concreto de  $f_{ck}=30$  MPa, com aplicação da resina Sikadur31.

Desta maneira, tomando-se o menor dos três valores calculados, pode-se estimar que a carga de ruptura na laje mista deve ser aproximadamente 100 kN.

## **7.5. Ensaio de Flexão a Quatro Pontos para Carregamento de Curta Duração**

### **7.5.1 Introdução**

As lajes mistas foram ensaiadas à flexão a quatro pontos no Laboratório de Experimentação em Estruturas (LEE) do Departamento de Engenharia Civil da UFSC.

O concreto utilizado em cada laje foi confeccionado com o concreto retirado de uma única betoneira, com a finalidade de reduzir as variáveis envolvidas na sua produção. Destes concretos foram retirados 06 corpos-de-prova cilíndricos de dimensões, 0,10x0,20 m, para a determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto em ensaio de compressão aos 28 dias.

Foram ensaiados à flexão a quatro pontos aos 28 dias de idade do concreto, um total de 3 lajes mistas, com carregamento monotônico e crescente até a ruptura da laje. Adotou-se uma taxa de carregamento de 10 kN/min., próximo ao valor adotado por KELLER e SCHOLLMAYER (2004) em ensaios de tabuleiros de PRFV, com taxa de carregamento de 7,5 kN/min.

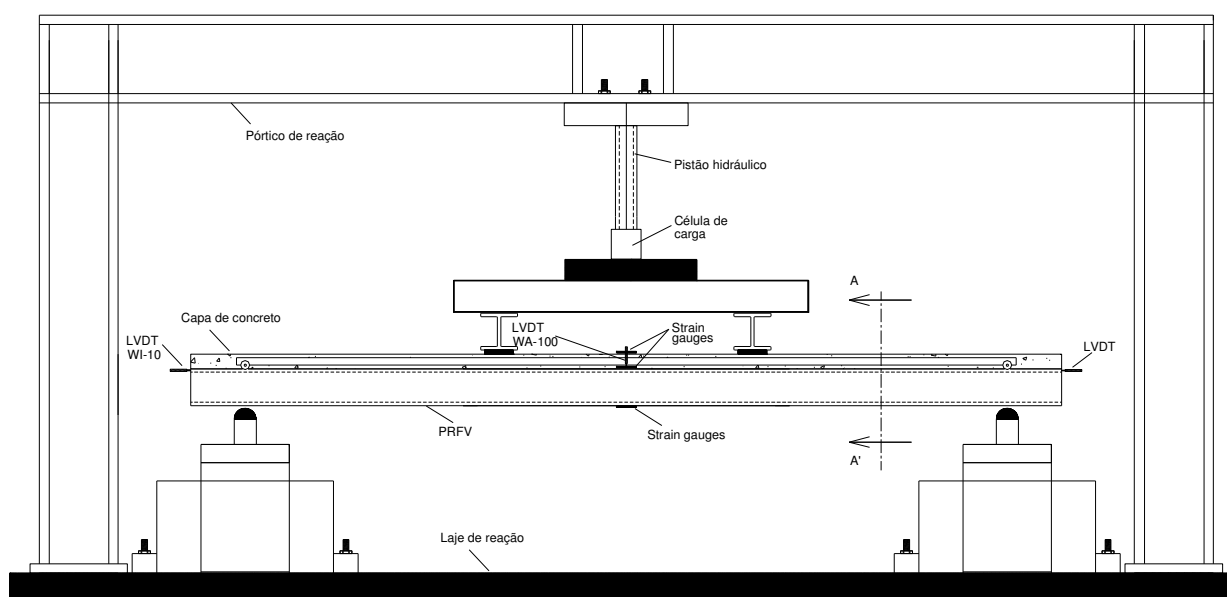
O aparato do ensaio impõe que o cutelo de aplicação de carga seja rotulado, reduzindo-se assim possíveis excentricidades no carregamento e possibilitando desta maneira a aplicação de um carregamento igualmente distribuído ao longo da largura da laje.

Para haver uma melhor acomodação dos dispositivos de ensaio, foi aplicado inicialmente um carregamento de 5 kN (5 % da carga estimada de ruptura), em seguida a laje foi descarregada para após ser aplicado o carregamento até a ruptura do conjunto.

Nos ensaios a carga foi aplicada por meio de um pistão hidráulico fixado a um pórtico metálico, apoiado na laje de reação do laboratório, Figura 7.5. A flecha no meio do vão foi medida por meio de dois Transdutores Lineares de Deslocamento (LVDT's), marca HBM WA-100, com campo de leitura de 100 mm, dispostos nas faces laterais da laje e apoiados em uma régua de alumínio, fixada na altura da linha neutra da laje sobre os apoios, ambos ligados a um microcomputador por meio de um sistema de aquisição de dados marca HBM/Spider (Software: Catman) com 16 canais.

Além destes foram colocados quatro LVDT's, marca HBM WI-10, com campo de leitura de 10 mm, dispostos nos extremos da laje, fixados na capa de concreto e apoiados nos perfis pultrudados, também ligados ao microcomputador pelo sistema de aquisição de dados, com o objetivo de medir os deslocamentos relativos entre a capa de concreto e os perfis de PRFV.

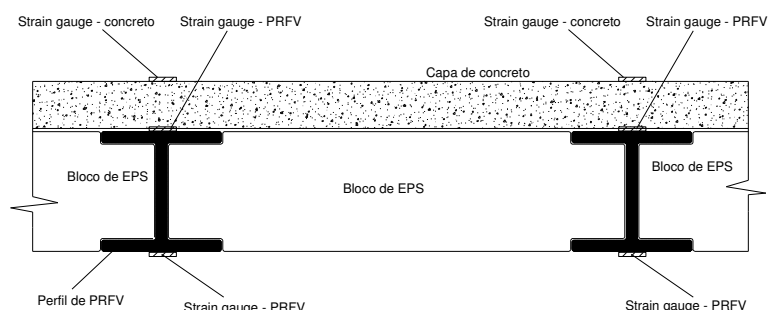
A carga foi lida por meio de uma célula de carga, marca *Kratos* de capacidade 200 kN, também ligada ao sistema de aquisição de dados. Antes do início do programa experimental, a célula de carga foi calibrada em uma prensa hidráulica marca *Mohr & Federhaff AG*, de capacidade 200 kN, na faixa de leitura de 40 kN com divisão de 0,1 kN. A equação obtida desta calibração foi utilizada no sistema de aquisição de dados para a transformação do sinal elétrico da célula de carga em leitura de carregamento.



**FIGURA 7.5 – Esquema para o ensaio de flexão das lajes mistas concreto/PRFV.**

Também foram medidas as deformações máximas de tração e compressão na região central do terço médio da laje. Estas deformações foram obtidas por meio da fixação de *strain gages* (extensômetros elétricos de resistência), dispostos simetricamente ao longo da seção transversal, no meio do vão da laje mista. Além destes foram instalados dois *strain gages* na interface concreto/PRF, colados na face externa da mesa superior de cada perfil.

Os extensômetros utilizados são do tipo folha com configuração unidirecional, marca KYOWA, sendo o modelo KFG-20-120-C1-11 para aplicação em concreto e KFRP-5-120-C1-9 para aplicação em materiais compostos em fibra de vidro. Os posicionamentos dos *strain gages* encontram-se apresentados na Figura 7.6.



**FIGURA 7.6 –Disposição dos *strain gages*, no centro do terço médio das lajes.**

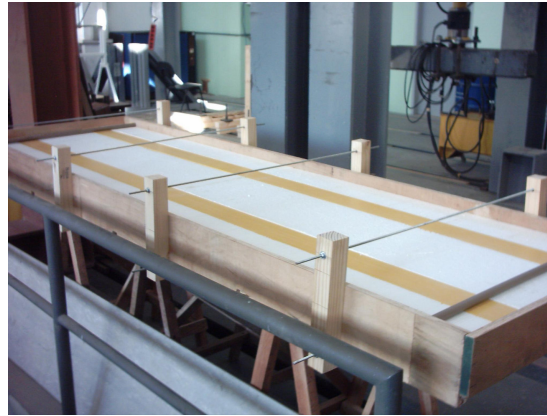
Os valores das cargas, deslocamentos e deformações específicas são medidos automaticamente pelo sistema de aquisição de dados, tomando-se para as análises posteriores a média dos valores dos deslocamentos nos LVDT's e deformações nos *strain gages*.

### 7.5.2. Procedimento Experimental

Neste item são apresentados os procedimentos realizados para a preparação da laje mista para o ensaio de flexão a quatro pontos.

A primeira etapa foi a montagem da laje mista com os blocos de EPS e os perfis pultrudados de PRFV. Após esta etapa foi realizada a preparação dos perfis pultrudados para a colagem dos *strain gages*, e para receber a interface com Sikadur 31. Desta maneira, lixou-se a face externa da mesa superior, com uma lixa nº 200, para melhor desempenho da ligação (aderência) com o produto de interface. Após o término do processo de lixação, os perfis e os blocos de EPS foram montados, formando-se a parte da laje que funciona como fôrma e armadura de tração, Figura 7.7.



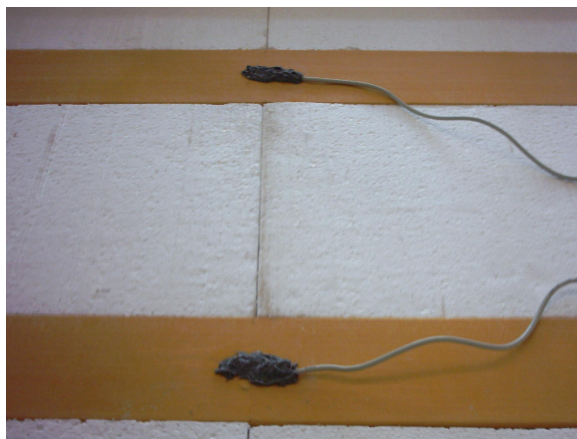


**FIGURA 7.7 – Preparação da laje mista para a concretagem.**

Os *strain gages* da interface concreto/PRFV foram colados no dia anterior à concretagem da laje. O procedimento de colagem seguiu os seguintes passos: primeiro a superfície do perfil foi lixada com uma lixa nº 200 e em seguida, para melhor nivelar a face do perfil pultrudado, foi utilizada uma lixa nº 400. Após esta etapa o perfil foi limpo com uma gaze embebida em álcool isopropílico, passando a gaze em apenas um sentido, de maneira que a sujeira retirada não retornasse ao local de colagem do extensômetro. Após foi passado um condicionador (composto a base de ácido fosfórico a 0,01N) para remover a possível presença de óxidos. Por fim, foi aplicado um neutralizador (a base de amoníaco a 0,01N) para retirar o ácido da superfície do perfil.

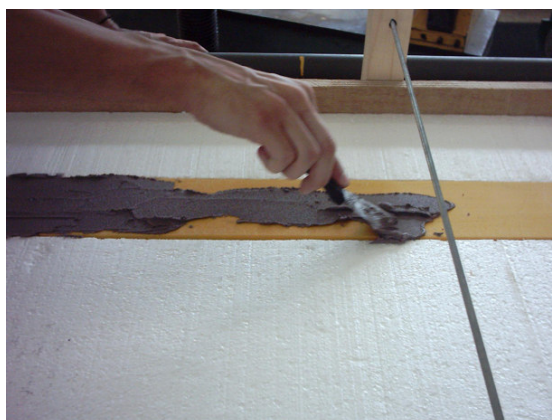
Na colagem dos extensômetros elétricos foi empregado um adesivo a base de cianoacrilato, sendo utilizada uma fita adesiva transparente para posicionar o *strain gage* no local desejado. Em seguida o adesivo foi aplicado sobre o extensômetro e a colagem foi efetuada. Estas etapas foram adotadas para a colagem dos *strain gages* no concreto e no PRFV.

No caso dos *strain gages* localizados na interface concreto/PRFV, foi realizado mais um procedimento onde, após o processo de colagem do extensômetro, um silicone de cura neutra, marca *Dow Corning 780*, foi aplicado sobre o *strain gage*, com o objetivo de protegê-lo contra a umidade e o impacto do concreto no momento da concretagem, como mostra a Figura 7.8.



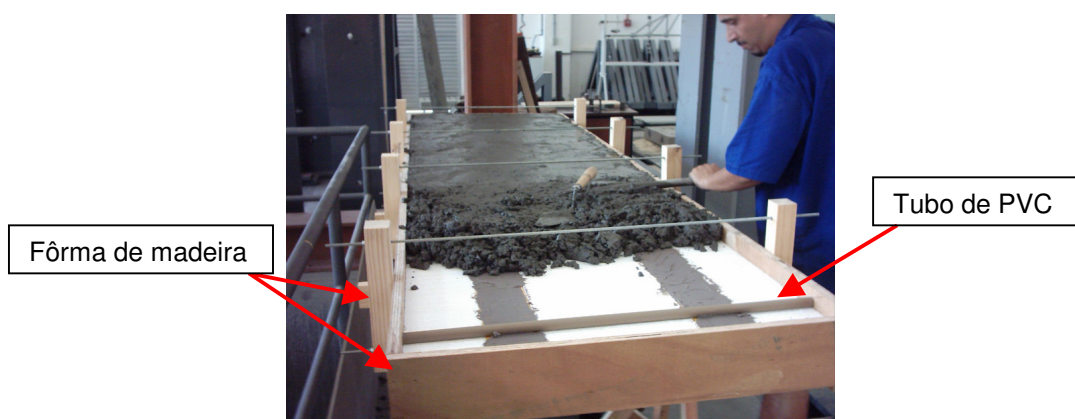
**FIGURA 7.8 – Strain gages da interface concreto/PRF, com a aplicação de silicone.**

A próxima etapa foi a preparação da resina Sikadur 31 para o tratamento da interface de aderência concreto/PRFV. O procedimento para a preparação e aplicação do produto seguiu as mesmas orientações apresentadas no Capítulo 7, para o ensaio de aderência. Na Figura 7.9, pode ser observado em detalhe a aplicação da resina na superfície do perfil.



**FIGURA 7.9 – Aplicação da resina Sikadur 31 sobre o perfil pultrudado.**

Enquanto a resina era aplicada sobre o perfil, dava-se início à produção do concreto no LEE. O concreto foi dosado para um  $f_{ck}=30$  MPa, com adição de fibras curtas de polipropileno. O estudo da dosagem do concreto foi descrito no Capítulo 5. Após a preparação do concreto, foi realizado o *slump test*; onde o valor do ensaio apresentou resultados dentro do ideal para a concretagem com vibrador de imersão, ou seja, próximo de 65 mm. Em seguida, o concreto foi colocado sobre os blocos de EPS e perfis de PRFV para a confecção da laje mista.



**FIGURA 7.10 – Concretagem da laje mista concreto/PRFV.**

A Figura 7.10 mostra a etapa de concretagem de uma das lajes mistas. Nesta figura pode-se observar que para se obter a altura desejada de 40 mm da capa de concreto, utilizou-se uma fôrma de madeira, disposta lateralmente em todo o perímetro da laje. Para a fixação da régua de alumínio (necessária para apoiar o LVDT), utilizou-se um tubo de PVC de 20 mm de diâmetro, disposto dentro do concreto, localizado nas linhas de apoio da laje. Após a cura do concreto, uma barra roscada de 12 mm de diâmetro foi colocada dentro deste tubo, para apoio da régua metálica. O adensamento do concreto foi realizado com o auxílio de um vibrador de imersão.

Ao final da concretagem, foi aplicada na superfície do concreto, com uma pá de pedreiro, uma fina camada de cimento com água para reduzir os vazios e as imperfeições deixadas no nivelamento do concreto, Figura 7.11. O objetivo desta etapa foi de tornar o concreto com uma superfície mais plana e lisa para a instalação dos *strain gages*.



**FIGURA 7.11 – Aplicação de uma camada de regularização de cimento e água na laje mista.**

Após o término da concretagem, as lajes foram cobertas com uma lona plástica preta, com o objetivo de contribuir para a cura do concreto.

Em cada uma das concretagens das lajes, foram confeccionados 6 (seis) corpos-de-prova cilíndricos, de seção 100x200 mm, para a realização dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Os ensaios foram realizados aos 28 dias, no Laboratório de Materiais de Construção Civil, do Curso de Engenharia Civil da UNESC. Nos ensaios foi utilizada uma prensa EMIC, modelo PC200-I, com capacidade de carga de 2000kN. Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 7.2.

**TABELA 7.2 – Valores médios obtidos dos ensaios de compressão nos corpos-de-prova de concreto.**

Propriedade Mecânica	Concreto das lajes mistas			Média
	Laje 01	Laje 02	Laje 03	
Resistência à compressão (MPa)	35,95	39,93	39,83	38,57
Módulo de Elasticidade (GPa)	38,85	43,62	43,56	42,01

As lajes ficaram dispostas no laboratório até os 27 dias de idade. Nesta data, estas foram colocadas na posição de ensaio, para a preparação do mesmo. Neste dia os *strain gages*, posicionados na face superior da capa do concreto e da face externa da mesa inferior dos perfis pultrudados, foram instalados seguindo-se os mesmos passos da instalação no perfil de PRFV, já citado. Além disso, foram colocados os LVDT's e o sistema de aquisição de dados foi ligado para a verificação do perfeito funcionamento do sistema. Conferidos todos os itens do monitoramento, o ensaio era liberado para a execução no dia seguinte, aos 28 dias de idade do concreto. A Figura 7.12 mostra a Laje Mista 01 preparada para o início do ensaio.



**FIGURA 7.12 – Laje mista preparada para o início do ensaio.**

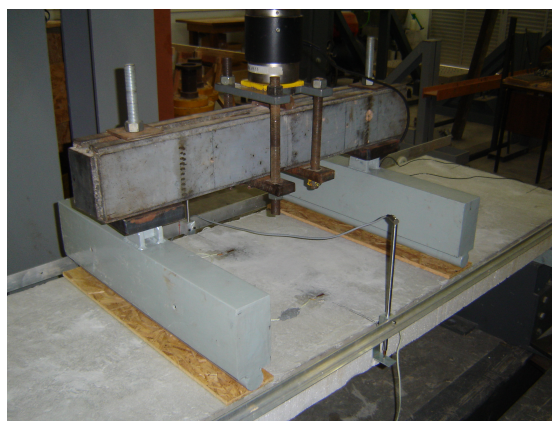
Antes do início do ensaio, foi aplicado um carregamento de 5 kN para garantir o perfeito acomodamento dos dispositivos do ensaio e em seguida foi retirada a carga para início do experimento. O carregamento foi aplicado com uma velocidade aproximada de 15 kN/min. A Figura 7.13 mostra o detalhe da fixação do LVDT modelo WI-10 para a medição do deslocamento relativo entre a capa de concreto e os perfis de PRFV. Nesta figura pode ser visto também a fixação da régua de alumínio na laje mista.





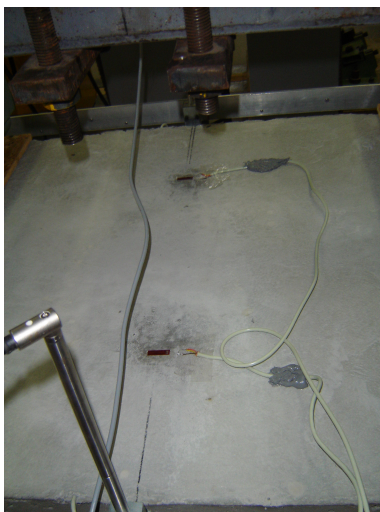
**FIGURA 7.13 – Detalhe da fixação do LVDT WI-10 para medição do deslocamento relativo concreto/PRFV e apoio da régua de alumínio.**

Para uma melhor distribuição do carregamento e para minimizar os efeitos das concentrações de tensões, foi colocada uma placa de OSB (*Oriented Strand Board*) na região dos cutelos de carregamento, bem como nos apoios. No meio da laje foi colocado um LVDT WA-100, apoiado em uma régua metálica, para medição do deslocamento máximo. A Figura 7.14 mostra as placas de OSB e o posicionamento dos medidores de deslocamento.



**FIGURA 7.14 – Detalhe das placas de OSB e fixação dos LVDT's WA-100.**

Os *strain gages* posicionados nas faces superiores e inferiores, nas regiões de máxima deformação de compressão e tração, respectivamente, das lajes mistas, foram posicionados antes do início da realização dos ensaios e ligados ao sistema de aquisição de dados. Na Figura 7.15 pode ser visto em detalhe os *strain gages* dispostos na face superior da laje, colado na capa de concreto.



**FIGURA 7.15 – Strain gages fixados na capa de concreto, na face superior da laje mista.**

Os dados de todos os sensores foram coletados num sistema de aquisição de dados, marca *HBM-Spider*, com 16 canais, ligado a um micro-computador, Figura 7.16. Após o término do ensaio, os dados das leituras eram salvos em um arquivo formato “excel”, para posterior análise dos resultados.



**FIGURA 7.16 – Sistema de aquisição de dados em funcionamento durante ensaio da laje mista.**

No próximo item são apresentados os resultados dos ensaios experimentais e das análises teóricas para a laje mista, submetida à ensaio de flexão a quatro pontos. Em seguida, a descrição do ensaio de fluência da laje mista também é apresentado.

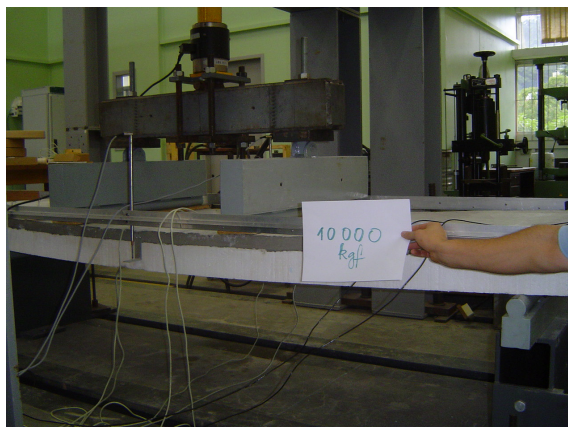
### **7.5.3. Resultados dos Ensaio Experimentais**

Neste item são mostrados separadamente os detalhes dos ensaios para as três lajes mistas, descrevendo-se os tipos de ruptura para cada uma. Os dados lidos nos ensaios foram analisados e diagramas carga x deslocamento foram traçados, para verificar o comportamento da laje mista à flexão. Diagramas carga x deformação específica também foram traçados com

os valores obtidos dos *strain gages*, localizados nas regiões de máxima tração e compressão, e na interface concreto/PRFV.

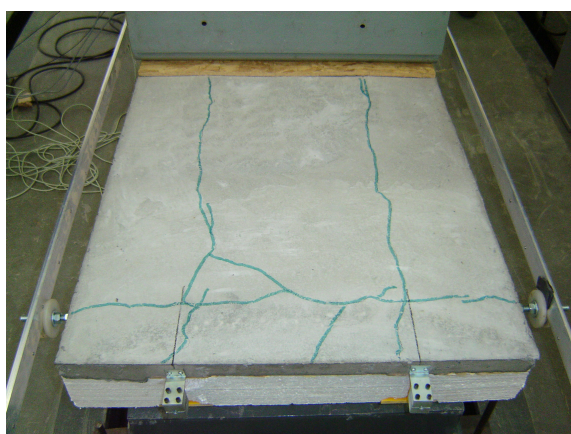
### i) Laje Mista 01

A Figura 7.17 mostra, em detalhe, a configuração deformada da Laje Mista 01, para o carregamento de 100 kN.

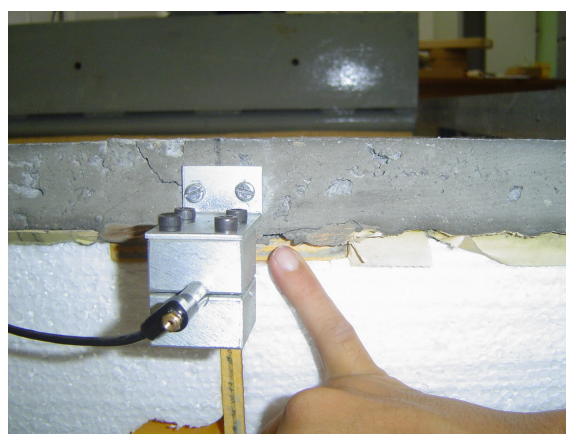


**FIGURA 7.17 – Ensaio da Laje Mista 01, com carregamento de 100kN.**

Nesta laje a ruptura ocorreu claramente pelo descolamento da capa de concreto do perfil pultrudado, devido às tensões de cisalhamento na interface que ultrapassaram a resistência de aderência na ligação concreto/PRFV. Esta ruptura pode ser vista na Figura 7.18, ao longo da superfície da capa de concreto e na extremidade da laje.



(a)

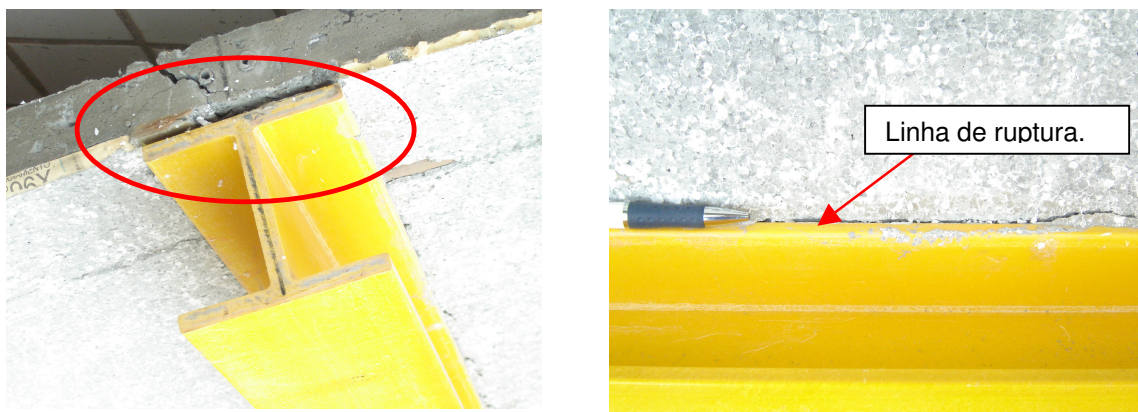


(b)

**FIGURA 7.18 – (a) Ruptura na capa de concreto sobre a projeção dos perfis; (b) Descolamento da interface concreto/PRFV.**

Após o término do ensaio a laje foi retirada do aparato de ensaio, onde foi “dissecada”, retirando-se os blocos de EPS, para uma melhor visão da ruptura da laje. A Figura 7.19 mostra a ruptura na seção transversal da laje e também ao longo do comprimento da mesma, com extensão do apoio até o cutelo de carregamento.

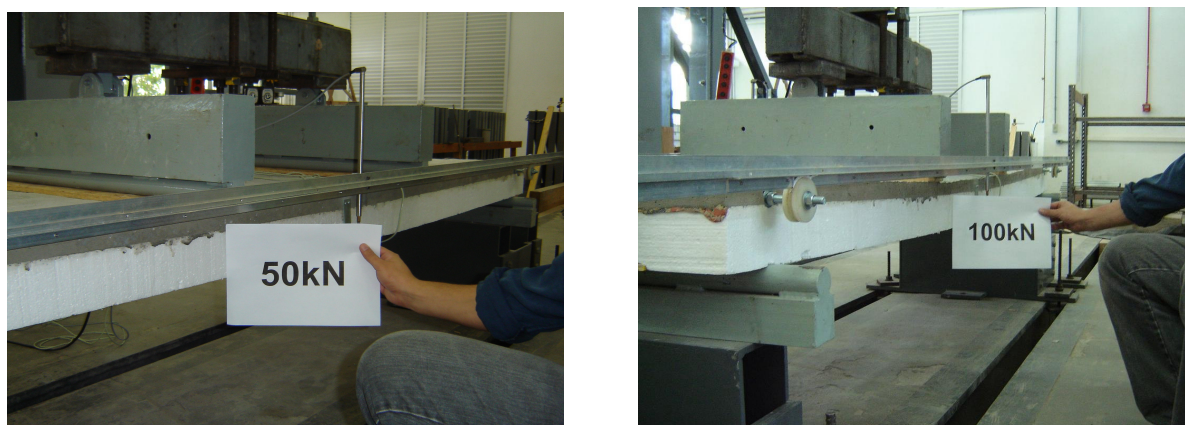




**FIGURA 7.19 – Ruptura da laje mista 01, na seção e na face inferior da capa de concreto, ao longo do comprimento da laje entre o apoio e o cutelo de carga.**

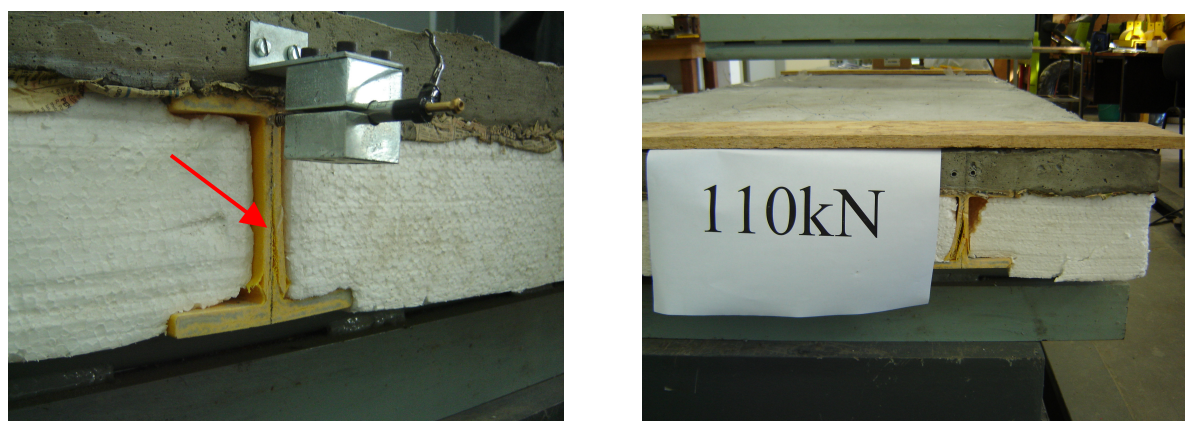
### **ii) Laje Mista 02**

A Figura 7.20 mostra, em detalhe, a configuração deformada da Laje Mista 02, para os carregamentos de 50 kN e 100 kN.



**FIGURA 7.20 – Ensaio da Laje Mista 02, com carregamentos de 50 kN e 100 kN.**

No ensaio da Laje Mista 02, a ruptura ocorreu em função das tensões de cisalhamento na alma do perfil ultrapassarem a resistência ao cisalhamento do material PRFV. Esta ruptura mostra-se ao longo da alma do perfil pultrudado, como pode ser vista na Figura 7.21.



**FIGURA 7.21 – Ruptura na alma dos perfis pultrudados na laje mista 02.**



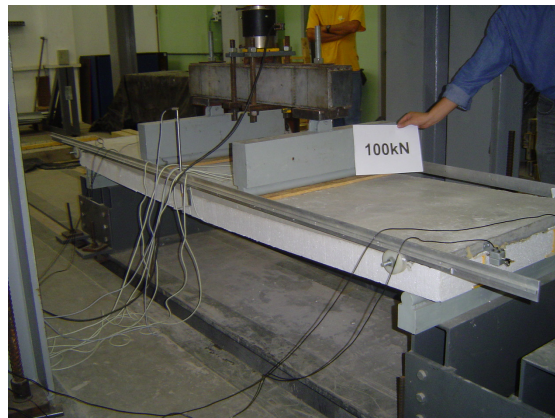
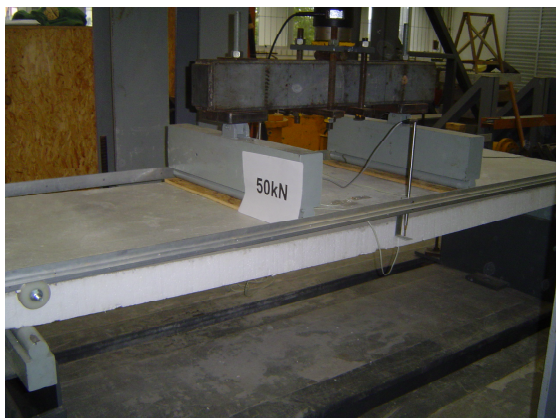
Após o término do ensaio a laje foi retirada do aparato de ensaio, onde foi “dissecada”, retirando-se os blocos de EPS, para uma melhor visão da ruptura da laje. A Figura 7.22 mostra a ruptura na alma do perfil de PRFV.



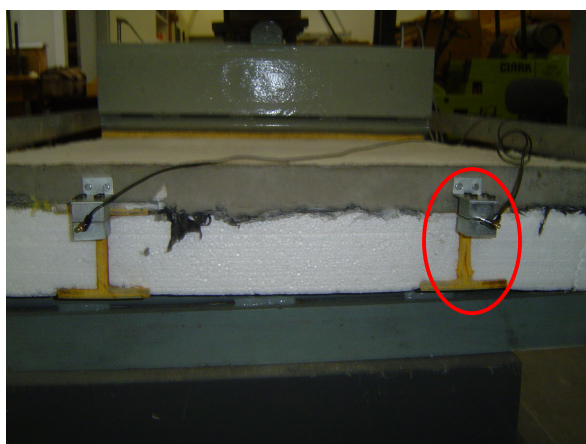
**FIGURA 7.22 – Ruptura na alma dos perfis pultrudados na laje mista 02.**

### **iii) Laje Mista 03**

A Figura 7.23 apresenta o layout do ensaio de flexão da Laje Mista 03, mostrando a deformação para os carregamentos de 50 kN e 100 kN.



**FIGURA 7.23 – Ensaio da Laje Mista 03, com carregamentos de 50 kN e 100 kN.**



**FIGURA 7.24 – Ruptura na alma de um dos perfis pultrudados na Laje Mista 03.**

Como pode ser visto na Figura 7.24, no ensaio da Laje Mista 03, a ruptura ocorreu de forma combinada, pois apenas um dos perfis rompeu na alma, formando-se uma fissura longitudinal no concreto sobre o perfil em apenas um lado. Na Figura 7.25(b) pode ser vista a fissura localizada sob o perfil (perfil localizado à direita na Figura 7.25(a)).

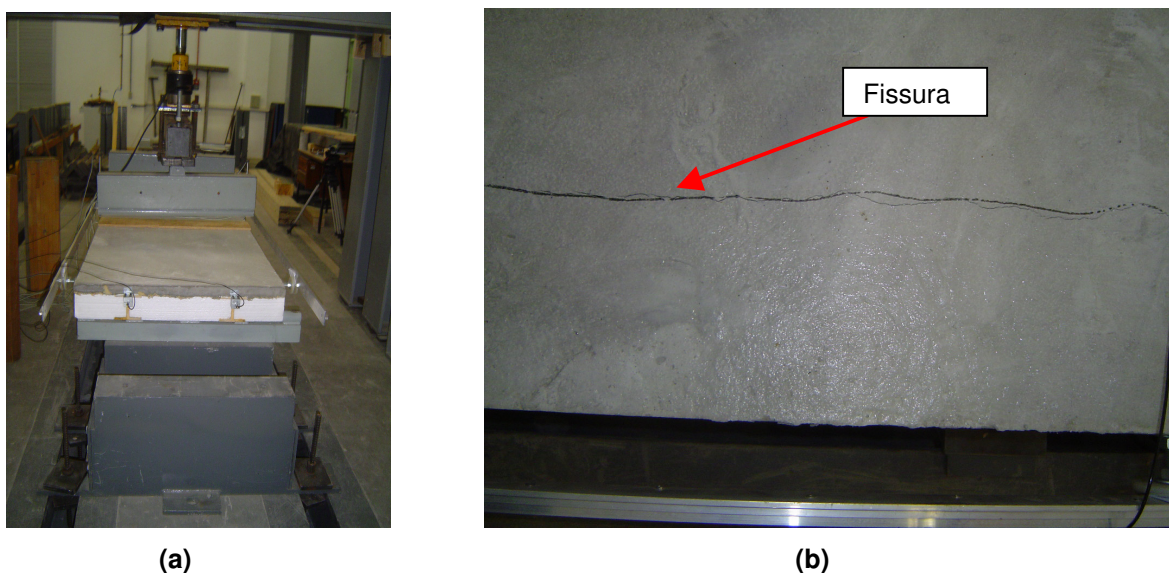


FIGURA 7.25 – (a) vista da laje no ensaio; (b) fissura formada sob um perfil de PRFV.

Com os valores obtidos dos pares carga x deslocamento, para cada uma das lajes mistas, foi traçado o diagrama da Figura 7.26. A figura mostra o comportamento carga x deslocamento no meio do vão para as três lajes mistas ensaiadas. Observa-se também que a carga correspondente à flecha de serviço, segundo o EUROCODE 4 (2001) e a NBR 8800 (2003), para deflexão de lajes em serviço igual a  $L/250$  do vão livre, é aproximadamente 3,7 vezes menor do que a carga correspondente a ruptura.

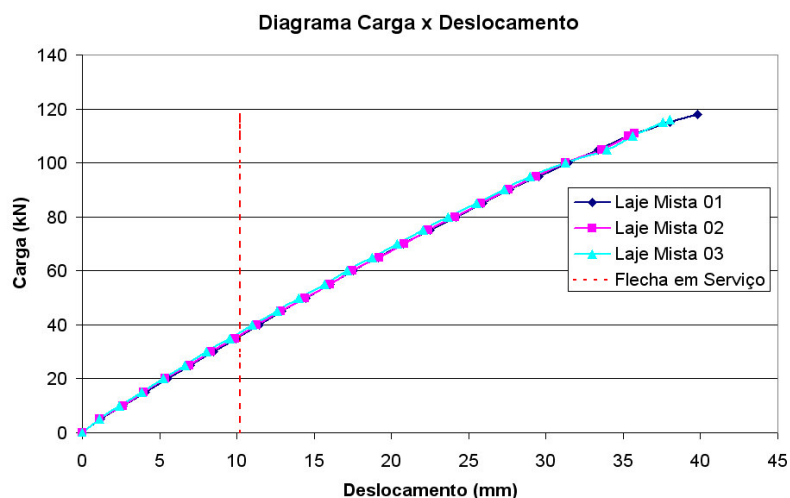
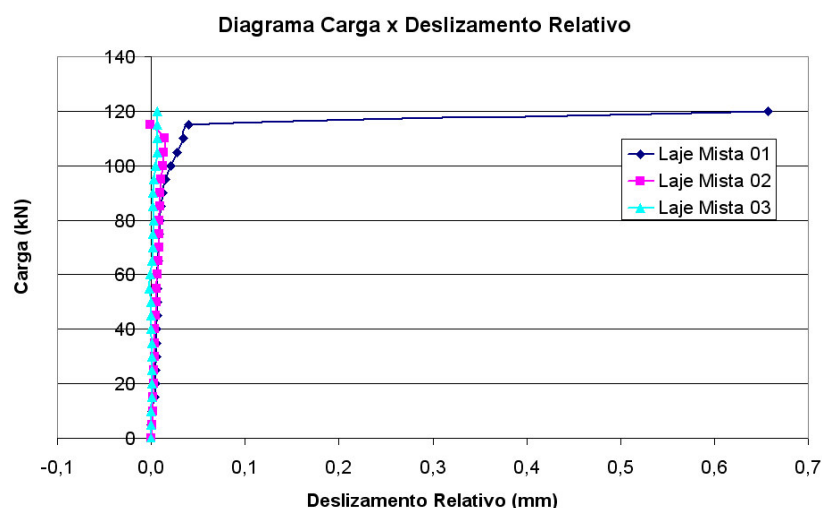


FIGURA 7.26 – Diagrama carga x deslocamento para as três lajes mistas (média dos valores obtidos nas leituras dos LVDT's).

A relação carga x deslizamento relativo na região dos apoios para as lajes mistas está apresentada na Figura 7.27. Pode ser observado inicialmente, para todas as lajes mistas, valores praticamente nulos de deslizamento relativo, indicando que há uma interação completa entre os dois elementos constituintes da laje mista concreto/PRFV, isto é, não houve ainda perda de aderência química/mecânica entre o concreto e o perfil pultrudado. Desta maneira ambos os materiais trabalham solidários na tarefa de resistir ao carregamento imposto à laje mista.

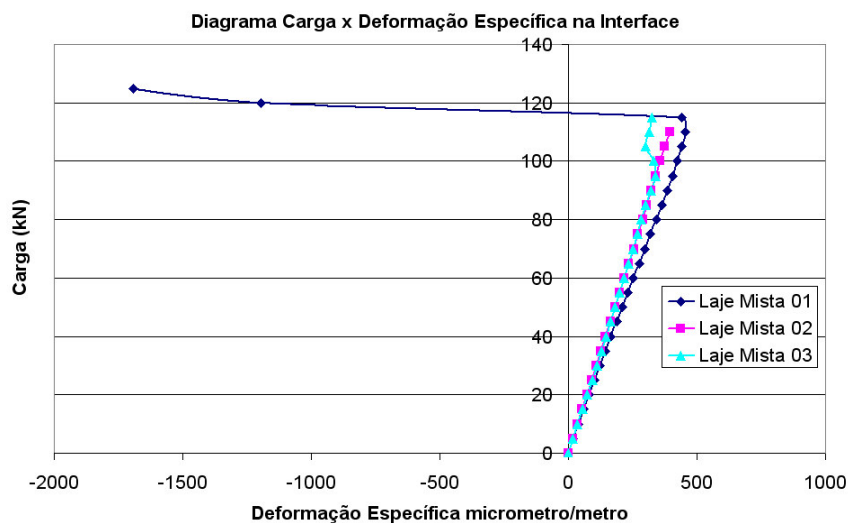
No caso da Laje Mista 01, com a fissuração da capa de concreto tem-se a interação parcial que ocorre devido ao rompimento da aderência química e à incapacidade da aderência mecânica proporcionada pela interface concreto-resina-perfil, uma vez acionada, em transmitir o cisalhamento total entre o perfil pultrudado e a capa de concreto, ocasionando desta maneira o deslizamento relativo entre os elementos.

Por outro lado, para as Lajes Mistas 02 e 03 praticamente não houve deslizamento, pois existe ainda a continuação da aderência mecânica entre o conjunto concreto-resina-perfil, ocorrendo sim a ruptura por cisalhamento do perfil de PRFV, antes do deslizamento da capa de concreto.



**FIGURA 7.27 – Diagrama carga x deslizamento relativo para as três lajes mistas.**

O comportamento carga x deformação específica na interface concreto/PRFV, no meio do vão para as lajes mistas é caracterizado na Figura 7.28.



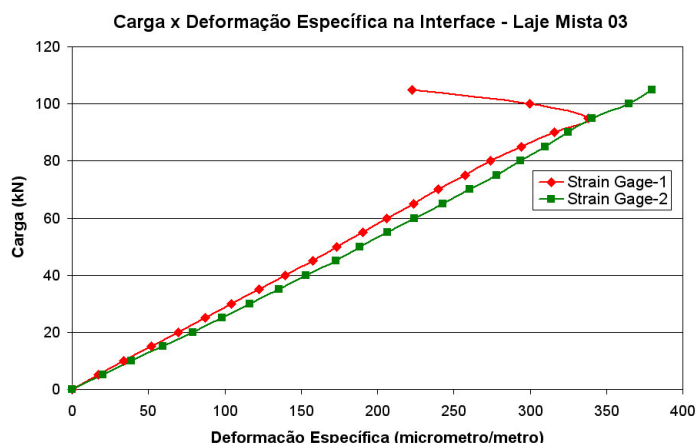
**FIGURA 7.28 – Diagrama carga x deformação específica na interface para as três lajes mistas.**

Na Laje Mista 01, o comportamento do diagrama é caracterizado pela inversão do valor da deformação, de tração para compressão, pois inicialmente no ensaio a região da interface encontrava-se abaixo da linha neutra (deformação positiva) indicando interação total entre os elementos constituintes da laje mista e a presença de uma única linha neutra na capa de concreto ligeiramente acima da região de interface. Com o processo de fissuração da laje e o consequente descolamento da capa de concreto dos perfis pultrudados ocorreu a inversão de tendência desta deformação, que passou de tração para compressão. Esta compressão na interface indica o surgimento de uma segunda linha neutra abaixo da região de interface, como consequência da perda de interação entre os perfis pultrudados e a capa de concreto.

Este colapso por cisalhamento longitudinal é caracterizado pela falha da ligação entre a resina *Sikadur 31* e o concreto, fazendo com que este na região de interface perca sua ação composta com o perfil de PRFV. Esta ruptura é indicada por um deslizamento horizontal relativo entre a capa de concreto e o perfil pultrudado.

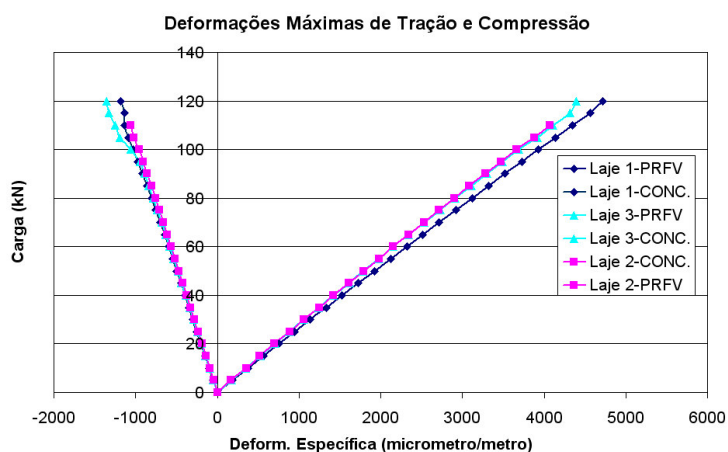
Na Laje Mista 02, por outro lado, este deslizamento não ocorreu e, na Laje Mista 03 ocorreu apenas parcialmente. A Figura 7.29 apresenta o diagrama carga x deformação específica da Laje Mista 03, na região da interface concreto/PRFV para os dois *strain gages*. Como pode ser visto, houve um deslizamento parcial em apenas um dos perfis (localizado sob o *strain gage* 1).





**FIGURA 7.29 – Diagrama carga x deformação específica na interface para a Laje Mista 03.**

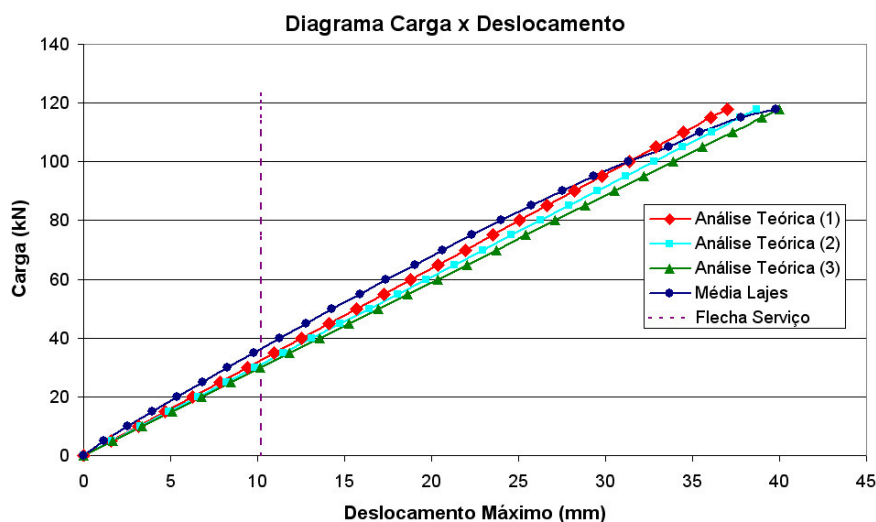
As máximas deformações específicas de tração e compressão foram medidas por meio de *strain gages*, dispostos nas faces superior (capa de concreto) e inferior (mesa do perfil), respectivamente das lajes mistas, Figura 7.30.



**FIGURA 7.30 – Diagrama carga x deformação específica máxima de tração e compressão para as três lajes mistas.**

Para uma comparação entre os resultados calculados pela Análise Teórica de Viga, com os valores obtidos nos ensaios experimentais foi traçado o diagrama da Figura 7.31. Nesta figura as curvas das diferentes análises teóricas referem-se às seguintes situações: (1) propriedades do perfil pultrudado de PRFV ( $E_{PRFV}$  e  $G_{PRFV}$ ) obtidas pela TCL e módulo de elasticidade do concreto ( $E_{cs}$ ) calculado pela NBR6118 (2003); (2) propriedades do PRFV medido experimentalmente pelo ensaio de flexão do perfil pultrudado e módulo de elasticidade do concreto calculado pela NBR6118 (2003); (3) propriedades do PRFV medido experimentalmente pelo ensaio de flexão do perfil pultrudado e módulo de elasticidade do concreto obtido pelo ensaio dos corpos-de-prova cilíndricos retirados durante a confecção do

concreto das lajes mistas, e ensaiados à compressão, NBR 8522 (1984), no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UNESC.



**FIGURA 7.31 – Diagrama carga x deslocamento para a análise teórica, com diferentes propriedades dos materiais constituintes.**

Como pode ser visto na figura, as retas calculadas com os valores das propriedades obtidas experimentalmente aproxima-se bastante dos valores medidos nos ensaios das lajes mistas (média das três lajes) e com a reta traçada com os valores das propriedades do perfil e do concreto obtidas teoricamente (Análise Teórica 1).

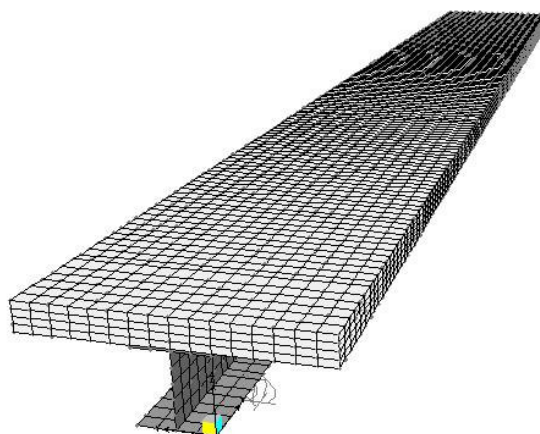
#### 7.5.4. Análise Comparativa Entre os Resultados Experimentais, Teóricos e Numéricos

Além do estudo experimental foi realizada nesta pesquisa uma análise numérica do ensaio da laje mista por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), com o objetivo de comparar os valores obtidos no ensaio experimental com os resultados numéricos. Estes valores também são comparados com os resultados analíticos obtido do método teórico, realizado pela Teoria de Viga de Timoshenko. Detalhes dos cálculos analíticos encontram-se apresentados no Anexo F.

O modelo numérico utilizado nas análises procura representar as reais condições do ensaio, tanto para as condições de contorno como de carregamento. Estas análises foram realizadas por meio do programa computacional SAP2000 PLUS (1998), utilizando-se elementos de casca de 4 nós para representar os perfis pultrudados e sólidos de 8 nós para representar a capa de concreto, desprezando-se a contribuição dos blocos de EPS e admitindo que os materiais têm comportamento elástico-linear. A interface concreto/PRFV foi modelada deixando-se uma distância de 2 mm entre os materiais para simular a resina de aderência. O comportamento na interface foi considerado tomando-se como perfeita a ligação

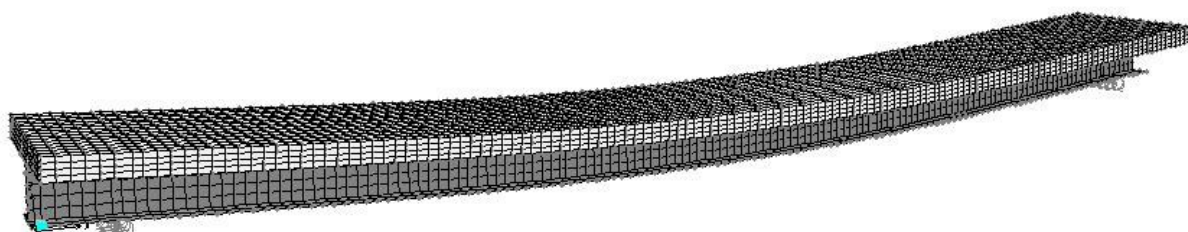
concreto/perfil, adotando o elemento *Constraint* com simulação de deslocamentos iguais nas direções x, y e z.

Aproveitou-se a simetria da laje mista, sendo modelada apenas a metade da laje no sentido longitudinal. O modelo numérico apresenta os elementos de casca com dimensões de 25 mm x 25 mm; os elementos sólidos foram modelados adotando-se uma dimensão de 25 mm x 25 mm no plano xy e 10 mm na direção z (vertical), totalizando 1820 elementos de casca e 8960 elementos sólidos. A Figura 7.32 mostra a malha de elementos utilizada nas análises.



**FIGURA 7.32 – Malha de elementos finitos, utilizada nas análises de flexão da laje mista.**

Os apoios foram considerados de maneira que restringisse apenas o deslocamento vertical, sendo restringido horizontalmente apenas o nó do centro do modelo; as cargas foram aplicadas na capa de concreto, ao longo da largura do modelo. Na Figura 7.33 é apresentada a configuração deformada para o modelo de elementos finitos.



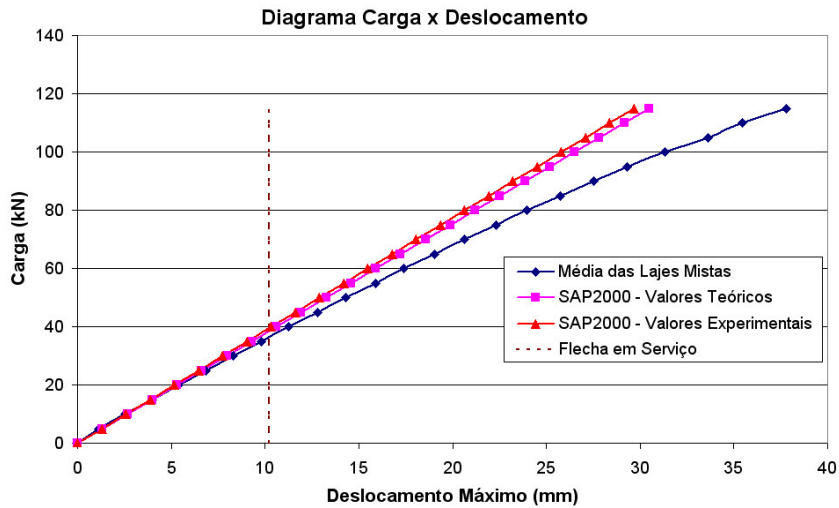
**FIGURA 7.33 – Configuração deformada do modelo numérico da laje mista.**

Para uma comparação entre os resultados fornecidos pelo modelo em elementos finitos, com os valores obtidos nos ensaios experimentais foi traçado o diagrama da Figura 7.34. Nesta figura as curvas das diferentes análises referem-se as seguintes situações:

- i) SAP2000 – Valores Teóricos: propriedades do perfil pultrudado ( $E_{1\_PRFV}$ ,  $G_{PRFV}$ ,  $\nu$ ,  $E_{2\_PRFV}$ ) obtidas pela TCL e módulo de elasticidade do concreto ( $E_{cs}$ ) calculado pela NBR6118 (2003);
- ii) SAP2000 – Valores Experimentais: propriedades do perfil pultrudado ( $E_{1\_PRFV}$  e  $G_{PRFV}$ ) medido experimentalmente pelo ensaio de flexão do perfil de PRFV e módulo

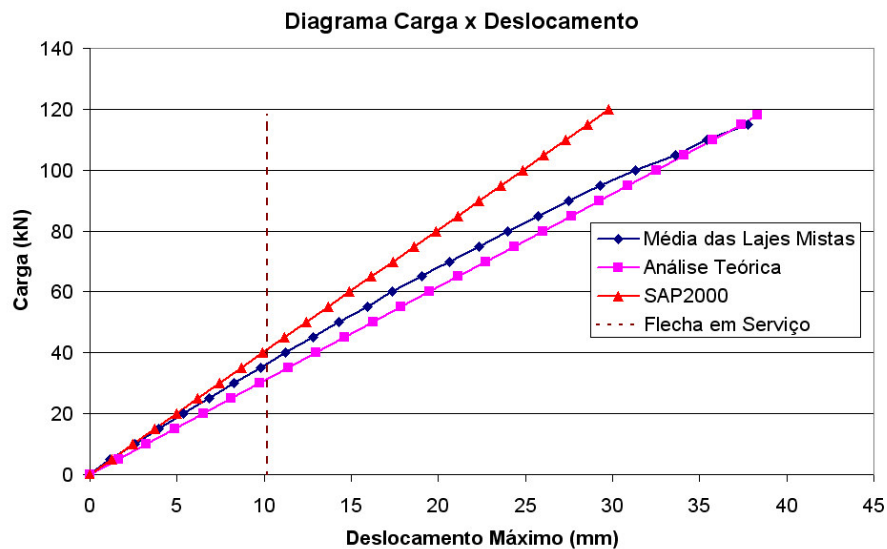
de elasticidade do concreto calculado em ensaio de compressão, NBR 8522 (1984), no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UNESC, apresentado na Tabela 7.2;

- iii) Média das Lajes Mistas: valores dos deslocamentos máximos (meio do vão) obtidos pela média dos deslocamentos das três lajes mistas ensaiadas.



**FIGURA 7.34 – Diagrama carga x deslocamento comparativo entre as análises em elementos finitos.**

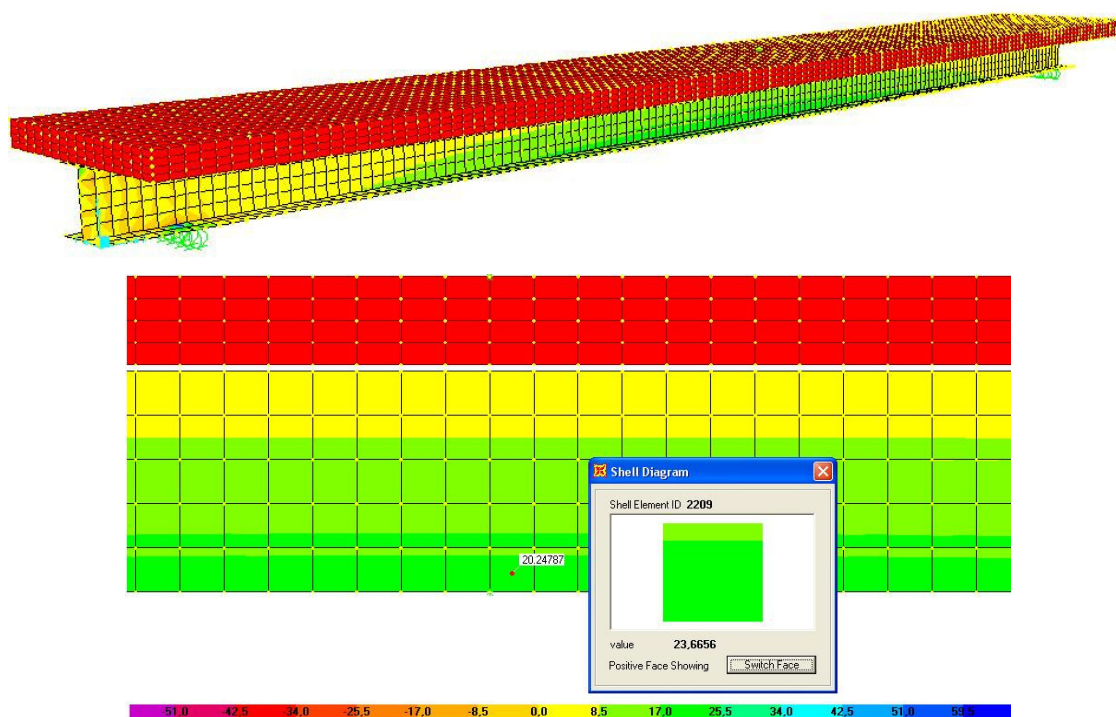
Resumindo, e utilizando os valores medidos experimentalmente para visualizar o comportamento carga x deslocamento máximo (no meio do vão) para os dois modelos de cálculo (teórico e numérico), em relação às médias dos deslocamentos encontradas nos ensaios para as três lajes mistas, obtém-se o diagrama da Figura 7.35.



**FIGURA 7.35 – Diagrama comparativo carga x deslocamento entre os valores obtidos experimentalmente, numericamente e teoricamente.**

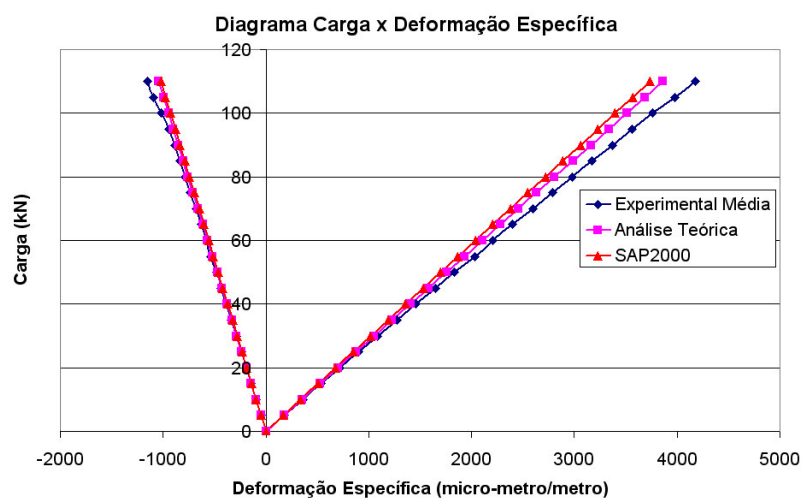


Na Figura 7.36 estão apresentados a distribuição das tensões normais no perfil de PRFV, na direção longitudinal, e o seu máximo valor no centro da laje mista.



**FIGURA 7.36 – Distribuição das tensões normais na direção longitudinal no perfil de PRFV, na laje mista, para um carregamento de 20kN.**

A Figura 7.37 mostra o comportamento das deformações específicas de tração e compressão no meio do vão da laje mista, utilizando-se a média dos valores encontrados nos ensaios dos três protótipos, os valores calculados teoricamente e os obtidos pelo programa SAP2000.



**FIGURA 7.37 – Diagrama carga x deformação específica para os máximos valores de deformação encontrados no ensaio experimental, na análise teórica e elementos finitos.**

### 7.5.5. Considerações Complementares

Observa-se da Figura 7.35, que como a carga correspondente ao limite de flecha em serviço é em torno de 32 kN e a carga média de ruptura encontra-se próxima a 120 kN, tem-se um coeficiente de majoração da carga de serviço em relação à carga última em torno de 3,7. Portanto o projeto da laje mista apresentado neste trabalho é governado pelo ELS. Ressalta-se que apesar das rupturas ocorridas nos três protótipos da laje terem sido do tipo frágil, um coeficiente de 3,7 em relação à ruptura seria suficiente para garantir uma segurança satisfatória.

As cargas de rupturas estimadas para o ensaio da laje mista, mostraram que os valores últimos para ruptura na alma do perfil pultrudado e na interface concreto/PRFV apresentam valores bastante próximos, principalmente quando se observa a Tabela 6.5 (Capítulo 6), que traz valores de resistência de aderência de 2,14 MPa (Concreto de 20 MPa) e 2,36 MPa (Concreto de 40 MPa), para a resina Sikadur 31. Estes valores, se adotados na estimativa do carregamento de ruptura, ao invés do valor médio de 2,64 MPa, reduziria a estimativa da carga de ruptura na aderência concreto/PRFV, para valores bastante próximos aos 98,04kN, para a estimativa de ruptura na alma do perfil pultrudado. Esta constatação nos mostra que estes dois tipos de ruptura na laje mista encontram-se próximos, o que mostrou os ensaios das lajes mistas com rupturas nas duas situações.

Além disso, se observada a Tabela 7.2 pode-se constatar que a resistência do concreto à compressão para a Laje Mista 01 apresentou um valor 11 % menor do que a resistência do concreto para as outras duas lajes. Embora nas análises do Capítulo 7 concluiu-se que, as resistências dos concretos estudados não interferiu na resistência de aderência. É importante ressaltar que a única laje que rompeu totalmente na ligação concreto/PRFV foi a Laje Mista 01, onde o concreto apresentou uma resistência menor em relação às outras lajes.

O diagrama carga x deslocamento obtido para os valores teóricos com as propriedades do perfil calculadas pela TCL, mostrou-se com um comportamento muito semelhante ao diagrama traçado com os resultados experimentais. Do mesmo modo os diagramas traçados com as propriedades do perfil de PRFV e do concreto, obtidas experimentalmente ficaram muito próximas do diagrama carga x deslocamento encontrado nos ensaios de flexão das lajes mistas.

O modelo numérico em elementos finitos forneceu resultados satisfatórios em relação ao comportamento à flexão da laje mista. Os deslocamentos obtidos aproximaram-se dos valores encontrados no ensaio das lajes mistas, principalmente na intensidade do carregamento para o Estado Limite de Serviço.

## 7.6. Ensaio de flexão com carregamento uniformemente distribuído de longa duração

### 7.6.1. Introdução

O comportamento para carregamento distribuído de longa duração foi estudado nesta etapa com a finalidade de analisar o efeito da deformação lenta ou fluência na laje mista concreto/PRFV.

A laje mista apresenta as mesmas dimensões dos protótipos já ensaiados neste capítulo para o estudo da flexão a quatro pontos. O ensaio de flexão será sob carregamento uniformemente distribuído, sendo ensaiado apenas um protótipo da laje mista. Este ficará carregado durante um período de 120 dias, no interior da edificação modelo, “Casa Stella”, construída pelo GIEM (Grupo Interdisciplinar de Estudos em Madeira) em um projeto de pesquisa em parceria com o FINEP e a empresa BATISTELLA. A edificação encontra-se localizada ao lado dos prédios da Eng. Civil da UFSC, Figura 7.38(a), e foi escolhida para a realização do ensaio em função de que a movimentação de pessoas é bastante restrita, sendo ideal para um ensaio que será monitorado por um período de quatro meses. Na Figura 7.38(b) tem-se uma vista interna da edificação, com o ensaio de fluência em andamento.



(a)



(b)

FIGURA 7.38 – (a) Vista externa e; (b) Vista interna da edificação “Casa Stella”.

### 7.6.2. Procedimento Experimental

A carga foi aplicada por meio de baldes (com capacidade de 62 litros), preenchidos com água, e apoiados diretamente sobre a laje de maneira a produzir um carregamento uniformemente distribuído de  $2,0 \text{ kN/m}^2$ , referente a 40 % do valor de sobrecarga de multidão para passarelas.

Com a finalidade de simular uma situação mais real de carregamento, a laje foi concretada sobre os apoios que serão utilizados posteriormente no ensaio. Assim, a laje pode sofrer uma deflexão inicial, em função do seu peso próprio, antes da atuação da sobrecarga.

A resistência do concreto utilizado na confecção desta laje seguiu o mesmo traço dos concretos empregados nas lajes anteriores, submetidas a ensaio de flexão a quatro pontos, ou seja,  $f_{ck}=30$  MPa.

Na concretagem da laje, foram confeccionados 6 (seis) corpos-de-prova cilíndricos, de seção 100x200 mm, para a realização dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Os ensaios foram realizados aos 28 dias, no Laboratório de Materiais de Construção Civil, do Curso de Engenharia Civil da UNESC. Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 7.3.

**TABELA 7.3 – Valores obtidos dos ensaios de compressão nos corpos-de-prova de concreto.**

Propriedade Mecânica	Concreto da laje mista de fluência			Média
	CP 01	CP 02	CP 03	
Resistência à compressão (MPa)	38,96	34,82	37,29	37,20
	CP 04	CP 05	CP 06	
Módulo de Elasticidade (GPa)	36,74	39,44	38,82	38,33

Aos 28 dias de idade do concreto o carregamento foi aplicado, enchendo-se os baldes com água até atingir o carregamento desejado, Figura 7.39.



**FIGURA 7.39 – Enchimento dos baldes com água para o carregamento de longa duração.**

A flecha no meio do vão foi medida por meio de dois relógios comparadores, marca *Mitutoyo*, com campo de leitura de 50 mm e precisão 0,01 mm, dispostos nas faces laterais da laje e apoiados em uma régua de alumínio, fixada na altura da linha neutra sobre os apoios, conforme mostra a Figura 7.40.

Também foram medidas as deformações máximas de tração e compressão na região central do terço médio da laje. Estas deformações foram obtidas por meio da fixação de *strain*

*gages* (extensômetros elétricos de resistência), dispostos simetricamente ao longo da seção transversal, no meio do vão da laje mista. Os extensômetros utilizados são do tipo folha com configuração unidirecional, marca KYOWA, sendo o modelo KFG-20-120-C1-11 para aplicação em concreto e KFRP-5-120-C1-9 para aplicação em materiais compostos em fibra de vidro.



**FIGURA 7.40 – Relógio comparador para medição da flecha no ensaio de fluência.**

Além disso, foram medidas a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar, de modo simultâneo e contínuo por meio de um módulo sensor de umidade e temperatura (Hygroclip), marca Swisserv, com faixa de leitura de umidade de 0 a 100 % e temperatura de  $-40$  a  $85^{\circ}\text{C}$ .

Os dados dos *strain gages* e do sensor de umidade/temperatura foram coletados num sistema de aquisição de dados, marca *HBM-Spider*, com 8 canais, ligado a um micro-computador.

Nas primeiras 72 horas de ensaio, as leituras foram salvas automaticamente pelo sistema de aquisição de dados, no intervalo de 10 minutos. As leituras dos relógios comparadores foram realizadas a cada 12 horas. Após estes 3 dias, alterou-se a configuração do sistemas de aquisição de dados para as leituras no intervalo de 2 horas. As leituras nos relógios comparadores também foram alteradas para um intervalo de 24 horas. Importante esclarecer que a flecha foi medida após o carregamento da laje, desprezando-se sua deformação, em função do peso próprio, durante os 28 dias de idade do concreto.

### **7.6.3. Resultado do Ensaio Experimental**

Com a média obtida dos valores medidos nos relógios comparadores foi traçado o diagrama da Figura 7.41. A figura mostra o comportamento carga x deslocamento no meio do vão para a laje mista, com ensaio monitorado no período de 19/10/05 à 21/02/06. Ainda pode

ser observado a carga correspondente à flecha de serviço, segundo o EUROCODE 4 (2001) e a NBR 8800 (2003), para deflexão de lajes, igual a  $L/250$  do vão livre.

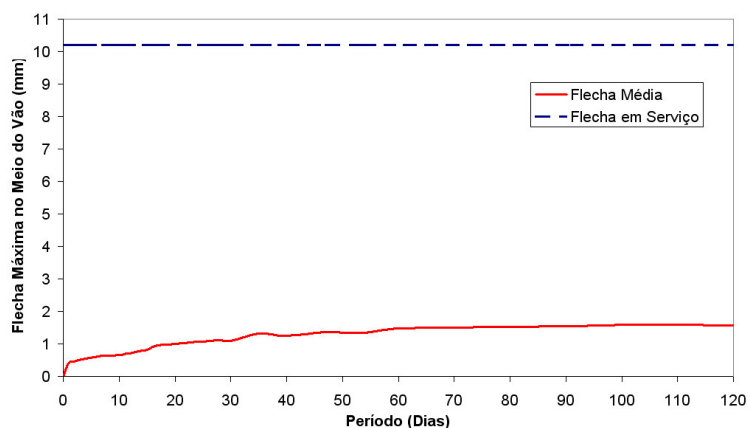


FIGURA 7.41 – Diagrama período x deslocamento para o ensaio de fluência.

As máximas deformações específicas de tração e compressão no ensaio de fluência foram medidas por meio de *strain gages*, dispostos nas faces superior (capa de concreto) e inferior (mesa do perfil), respectivamente da laje mista. A Figura 7.42 mostra os valores de deformação de tração no perfil de PRFV, medidos na face externa da mesa inferior. Também pode ser observada a deformação específica, que correspondente ao valor calculado para a flecha de serviço. As deformações específicas na capa de concreto apresentaram também um comportamento uniforme (na compressão) não sendo, portanto apresentadas no trabalho.

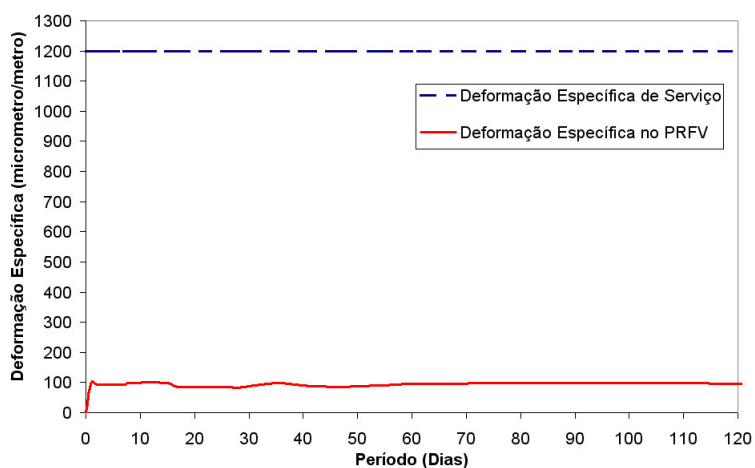


FIGURA 7.42 – Diagrama período x deformação específica (tração no perfil de PRFV) para o ensaio de fluência da laje mista.

A temperatura ambiente e a umidade relativa do ar média também foram medidas. Os valores representam a média no dia tomada com dois valores, uma medida no período da manhã e outra à tarde. Assim, encontraram-se os seguintes valores médios: 24,32°C e 69,34%, para a temperatura e umidade relativa do ar, respectivamente.

#### **7.6.4. Considerações Complementares**

Cabe aqui salientar que o ensaio ainda encontra-se em andamento dando-se, portanto continuidade ao experimento. Porém pode-se prever que a flecha deve se estabilizar, não sendo crítico o efeito da fluência para a laje em estudo. É importante lembrar que no caso desta laje mista, o perfil de PRFV encontra-se todo tracionado, situação onde o efeito da fluência no material composto é praticamente desprezível.

No próximo capítulo, são apresentadas as conclusões finais referentes ao estudo da laje mista, proposto nesta pesquisa. Também são citadas algumas sugestões para trabalhos futuros neste tema.

## **8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

### **8.1. Introdução**

O objetivo principal deste trabalho de doutoramento foi o estudo de um sistema de laje mista utilizando-se perfis pultrudados de PRFV, associados a uma capa de concreto. Para alcançar esta meta foi desenvolvido inicialmente um programa experimental dos componentes da laje mista, onde as principais conclusões deste programa experimental encontram-se descritas no item 8.2. Em seguida passa-se às conclusões do estudo da laje mista, sendo as conclusões apresentadas no item 8.3.

Por fim são feitas algumas considerações sobre a aplicação dos materiais compostos de PRF na Engenharia Civil e algumas recomendações para trabalhos futuros são listadas.

### **8.2. Conclusões Sobre os Estudos dos Componentes da Laje Mista**

Neste item encontram-se listadas as conclusões referentes ao estudo de flexão do perfil pultrudado e da aderência entre o concreto e o material composto. Também estão relacionadas as conclusões do estudo da adição de fibras de polipropileno na capa de concreto.

#### **8.2.1. Perfil Pultrudado de PRFV**

As principais conclusões relacionadas a este item podem ser assim listadas:

- No programa experimental realizaram-se inicialmente ensaios de flexão a três pontos em escala real em 2 perfis, aplicando-se uma metodologia que permitiu encontrar simultaneamente os módulos de elasticidade longitudinal de flexão e de cisalhamento da seção, variando-se o vão da viga. Observou-se nos ensaios um comportamento elástico-linear do material para cargas em serviço e também uma parcela significativa da deformação por cisalhamento nas deflexões.

- Para a análise da flexão dos perfis de PRFV pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) e Teoria de Viga de Timoshenko (TVT) utilizou-se a Teoria Clássica de Laminação (TCL), Regra das Misturas e equações de Halphin e Tsai para estimar as propriedades mecânicas do material do perfil. Para o módulo de elasticidade longitudinal e módulo de cisalhamento obteve-se valores próximos aos encontrados pelos ensaios experimentais de flexão dos perfis.



- A comparação entre as curvas carga-deslocamento dos ensaios de flexão dos perfis, para os quatro diferentes vãos, mostrou uma aproximação muito boa das retas obtidas pelo MEF e pela TVT, em relação às curvas obtidas experimentalmente. Conclui-se assim que, para o projeto de vigas com este perfil pultrudado de seção  $H$ , a TVT com propriedades estimadas pela TCL pode ser utilizada para avaliação da rigidez e verificação das flechas em serviço.

### **8.2.2. Aderência Concreto/PRFV**

As principais conclusões relacionadas a este item podem ser assim listadas:

- Com relação à resistência mecânica na aderência concreto/PRFV, a utilização da resina Sikadur 31 apresentou, nos corpos-de-prova ensaiados, um desempenho mais satisfatório em relação à resina Sikadur 32Gel.

- Nos ensaios de aderência, o resultado mostrou uma resistência média maior para o concreto de 40 MPa em relação ao concreto de 30MPa; bem como uma resistência média maior do concreto de 30 MPa em relação ao concreto de 20 MPa, nas interfaces com Sikadur 31 e Sikadur 32 Gel. Mesmo assim, as análises estatísticas mostraram nos corpos-de-prova ensaiados que a resistência do concreto não influenciou nos resultados de aderência entre o concreto e o PRF. Além disso, descartando nas análises os resultados da interface sem tratamento, foi constatado que não houve influência da resistência do concreto nos ensaios de aderência entre as resinas Sikadur 31 e Sikadur 32 Gel.

### **8.2.3. Adição de Fibras Curtas de Polipropileno no Concreto**

As principais conclusões relacionadas a este item podem ser assim listadas:

- A dosagem do concreto para a utilização na capa da laje de concreto foi desenvolvida adicionando-se fibras curtas de polipropileno, com objetivo de reduzir a fissuração por retração plástica do concreto. Como pôde ser visto nos resultados, a adição de fibras de polipropileno possibilitou reduzir consideravelmente a ocorrência destas fissuras nas misturas cimentícias. Constatou-se que para teores de fibra próximo a 0,10%, ocorreu melhora significativa no comportamento das placas de argamassa à fissuração por retração plástica.

## **8.3. Conclusões Sobre os Ensaios à Flexão da Laje Mista e Análise Numérica**

Neste item encontram-se listadas as conclusões referentes ao estudo da flexão da laje mista. São apresentadas as principais conclusões dos ensaios de flexão da laje a quatro pontos e o ensaio de fluência, com carregamento uniformemente distribuído. Também estão

relacionadas as conclusões referentes ao estudo da análise numérica por meio do Método dos Elementos Finitos, para a flexão da laje mista.

### 8.3.1. Flexão a quatro pontos

As principais conclusões relacionadas a este item podem ser assim listadas:

- Os resultados obtidos nos ensaios experimentais da laje mista mostraram a viabilidade técnica para a utilização deste tipo de sistema de laje.
- A comparação entre as curvas carga-deslocamento dos ensaios de flexão das lajes mistas mostrou uma aproximação muito boa das retas obtidas pelo MEF e pela Mecânica dos Materiais (método analítico) em relação às curvas obtidas experimentalmente.
- A carga de ruptura apresentada na flexão da laje mista (120 kN) apresentou um valor muito mais elevado do que a carga correspondente ao limite de flecha em serviço (32 kN). Pode-se, portanto calcular um coeficiente de majoração da carga de serviço em relação à carga última de 3,7. Assim permite-se concluir que o projeto da laje mista apresentado neste trabalho é governado pelo ELS.
- As rupturas nos protótipos das lajes mistas ocorreram de diferentes maneiras. Observou-se que a única laje que rompeu exclusivamente na interface concreto/PRFV foi o primeiro protótipo (Laje Mista 01), que apresentava uma resistência à compressão do concreto menor, em relação às outras duas lajes. A ruptura na Laje Mista 02 ocorreu na alma dos perfis de PRFV. Na Laje Mista 03, por outro lado, ocorreu uma ruptura combinada por cisalhamento na alma do perfil e ruptura por aderência na ligação concreto/PRFV. Esta combinação de rupturas nos ensaios das lajes mistas ensaiadas ocorreu possivelmente em virtude da proximidade nas resistências ao cisalhamento do perfil pultrudado e da ligação na interface entre os dois materiais. Pode-se notar que o valor utilizado nas análises para a média da resistência da ligação de 2,64 MPa impõe uma carga de ruptura de 140 kN. Porém, se utilizado o menor valor dado do ensaio de aderência, esta carga de ruptura se aproxima do valor 100 kN. Desta maneira, as estimativas de carga última na laje mista, se sobrepõem para a ruptura na alma do perfil e na interface da ligação concreto/PRFV.
- O modelo numérico em elementos finitos forneceu resultados satisfatórios em relação ao comportamento à flexão da laje mista. Os deslocamentos obtidos aproximaram-se dos valores encontrados no ensaio das lajes mistas, principalmente na intensidade do carregamento para o Estado Limite de Serviço.

### 8.3.2. Ensaio de Fluência

As principais conclusões relacionadas a este item podem ser assim listadas:

- Embora iniciais, os resultados do comportamento a flexão da laje mista para o ensaio de fluência permitem afirmar que a deflexão deve se estabilizar, não sendo crítico portanto o efeito da fluência para a laje em estudo.
- Ressalta-se que o ensaio ainda encontra-se em andamento. Na apresentação oral deste trabalho, serão inseridos nos resultados os dados referentes ao período de dezembro a fevereiro, totalizando até a defesa um período de três meses de ensaio.

#### **8.4. Considerações Sobre a Aplicação dos PRF na Engenharia Civil**

O crescente desenvolvimento das pesquisas e as aplicações em materiais compostos na engenharia civil em todo o mundo têm demonstrado tanto a necessidade para novos materiais de construção como as vantagens das fibras sintéticas associadas com sistemas de matrizes apropriadas, em conjunção com materiais de construção convencionais.

As vantagens demonstradas até o presente momento mostram claramente que os PRF apresentam um grande potencial para serem aplicados rotineiramente nos projetos futuros de engenharia civil. Todavia, a extensão destas aplicações dependerá de: (a) resolução de problemas fundamentais tais como reparabilidade, resistência ao fogo, durabilidade e questões ambientais; (b) extensão da automação nos processos de produção e conseqüente redução nos custos; (c) disponibilidade de normas técnicas, padrões e recomendações que possam ser utilizadas como referências de projeto e ferramentas de dimensionamento para os engenheiros civis; (d) grau de controle de qualidade e a qualidade de segurança que possam ser desenvolvidos e fornecidos durante a fase de fabricação ou instalação, empregando mão-de-obra de construção não especializada.

As pesquisas e os desenvolvimentos futuros devem demonstrar que estruturas ou componentes de PRF não causem riscos adicionais em incêndios; que os danos possam ser facilmente reparados; que uma maior durabilidade em relação aos materiais convencionais possa ser obtida em ambientes típicos de obras civis e que questões ambientais, na forma de emissões tóxicas durante a manufatura e cura, e o reaproveitamento de excessos de materiais durante a construção e da estrutura completa ao fim da vida útil, possa ser resolvida. Finalmente, a automação continuada do processo de fabricação e o desenvolvimento e uso de materiais e processos construtivos de custo adequados terão que reduzir o custo produto final para um patamar mais competitivo em relação aos custos dos materiais convencionais, sendo a comparação feita com base no custo inicial.

Somente se todos estes problemas acima forem adequadamente encaminhados, um novo material de construção para o século XXI estará realmente disponível para a comunidade de

engenheiros civis, o que, em termos de volume de aplicação é limitado apenas pela engenhosidade do projetista. Além disso, projetar com esses novos materiais terá um novo significado, uma vez que a concepção do projeto deve considerar a arquitetura dos materiais e a fase criativa do projeto, começando pelas fibras, sua orientação e a sequência de camadas, a matriz polimérica e o processo construtivo, que irão fornecer um grau de controle ainda maior sobre o comportamento final que pode ser alcançado no processo de projeto com os materiais convencionais disponíveis atualmente.

### **8.5. Recomendações para Trabalhos Futuros**

A viabilidade da utilização dos materiais compostos na engenharia civil foi demonstrada neste trabalho e outros apresentados. Os ensaios de flexão da laje mista mostraram a possibilidade do emprego dos perfis pultrudados associados com o EPS e o concreto. Os estudos devem, entretanto caminhar de maneira que se estabeleça um equilíbrio entre a viabilidade técnica e a econômica.

A seguir, são listadas algumas recomendações para próximos trabalhos nesta linha de pesquisa:

- Uso de perfis estruturais fabricados com resinas termoplásticas, pois esta resina possui a grande vantagem da reciclabilidade;
- Estudo de novos conectores de cisalhamento para prover a aderência concreto/PRF nas estruturas mistas em materiais compostos;
- Estudo de seções transversais mais eficientes para o perfil pultrudado, menos suscetíveis às instabilidades locais e laterais;
- Fabricação de perfis também pelo processo de injeção, de modo a obter-se uma orientação das lâminas que melhore a resistência ao cisalhamento na alma do perfil. Além disso, melhore o desempenho à rigidez longitudinal do elemento estrutural.
- Emprego de estruturas híbridas, com fibras de carbono associadas com fibras de vidro;
- Estudos de degradação UV no material PRF;
- Estudos de vibração e punção em lajes mistas concreto/PRFV.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELRAHMAN, A.; RIZKALLA, S. – **Deflection Control of Concrete Beams Pretensioned by CFRP Reinforcements**. Journal of Composites for Construction. vol. 3. No. 2. 1999, p. 55-62. ASCE.

AIELLO, M., A.; PECCE, M. – **Experimental Bond Behavior Between FRP Sheets and Concrete**. Proceedings of Structural Faults and Repair. London, UK, July 4-6, 2001.

ALAMPALLI, C.; O'CONNOR, J.; YANNOTTI, A., P.; LUU, K., T. – **Fiber-reinforced plastics for bridge construction and rehabilitation in New York**. Materials and Construction: Exploring the connection. Proc. 5<sup>th</sup> Materials Engineering Congress, L. C. Bank, ed., ASCE, Reston, Va, 344-350, 1999.

ALSAYED, S., H. – **Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars**. Cement and Concrete Composites. Vol. 20, p. 1-11, 1998.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – **Building Code Requirements for Structural Concrete**. (ACI 318-99), ACI Committee 318, Detroit, USA, 1999.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – **Hot Weather Concreting**. (ACI 305.R-91), ACI Committee 305, Detroit, USA, 1991.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – **State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) – Reinforcement for Concrete Structures**. (ACI 440.R-96), ACI Committee 440, Detroit, USA, 1996, 65p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. ASTM D 3039. Philadelphia, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. ASTM D 790. Philadelphia, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading**. ASTM D 3410. Philadelphia, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending**. ASTM D 6272. Philadelphia, 1998.

AGARWAL, B., D.; BROUTMAN, L., J. – **Analysis and Performance of Fiber Composites**. 2<sup>a</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1990.

AREF, A., J.; KITANE, Y.; LEE, G., C. – **Analysis of hybrid FRP-concrete multi-cell bridge superstructure**. Composite Structures, v. 69, p. 346-359, 2005.

ASHBEE, K. – **Fundamental Principles of Fiber Reinforced Composites**. 2<sup>a</sup> ed. Ed. Technomic Publishing Company, Inc. Lancaster, Pennsylvania, 1993.

ASHBY, M., F. – **Technology of the 1900s: Advanced Materials and Predictive Design**. Phil. Trans. Of the Royal Soc. of London. A322, p. 393-407, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO POLIESTIRENO EXPANDIDO – ABRAPEX. **As Lajes Nervuradas na Moderna Construção de Edifícios**. São Paulo, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, NBR 7217, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre**. Rio de Janeiro, NBR 7188, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, NBR 7215, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, NBR NM 67, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama – tensão-deformação**. Rio de Janeiro, NBR 8522, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, NBR 5739, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Laje pré-fabricada – Requisitos. Parte 1: Lajes unidirecionais**. Rio de Janeiro, NBR 14859-1, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**. Rio de Janeiro, NBR 5738, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Preparação de concreto em laboratório**. Rio de Janeiro, NBR 12821, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, NBR 6118, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Projeto e execução de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, NBR 8800. Projeto de Revisão da NBR 8800, Versão Ago. 2003.

BAKIS, C., E.; BANK, L., C.; BROWN, V., L.; COSENZA, E.; DAVALOS, J., F.; LESKO, J., J.; MACHIDA, A.; RIZKALLA, S., H.; TRIANTAFILLOU, T., C. – **Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction – State-of-the-Art Review**. Journal of Composites for Construction. Vol. 6. No. 2. 2002, p. 73-87. ASCE.

BAKIS, C., E.; UPPULURI, V., S.; NANNI, A.; BOOTHBY, T., E. – **Analysis of Bonding Mechanisms of Smooth and Lugged FRP Rods Embedded in Concrete**. Composites Science and Technology. Vol. 58. 1998, p. 1307-1319.

BALAGURU, P. – **Contribution of Fibers to Crack Redution of Cement Composites During the Initial and Final Setting Period**. ACI Materials Journal, v. 91, n. 3. p. 280-288. 1994.

BANK, L., C. – **Flexural and Shear Moduli of Full-Section Fiber Reinforced Plastic (FRP) Pultruded Beams**. Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, vol. 17, n. 1, p. 40-45, 1989.

BANK, L., C.; GENTRY, T., R.; NUSS, K., H.; HURD, S., H.; LAMANNA, A., J.; DUICH, S., J.; OH, B. – **Construction of a Pultruded Composite Structure: Case Study**. Journal of Composites for Construction, August, p. 112-119, 2000.

BANK, L., C.; YIN, J.; NADIPELLI, M. – **Local buckling of pultruded beams – nonlinearity, anisotropy and inhomogeneity**. Construction and Building Materials, vol. 9, n. 6, p. 325-331, 1995.

BANTHIA, N.; TROTTIER, J. F.; WOOD, D.; BEAUPRE, D. – **Steel Fiber Reinforced Dry-mix Shotcrete: Effect of Fibre Geometry on Fibre Rebound and Mechanical Properties**. Fibre Reinforced Cement & Concrete Composites. Ed. R. N. Swamy. E. & F. N. Spon, London 1992, pp. 277-295.

BANTHIA, N.; TROTTIER, J. F. – **Concrete reinforced with deformed steels fibers part ii: toughness characterization**. ACI Materials Journal, vol. 92, nº 2, 1995, pp. 146-154.

BARR, B.; GETTU, R.; AL-ORAIMI, S., K., A.; BRYARS, L., S. – **Toughness Measurement – the Need to Think Again**. Cement & Concrete Composites, vol. 18, 1996, pp. 281-297.

BASTOS, P. - **Retração e Desenvolvimento de Propriedades Mecânicas de Argamassas Mistas de Revestimento**. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo. 172p, 2001.

BENTUR, A.; MINDESS, S. – **Fibre Reinforced Cimentitious Composites**. United Kingdom Barking, Ed. Elsevier, 1990.

BIZINDAVYI, L.; NEALE, K., W. – **Transfer Lengths and Bond Strengths for Composites Bonded to Concrete**. Journal of Composites for Construction. Vol. 3. Nº. 4. 1999, p. 153-160. ASCE.

BLASS, A. – **Processamento de Polímeros**. 2ª ed. Ed. da UFSC, Florianópolis , 1988.

BRUCE, R., N. - **Fiber Reinforced Plastic Bridges in Chongqing 1983-1988**. 68th Annual Meeting Transportation Research Board, Jan. 22-26, 1989, Washington D.C., Paper No. 880058.

BURGUEÑO, R.; COBO DEL ARCO, D.; LA ROVERE, H., L.; ZHAO, L.; SEIBLE, F.; KARBHARI, V. – **Design and Analysis of the I-5/Gilman Advanced Technology Bridge**. Structural System Research Project, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, February 2000.

BURGUEÑO, R.; SEIBLE, F.; HEGEMIER, G. – **Concrete Filled Carbon Shell Bridge Piers under Simulated Seismic Loads – Experimental Studies**. Advanced Composites Technology Transfer Consortium Report Nº ACTT-95/12, University of California, San Diego (UCSD), 1995.

BURGUEÑO, R.; ZHAO, L.; LA ROVERE, H., L.; SEIBLE, F.; KARBHARI, V. – **Characterization of Hybrid FRP Beam-Slab Bridge Systems**. Proceedings 3<sup>rd</sup> International

Conference Advanced Composite Materials in Bridges and Structures. Edited by J. L. Humar and A. G. Razaqpur. Ontario, Canada, 15-17 Aug., 2000.

BUYUKOZTURK, O.; GUNES, O.; KARACA, E. – **Progress on Understanding Debonding Problems in Reinforced Concrete and Steel Members Strengthened FRP Composites.** Construction and Building Materials, 18, 2004, 9-19.

CANNING, L.; HOLLAWAY, L.; THORNE, A., M. – **An investigation of the composite action of an FRP/concrete prismatic beam.** Construction and Building Materials, 13, 1999, 417-426.

CARVALHO, R., C.; FIGUEIREDO FILHO, J., R. – **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado: Segundo a NBR 6118: 2003.** 2ª ed. Ed. EdUFSCar. São Carlos, 2004.

CARVALHO, P., R. M.; GRIGOLETTI, G.; TAMAGNA, A.; ITURRIOZ, I. – **Curso básico de perfis formados a frio.** 330p.; 23cm. Porto Alegre, 2004.

CASTIGLIONI, C.; IMBIMBO, M. - **Experimental Results on Centrifugated GFRP Poles for Electric Lifelines.** Journal of Composites for Construction, ASCE, v. 3. n. 3, p. 125-133, 1999.

CASTRO, P., F.; CURCIO, D. – **Proposta de Normalização para Barras de Plástico Reforçado com Fibras de Vidro (PRFV).** Niterói, RJ. 12p. In: SEMENGE 99, Niterói, 1999.

CEB-FIP – **Composite floor structure. Guide to good practice.** Committee Europeu du Béton. Fédération Internationale de la Précontrainte. 58 p. 1998.

CHEN, J., F.; TENG, J., G. – **Shear Capacity of FRP-strengthened RC Beams: FRP Debonding.** Construction and Building Materials, 17, p. 27-41, 2003.

CREATIVE PULTRUSIONS – Composites. Disponível em: <<http://www.creativepultrusions.com>>. Acesso em: 14 jul. 2003a.

CREATIVE PULTRUSIONS – Composites. Disponível em: <<http://www.creativepultrusions.com>>. Acesso em: 18 dez. 2003b.

DAVALOS, J., F.; SALIM, H., A.; QIAO, P.; LOPEZ-ANIDO, R.; BARBERO, E., J. – **Analysis and design of pultruded FRP shapes under bending.** Composites: Part B. v. 27B, p.295-305, 1996.

DAVALOS, J., F.; QIAO, P. – **Analytical and experimental study of lateral and distortional buckling of FRP wide-flange beams.** Journal of Composites for Construction, ASCE, v. 1. n. 4, p. 150-159. 1997.

DE ROOVER, C.; VANTOMME, J.; WASTIELS, J.; CROES, K.; TAERWE, L.; BLONTROCK, H. – **Modular pedestrian bridge with concrete deck and IPC truss girder.** Engineering Structures, v. 25, p. 449-459, 2003.

DESKOVIC, N.; TRIANTAFILLOU, T., C.; MEIER, U. – **Innovative Design of FRP Combined with Concrete: Short-Term Behavior.** Journal of Structural Engineering. Vol. 121. No. 7. 1995a. p. 1069-1078.

DESKOVIC, N.; TRIANTAFILLOU, T., C.; MEIER, U. – **Innovative Design of FRP Combined with Concrete: Long-Term Behavior.** Journal of Structural Engineering. Vol. 121. No. 7. 1995b. p. 1079-1088.



ENMAC – Materiais Compostos Importação, Exportação Ltda. Disponível em: <<http://www.enmac.com.br>>. Acesso em: 12 abr. 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - **Design of composite steel and concrete structures. Part 1.1. General rules and rules for buildings.** EUROCODE 4 - EN 1994-1-1, 2001.

EUZÉBIO, A. – Fotos [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por [almir@unesc.rct-sc.br](mailto:almir@unesc.rct-sc.br) em 06 de janeiro 2004.

FERNANDES, R., P.; CASTRO, P. F. - **Laje em FRP combinado com concreto.** Niterói, RJ. 1999. 6p. In: SEMENGE 99, 1999.

FIBERLINE – Composites. Disponível em: <<http://www.fiberline.com>>. Acesso em: 11 jun. 2003.

FIORELLI, J.; DIAS, A., A. – **Avaliação do Desempenho Estrutural de Vigas de Madeira Reforçadas com Fibras de Carbono e com Fibras de Vidro.** In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, VIII, 2002, Uberlândia. Anais... Uberlândia: FECIV/UFU, 2002. 1 CD-ROM.

FORTES, A., S. – **Estruturas de Concreto Submetidas à Flexão Reforçadas com Laminados de CFRP Colados em Entalhes.** Florianópolis/SC, 2004, 213p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

GAN, L., H.; YE, L.; MAI, Y., W. – **Design and Evaluation of Various Section Profiles for Pultruded Deck Panels.** Composite Structures, v. 47, p. 719-725, 1999.

GANGARAO, H., V., S.; THIPPESWAMY, H., K.; SHEKAR, V.; CRAIGO, C. – **Development of Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Bridge Deck.** Journal SAMPE – Society for the Advancement of Materials and Process Engineering, Vol. 35. No. 4 July/August, p. 12-24, 1999.

HARIK, I.; ALAGUSUNDARAMOORTHY, P.; SIDDIQUI, R.; LOPEZ-ANIDO, R., MORTON, S.; DUTTA, P.; SHAHROOZ, B. – **Static Testing on FRP Bridge Deck Panels.** In: Proceedings of 44th International SAMPE Symposium, May 23-27, 1999.

HALL, J., E.; MOTTRAM, J., T. – **Combined FRP Reinforcement and Permanent Formwork for Concrete Members.** Journal of Composites for Construction, ASCE, v. 2. n. 2, p. 78-86, 1998.

HEAD, P. - **Use of Fibre Reinforced Plastics in Bridge Structures.** International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE, 13th Congress in Helsinki, June 6-10, 1988, Congress Report, p. 124.

HELENE, P.; TERZIAN, P. – **Manual de dosagem e controle do concreto.** 1ª ed. Ed. Pini. São Paulo, 1998.

HOLLAWAY, L. C. – **The evolution of and the way forward for advanced polymer composites in the civil infrastructure.** Construction and Building Materials, 17, p. 365-378, 2003.

- HULATT, J.; HOLLAWAY, L.; THORNE, A. – **The use of advanced polymer composites to form an economic structural unit**. Construction and Building Materials, 17, p. 55-68, 2003a.
- HULATT, J.; HOLLAWAY, L.; THORNE, A. – **Short Term Testing of Hybrid T Beam Made of New Prepreg Material**. Journal of Composites for Construction, ASCE, v. 7. n. 2, p. 135-144, 2003b.
- HULL, D. – **An Introduction to Composite Materials**. Cambridge University Press. 1992.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION – **Construcción – Barras de plástico reforzado con fibras de vidrio, fibras de carbono y fibras arámida – Requisitos**. INN - NCh 2577. Santiago, Chile. 2001.
- JOHANSEN, G., E. – **Antioch Composite Pedestrian Bridge**. Disponível em: <<http://iti.acns.nwu.edu/composites/antioch.html>>. Acesso em: 14 jul. 2003.
- JONES, R., M. – **Mechanics of Composite Materials**. 2<sup>a</sup> ed. Edited by Taylor & Francis, Philadelphia, PA. 1999.
- JUVANDES, L., F., P. – **Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de “CFRP”**. Tese de Doutorado. Universidade do Porto (UP), 1999.
- KANSAS STRUCTURAL COMPOSITES – **Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bridges**. Disponível em: <<http://www.ksci.com>>. Acesso em: 14 jan. 2004.
- KARBHARI, V., M. **Renewal of civil infrastructure using FRP composites : efficient use of materials and processes for rehabilitation**. Niterói, RJ. 2000. 21p.. In: Damstruc 2000, Rio de Janeiro, 2000.
- KARBHARI, V., M.; GAO, Y. – **Composite Jacketed Concrete under Uniaxial Compression – Verification of Simple Design Equations**. Journal of Materials Civil Engineering, ASCE, v. 9, n. 4, p. 185-193, 1997.
- KARBHARI, V., M.; SEIBLE, F. - **Design considerations for FRP rehabilitation of concrete structures**. Niterói, RJ. 11p. In: Damstruc 1998, Rio de Janeiro, 1998.
- KARBHARI, V., M.; SEIBLE, F.; BURGUEÑO, R.; DAVOL, A.; WERNLI, M.; ZHAO, L. – **Structural Characterization of Fiber-Reinforced Composite Short-and Medium-Span Bridge Systems**. Applied Composite Material, v. 7 p. 151-182, 2000.
- KAW, A. K.. **Mechanics of Composite Materials**. USA, New York. CRC Press LLC, 1997.
- KELLER, T.; SCHOLLMAYER, M. – **Plate bending behavior of a pultruded GFRP bridge deck system**. Composite Structures. v. 64, p.285-295, 2004.
- KIM, D.; H. – **Composite Structures for Civil and Architectural Engineering**. Published by E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall. London. 1995.
- KRAAI, P., P. – **A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete**. Concrete Construction, v. 30, n. 9. p. 775-778. 1985.
- KUMAR, P.; CHANDRASHEKHARA, K; NANNI, A. – **Testing and Evaluation of Components for a Composite Bridge Deck**. Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 22. n. 5, p. 441-461, 2003.

- KUMAR, P.; CHANDRASHEKHARA, K; NANNI, A. – **Structural performance of a FRP bridge deck**. Construction and Building Materials, n. 18, p. 35-47, 2004.
- LEE, J.; HOLLAWAY, L.; THORNE, A.; HEAD, P. – **The structural characteristic of a polymer composite cellular box beam in bending**. Construction and Building Materials, v. 9, n. 6 p. 333-340, 1995.
- LUBIN, G. – **Handbook of Fiberglass and Advanced Plastics Composites**. Published by Van Nostrand Reinhold Company. New York. 1969.
- LUKE, P., S.; HODGSON, J., A.; CANNING, L., B.; KARUNA, R. – **The Development of an Advanced Composites Decking System for New-build Applications**. Proceedings of Structural Faults and Repair. London, UK, July 4-6, 2001.
- McCORMICK, F., C. - **Field Study of a Pedestrian Bridge of Reinforced Plastics, 1985**. Virginia Highway and Transportation Research Council, Final Report, May 1976 - Sept. 1985, VHTRC86-R21, Dec. 1985, TRIS 453676.
- MEIER, U. - **Carbon Fiber-Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering**. Structural Engineering International, Science and Technology, v.1, 1992.
- MENDES, L., C. - **Tabuleiros de pontes em materiais compósitos**. Niterói, RJ. 10p. In SEMENGE 99, Niterói, 1999.
- MENDONÇA, P., T., R. – **Materiais Compostos & Estruturas Sanduíche – Projeto e Análise**. Editora Manole Ltda. 2005.
- MILKOVICH, S. – **Composite Materials Featured in Chicago's LaSalle Street Bridge**. Reproduced from *BIRLprogress*, v. 6, n. 1 (Spring 1996), p. 1. Disponível em: <<http://iti.acns.nwu.edu/composites/bpspr96.html>>. Acesso em: 14 jul. 2003.
- MIRMIRAN, A.; SHAHAWY, M.; SAMMAN, M.; ECHARY, H., E.; MATRAPA, J., C.; PICO, O. – **Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete**. Journal of Composites for Construction, ASCE, v. 2. n. 4, p. 175-185, 1998.
- MORÉ, T., N., M. - **Estrutura Treliçada em Bambu para utilização em Telhados Residenciais**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Dissertação de Mestrado. Florianópolis. 2003.
- MOSALLAM, A., S. – **Polymer Composites: Architectural and Civil Construction Materials for the 21<sup>st</sup> Century**. In: Int. Conference on Composites in Architecture and Civil Engineering. 19-21 november. São Paulo. Brazil. 2002.
- MOSALLAN, A., S.; BANK, L., C. – **Short-Term Behavior of Pultruded Fiber-Reinforced Plastic Frame**. Journal of Structural Engineering, vol. 118, n. 7, p. 1937-1954, 1992.
- MOSALLAM, A., S.; HAROUN, M., H.; MOSALAM, K., M. – **Repair and Rehabilitation Reinforced and Unreinforced Concrete Slabs with Polymers Composites**. In: Proceedings of Structural Faults and Repair. London, UK, July 4-6, 2001.
- MOSALLAM, A., S.; HAROUN, M., H.; KREINER, J.; DUMLAO, C.; ABDI, F. – **Structural Evaluation of Schuyler Heim All-Composite Bridge Deck**. Proceedings of the SAMPE Conf. Long. Beach, CA, pp. 667-679, 2002.

MUFTI, A., A. – **FRP's and FOS's lead to innovation in Canadian civil engineering structures**. Construction and Building Materials, 17, p. 379-387, 2003.

NAAMAN, A., E.; WONGTAAKITCHAROEN, T.; HAUSER, G. **Influence of Different Fibers on Plastic Shrinkage Cracking of Concrete**, ACI Materials Journal, Vol. 102, No. 1, pp. 49-58. 2005.

NAGARAJ, V.; GANGARAO, H., V., S. – **Characterization of GFRP pultruded box beams under static and fatigue loads**. Journal of Advanced Materials, v. 24. n. 4, p. 3-9, 1993.

NAGARAJ, V.; GANGARAO, H., V., S. – **Static behavior of pultruded GFRP beams**. Journal of Composites for Construction, ASCE, v. 1. n. 3, p. 120-129, 1997.

NANNI, L., F. – **Análise Estatística de Dados com Uso de Técnicas Computacionais**. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFRGS, Caderno Técnico, CT-30/81. Porto Alegre, 1986.

NEUFELD, J., L. – **Estatística aplicada à administração usando Excel**. São Paulo. Ed. Prentice Hall, 2003.

NGUYEN, D., M.; CHAN, T., K.; CHEONG, H., K. – **Brittle Failure and Bond Development Length of CFRP-Concrete Beams**. Journal of Composites for Construction. Vol. 5. Nº. 1. 2001, p. 12-17. ASCE.

NYSTROM, H., E.; WATKINS, S., E.; NANNI, A.; MURRAY, S. – **Financial Viability of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bridges**. Accepted by the Journal of Management in Engineering. 2003. 15 pp. ASCE. Disponível em: <<http://www.scholar.google.com>>

OWENS CORNING – Soluções para Compósitos. Disponível em: <<http://www.owenscorning.com.br>>. Acesso em: 05 jun. 2003.

PARK, R.; PAULAY, R. – **Reinforced Concrete Structures**. Ed. John Willey & Sons. New York. 1975.

PINTO JÚNIOR, N., O. – **Análise do Desempenho de Concretos Incorporando Baixos Teores de Fibras de Polipropileno, Nylon e Poliéster**. Relatório de Ensaios Tecnológicos à ETRURIA – Indústria de Fibras e Fios Sintéticos Ltda. Faculdade de Engenharia Civil, Laboratório de Estruturas e Construção Civil, 47p, 2001.

PETHRICK, R., A.; BOINARD, E.; DALZEL-JOB, J.; MACFARLANE, C., J. – **Influence of resin chemistry on water uptake na environmental aging in glass fibre reinforced composites – Polyester and vinylester laminates**. Journal Materials Science, 35 (8), 1931-1937, 2000.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R., J.; DA MATA, L., A., C. – **Elementos das Estruturas Mistas Aço-Concreto**. Belo Horizonte. Ed. O Lutador. 2001.

RIZKALLA, S.; LABOSSIERE, P. – **Structural Engineering with FRP – in Canada**. Concrete International, ACI, v. 21. n. 10, p. 25-28, 1999.

ROBERTS, T., M.; AL-UBAIDI, H. – **Flexural and Torsional Properties of Pultruded Fiber Reinforced Plastics I-Profiles**. Journal of Composites for Construction, ASCE, v. 6. n. 1, p. 28-34, 2002.

- SALIM, H., A.; DAVALOS, J., F.; QIAO, P.; KIGER, S., A. – **Analysis and design of fiber reinforced plastic composite deck-and-stringer bridges**. *Composite Structures*, v. 38, n. 1-4, p. 295-307. 1997.
- SANTAROSA, D.; CAMPOS FILHO, A.; BEBER, A., J.; CAMPAGNOLO, J., L. – **Avaliação do Desempenho de Pilares Curtos de Concreto Confinados com Mantas Flexíveis de Fibra de Carbono**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE BEHAVIOUR OF DAMAGED STRUCTURES, III, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro UFF. 1 CD-ROM.
- SANTOS, A., C.; SZÜCS, C., A.; DÍAZ, F., A., D. – **Reforço com Fibra de Vidro na Região das Rótulas de Vigas Gerber em Madeira Laminada Colada**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, VIII, 2002, Uberlândia. Anais... Uberlândia: FECIV/UFU, 2002. 1 CD-ROM.
- SAP 2000 PLUS – **Integrated Finite Elements Analysis and Design of Structures**. Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA. Versão 6.13, 1998.
- SEIBLE, F.; HEGEMIER, G., A.; PRIESTLEY, M., J., N.; KINGSLEY, G.; KÜRKCHÜBASCHÉ, A.; IGARASHI, A.; WEEKS, J. – **The U.S.-TCCMAR Full-Scale Five-Story Masonry Research Building Test**. Structural System Research Project, Report No. SSRP-94/01, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, USA, Jan. 1994.
- SEIBLE, F.; KARBHARI, V., M. – **Advanced Composites for Civil Engineering Applications in the U.S.**. Proceedings of the first International Conference on Composites in Infrastructure, ICCI 96, Tucson, Arizona, Jan. 1996, pp. 21-37.
- SEIBLE, F.; KARBHARI, V., M. – **Rehabilitation & Renewal of Civil Structural Systems with Advanced Composites**. P005, Ago. 1998, pp. 1-22.
- SENACH, J., L., B.; YAZZAR, S., A.; ROS, P., S.; PRADA, M., A., F.; SOSA, P., F., M. – **Bloque Rectangular Equivalente Considerando el Efecto del Confinamiento y la Resistencia del Hormigón**. In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2002, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: IBRACON, 2002. 1 CD-ROM.
- SHAELES, C., A.; HOVER, K., C. – **Influence of Mix Proportions and Construction Operations on Plastic Shrinkage Cracking in Thin Slabs**. *ACI Materials Journal*, v. 85, n. 6. p. 495-504. 1988.
- SHEIKH, S., A. – **Performance of Concrete Structures Retrofitted with Fibre Reinforced Polymers**. *Engineering Structures*, v. 24, p. 869-879, 2002.
- SMITH, S., J.; BANK, L., C.; GENTRY, T., R.; NUSS, K., H.; HURD, S., H.; DUICH, S., J.; OH, B. – **Analysis and testing of a prototype pultruded composite causeway structure**. *Composite Structures*, n. 49, p. 141-150, 2000.
- STOLL, F.; SALIBA, J., E.; CASPER, L., E. – **Experimental Study of CFRP-prestressed High-strength Concrete Bridge Beams**. *Composite Structures*, v. 49, p. 191-200, 2000.
- STRONGWELL – **Fiberglass Structural Shapes and Plate**. Disponível em: <<http://www.strongwell.com>>. Acesso em: 12 jan. 2004.
- SOROUSHIAN, P.; MIRZA, F.; ALHOZAIMY, A. – **Plastic Shrinkage Cracking of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete**. *ACI Materials Journal*, v. 92, n. 5. p. 553-560. 1995.

SOTIROPOULOS, S., N.; GANGARAO, H., V., S.; MONGI, A., N., K. – **Theoretical and Experimental Evaluation of FRP Components and Systems**. Journal of Structural Engineering, ASCE, v. 120. n. 2, p. 464-485, 1994.

SZÜCS, C., A. – **Étude d'un Assemblage par Pièce de Coin en Bois Lamellé-collé Renforcé par Fibres de Verre**. Metz, 1991. Tese de Doutorado – L'Université de Metz.

TANESI, J. - **A Influência das Fibras de Polipropileno no Controle da Fissuração por Retração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado de São Paulo – USP, São Paulo, 1999.

TANG, B. – **Fiber Reinforced Polymer Composites Applications in USA**. DOT – Federal Highway Administration. Published in the first Korea/USA Road Workshop Proceedings, Jan. 28-29, 1997.

TANG, B.; PODOLNY, W. – **A Successful Beginning for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Materials in Bridge Applications**. Proceedings FHWA International Conference on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, Orlando, FL, Dec. 7-11, 1998.

TENG, J., G.; CAO, S., Y.; LAM, L. – **Behavior of GFRP-strengthened RC Cantilever Slabs**. Construction and Building Materials, v. 15, n. 7, p. 339-349, 2001.

TIMOSHENKO, S., P.; GERE, J., E. – **Mecânica dos Sólidos**. Vol. 1. Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro. 1994.

TIMOSHENKO, S., P.; GOODIER, J., N. – **Theory of Elasticity**. 3<sup>a</sup> ed. Published by McGraw-Hill International, 1982.

TINGLEY, D. – **Fiber Reinforced Plastic Use in Retrofitting Wood Structures**. In: Proceedings of Structural Faults and Repair. London, UK, July 4-6, 2001.

TITA, V. – **Análise Dinâmica Teórica e Experimental de Vigas Fabricadas a partir de Materiais Compósitos Poliméricos Reforçados**. São Carlos, 1999. 125p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

TOUTANJI, H. – **Stress-strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fibre Composite Sheets**. ACI Materials Journal, v. 96, n. 3, p. 397-404, 1999.

TRIANTAFILLOU, T., C.; ANTONOPOULOS, C., P. – **Design of Concrete Flexural Members Strengthened in Shear with FRP**. Journal of Composites for Construction, ASCE, v. 4. n. 4, p. 198-205, 2000.

TROTTIER, J., F.; MORGAN, D., F.; FORGERON, D. – **Fiber Reinforced Concrete for Exterior Slabs-on-grade. Part I**. Concrete International, v. 19. n. 6, p. 35-39, 1997.

UNSER, J.; KUMAR, P.; CHANDRASHEKHARA, K.; NANNI, A.; WATKINS, S. – **Adaptable All-Composite Bridge Concept**. Proceedings of the CFA Composite Conference. Paper n. 39, pp. 1-15, Las Vegas, NV, Sept. 26-30, 2000.

VAN DEN EINDE, L.; ZHAO, L.; SEIBLE, F. – **Use of FRP composites in civil structural applications**. Construction and Building Materials, v. 17, p. 389-403, 2003.

WANG, K; SHAH, S., P.; PHUAKSUK, P. – **Plastic Shrinkage Cracking in Concrete Materials – Influence of Fly Ash and Fibers**. ACI Materials Journal, v. 98, n. 6. p. 458-464. 2001.

WEEKS, J.; SEIBLE, F.; HEGEMIER, G., A.; PRIESTLEY, M., J., N. – **The US-TCCMAR Full-Scale Five-Story Masonry Research Building Test: Part V – Repair and Retest**. Structural System Research Project, Report No. SSRP-94/05, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, USA, Jan. 1994.

WILLIAMS, B.; SHEHATA, E.; RIZKALLA, S., H. – **Filament-Wound Glass Fiber Reinforced Polymer Bridge Deck Modules**. Journal of Composites for Construction, ASCE, v. 7. n. 3, p. 266-273, 2003.

ZHAO, L.; BURGUEÑO, R.; LA ROVERE, H., L.; SEIBLE F.; KARBHARI, V. – **Preliminary Evaluation of the Hybrid Tube Bridge System**. Structural System Research Project, Report No. TR-2000/04, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, USA, Feb. 2000.

ZHAO, L.; KARBHARI, V.; SEIBLE, F.; BURGUEÑO, R.; LA ROVERE, H., L.; BROSTROM, M.; GODONOU, P. – **Experimental Investigation of Prototype Transverse System for the Gilman Drive Advanced Technology Over-Crossing**. Structural System Research Project, Report No. SSRP-2001/04, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, USA, May 2001.

ZOLLO, R., F. – **Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development**. Cement & Concrete Composites, v. 19, p. 107-122. 1997.

ZUREICK, A. – **Fiber-reinforced Polymeric Bridge Decks**. In: Proceedings of Structural Faults and Repair. London, UK, July 4-6, 2001.

## ANEXO A

$$GPa := 10^9 \cdot Pa$$

CÁLCULO DOS COMPRIMENTOS NECESSÁRIOS PARA ENSAIOS DE PERFIS NA FLEXÃO A 3 PONTOS EM FUNÇÃO DA ESBELTEZ (PERFIL H de 10cm)

$$d := 10.16 \cdot cm$$

$$b := 10.16 \cdot cm$$

$$t := 0.9525 \cdot cm$$

$$I := \frac{(b \cdot d^3)}{12} - 2 \cdot \left[ \frac{\left( \frac{(b-t)}{2} \cdot (d-2 \cdot t)^3 \right)}{12} \right] \quad I = 4.563 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$A := 2 \cdot (b \cdot t) + (d - 2 \cdot t) \cdot t \quad A = 2.722 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$r := \sqrt{\frac{I}{A}} \quad r = 0.041 \text{ m}$$

$$iesb := 100$$

$$L100 := r \cdot \sqrt{iesb} \quad L100 = 0.409 \text{ m}$$

$$Ky := \frac{(d-t) \cdot t}{A}$$

$$Ky = 0.322$$

$$iesb := 200$$

$$L200 := r \cdot \sqrt{iesb} \quad L200 = 0.579 \text{ m}$$

$$iesb := 300$$

$$L300 := r \cdot \sqrt{iesb} \quad L300 = 0.709 \text{ m}$$

$$iesb := 400$$

$$L400 := r \cdot \sqrt{iesb} \quad L400 = 0.819 \text{ m}$$

ESTIMATIVA DA CARGA MÁXIMA PARA ATINGIR A DEFLEXÃO LIMITE DE L/350

Dados:

$$E := 21 \cdot GPa \quad (\text{Estimativa inicial para o cálculo})$$

$$I = 4.563 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$\delta_{\max} := \frac{L}{350}$$



Índice de Esbeltez: 100

$$L_{100} := 41 \cdot \text{cm}$$

$$\delta_{\max 100} := \frac{L_{100}}{350} \quad \delta_{\max 100} = 1.171 \cdot \text{mm}$$

$$P_{\max} := \frac{48 \cdot E \cdot I \cdot \delta_{\max 100}}{L_{100}^3} \quad P_{\max} = 7.972 \cdot 10^3 \cdot \text{kgf}$$

Índice de Esbeltez: 200

$$L_{200} := 58 \cdot \text{cm}$$

$$\delta_{\max 200} := \frac{L_{200}}{350} \quad \delta_{\max 200} = 1.657 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$P_{\max} := \frac{48 \cdot E \cdot I \cdot \delta_{\max 200}}{L_{200}^3} \quad P_{\max} = 3.984 \cdot 10^3 \cdot \text{kgf}$$

Índice de Esbeltez: 300

$$L_{300} := 71 \cdot \text{cm}$$

$$\delta_{\max 300} := \frac{L_{300}}{350} \quad \delta_{\max 300} = 2.029 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$P_{\max} := \frac{48 \cdot E \cdot I \cdot \delta_{\max 300}}{L_{300}^3} \quad P_{\max} = 2.658 \cdot 10^3 \cdot \text{kgf}$$

Índice de Esbeltez: 400

$$L_{400} := 82 \cdot \text{cm}$$

$$\delta_{\max 400} := \frac{L_{400}}{350} \quad \delta_{\max 400} = 2.343 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$P_{\max} := \frac{48 \cdot E \cdot I \cdot \delta_{\max 400}}{L_{400}^3} \quad P_{\max} = 1.993 \cdot 10^3 \cdot \text{kgf}$$

## CP-1

(L/r) <sup>2</sup>	P (N)	A (m <sup>2</sup> )	L (m)	Flecha (mm)	Flecha (m)	4Av/PL
400	9000	2,72E-03	0,82	1,475546875	0,0014755	2,177E-09
	18000	2,72E-03	0,82	3,16765625	0,0031677	2,337E-09

Média 2,257E-09

(L/r) <sup>2</sup>	P (N)	A (m <sup>2</sup> )	L (m)	Flecha (mm)	Flecha (m)	4Av/PL
300	9000	2,72E-03	0,71	1,1246875	0,0011247	1,916E-09
	18000	2,72E-03	0,71	2,434895833	0,0024349	2,074E-09

1,995E-09

(L/r) <sup>2</sup>	P (N)	A (m <sup>2</sup> )	L (m)	Flecha (mm)	Flecha (m)	4Av/PL
200	9000	2,72E-03	0,58	0,772083333	0,0007721	1,61E-09
	18000	2,72E-03	0,58	1,704166667	0,0017042	1,777E-09

1,694E-09

(L/r) <sup>2</sup>	P (N)	A (m <sup>2</sup> )	L (m)	Flecha (mm)	Flecha (m)	4Av/PL
100	9000	2,72E-03	0,41	0,480416667	0,0004804	1,418E-09
	18000	2,72E-03	0,41	1,017083333	0,0010171	1,501E-09

## Corpo de prova - 1

100 1,459E-09

200 1,694E-09

300 1,995E-09

400 2,257E-09

## CP-2

(L/r) <sup>2</sup>	P (N)	A (m <sup>2</sup> )	L (m)	Flecha (mm)	Flecha (m)	4Av/PL
400	9000	2,72E-03	0,82	1,326458333	0,0013265	1,957E-09
	18000	2,72E-03	0,82	2,979375	0,0029794	2,198E-09

Média 2,077E-09

(L/r) <sup>2</sup>	P (N)	A (m <sup>2</sup> )	L (m)	Flecha (mm)	Flecha (m)	4Av/PL
300	9000	2,72E-03	0,71	1,038958333	0,001039	1,77E-09
	18000	2,72E-03	0,71	2,324895833	0,0023249	1,981E-09

1,876E-09

(L/r) <sup>2</sup>	P (N)	A (m <sup>2</sup> )	L (m)	Flecha (mm)	Flecha (m)	4Av/PL
200	9000	2,72E-03	0,58	0,7175	0,0007175	1,497E-09
	18000	2,72E-03	0,58	1,6153125	0,0016153	1,685E-09

1,591E-09

(L/r) <sup>2</sup>	P (N)	A (m <sup>2</sup> )	L (m)	Flecha (mm)	Flecha (m)	4Av/PL
100	9000	2,72E-03	0,41	0,452708333	0,0004527	1,336E-09
	18000	2,72E-03	0,41	0,9575	0,0009575	1,413E-09

## Corpo de prova - 2

100 1,374E-09

200 1,591E-09

300 1,876E-09

400 2,077E-09



## ANEXO C

### PROPRIEDADES ELÁSTICAS DA LÂMINA UNIDIRECIONAL DE ROVINGS

$$\text{GPa} := 10^9 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad \text{MPa} := 10^6 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

OBS: Será desprezado o índice de vazios, ou seja,  $V_v=0$ .

#### - MECÂNICA DOS MATERIAIS

##### 1) Propriedades da fibra e da matriz (fibra de vidro/resina poliéster)

$$E_f := 72.4 \cdot \text{GPa}$$

$$E_m := 3.8 \text{ GPa}$$

$$V_f := 0.60$$

$$v_f := 0.2$$

$$v_m := 0.38$$

##### 1.1) Módulo de Elasticidade Longitudinal

$$E_1 := E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m$$

$$E_1 = 45.72 \cdot \text{GPa}$$

##### 1.2) Módulo de Elasticidade Transversal

$$E_{2\text{inv}} := \left( \frac{V_f}{E_f} \right) + \left( \frac{1 - V_f}{E_m} \right) \quad E_{2\text{inv}} = 1.136 \cdot 10^{-10} \frac{\text{m} \cdot \text{s}^2}{\text{kg}}$$

$$E_2 := \frac{1}{E_{2\text{inv}}}$$

$$E_2 = 8.807 \cdot \text{GPa}$$

##### 1.3) Coeficientes de Poisson

$$v_{12} := V_f \cdot v_f + v_m \cdot (1 - V_f) \quad v_{12} = 0.272$$

##### 1.4) Módulo de Cisalhamento

$$G_f := \frac{E_f}{2 \cdot (1 + v_f)} \quad G_f = 30.167 \cdot \text{GPa}$$

$$G_m := \frac{E_m}{2 \cdot (1 + \nu_m)} \quad G_m = 1.377 \text{ GPa}$$

$$G := \frac{(\nu_f)}{G_f} + \frac{(1 - \nu_f)}{G_m} \quad G_{12} := \frac{1}{G} \quad G_{12} = 3.221 \text{ GPa}$$

### - MODELO SEMI-EMPÍRICO DE HALPHIN e TSAI

#### 1) Módulo de Elasticidade Transversal

$\xi := 2$  Fator de reforço para módulo de elasticidade transversal

$$\eta := \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + \xi} \quad \eta = 0.858$$

$$E_2 := E_m \cdot \left(\frac{1 + \xi \cdot \eta \cdot \nu_f}{1 - \eta \cdot \nu_f}\right) \quad E_2 = 15.881 \text{ GPa}$$

#### 2) Módulo de Cisalhamento

$\xi := 1$  Fator de reforço para módulo de cisalhamento

$$\xi_{\text{Hewitt}} := 1 + 40 \cdot \nu_f^{10} \quad \xi_{\text{Hewitt}} = 1.242$$

$$\eta := \frac{\left(\frac{G_f}{G_m}\right) - 1}{\left(\frac{G_f}{G_m}\right) + \xi_{\text{Hewitt}}} \quad \eta = 0.903$$

$$G_{12} := G_m \cdot \left(\frac{1 + \xi_{\text{Hewitt}} \cdot \eta \cdot \nu_f}{1 - \eta \cdot \nu_f}\right) \quad G_{12} = 5.028 \text{ GPa}$$

## RESISTÊNCIA DE UM LAMINADO UNIDIRECIONAL DE PRFV (FIBRA DE VIDRO - POLIÉSTER)

2) Resistências de Ruptura de uma Lâmina (fibra de vidro/poliéster)

2.1 ) Resistência ao cisalhamento

Fibras circulares dispostas em um conjunto quadrado

$$r := \left[ \frac{4 \cdot (V_f)}{\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad r = 0.874 \quad \text{Resistência ao cisalhamento da matriz: } \tau_{12\text{mult}} := 34 \cdot \text{MPa}$$

Deformação de cisalhamento na ruptura

$$\gamma_{12\text{mult}} := \frac{\tau_{12\text{mult}}}{G_m} \quad \gamma_{12\text{mult}} = 0.025$$

$$\tau_{12} := G_{12} \cdot \left[ r \cdot \frac{G_m}{G_f} + (1 - r) \right] \cdot \gamma_{12\text{mult}} \quad \tau_{12} = 20.593 \cdot \text{MPa}$$

2.2) Resistência à tração

2.2.1) Tração Longitudinal às Fibras

$$\sigma_{\text{fult}} := 1650 \cdot \text{MPa}$$

$$\epsilon_{\text{fult}} := \frac{\sigma_{\text{fult}}}{E_f} \quad \epsilon_{\text{fult}} = 0.023$$

$$\sigma_{\text{mult}} := 72 \cdot \text{MPa}$$

$$\epsilon_{\text{mult}} := \frac{\sigma_{\text{mult}}}{E_m} \quad \epsilon_{\text{mult}} = 0.019$$

$$\sigma_{1\text{ult}} := \sigma_{\text{fult}} \cdot V_f$$

$$\sigma_{1\text{ult}} = 990 \cdot \text{MPa}$$

2.2.2) Tração Transversal às Fibras

$$\epsilon_{2\text{ult}} := \left[ r \cdot \left( \frac{E_m}{E_f} - 1 \right) + 1 \right] \cdot \epsilon_{\text{mult}}$$

$$\epsilon_{2\text{ult}} = 3.256 \cdot 10^{-3}$$

$$\sigma_{2\text{ult}} := E_2 \cdot \epsilon_{2\text{ult}} \quad \sigma_{2\text{ult}} = 51.706 \cdot \text{MPa}$$

## 2.3) Resistência à compressão

## 2.3.1) Modo de falha pela resistência última da matriz

$$\sigma_{1cult} := \frac{E1 \cdot \epsilon_{2ult}}{\nu_{12}} \quad \sigma_{1cult} = 547.269 \text{ MPa}$$

## 2.3.2) Modo de falha pela microflambagem da fibra

$$S_{1c} := 2 \cdot \left[ \nu_f + (1 - \nu_f) \cdot \frac{E_m}{E_f} \right] \cdot \sqrt{\frac{\nu_f \cdot E_m \cdot E_f}{3 \cdot (1 - \nu_f)}} \quad S_{1c} = 1.457 \cdot 10^4 \text{ MPa}$$

$$S_{2c} := \frac{G_m}{1 - \nu_f} \quad S_{2c} = 3.442 \cdot 10^3 \text{ MPa} \quad \tau_m := 34 \text{ MPa}$$

## 2.3.3) Modo de falha pela ruptura ao cisalhamento fibra

$$\sigma_{1cult} := 2 \cdot (\tau_{12} \cdot \nu_f + \tau_m \cdot (1 - \nu_f)) \quad \sigma_{1cult} = 51.912 \text{ MPa}$$

s



# ANEXO C

## TEORIA CLÁSSICA DE LAMINAÇÃO - DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO LAMINADO DE PRFV

$$\text{GPa} := 10^9 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Número de Lâminas do perfil de PRFV:

$$\text{NLAM} := 5$$

Lâmina de Manta de Filamentos Contínuos (1)

$$E1_1 := 7 \cdot \text{GPa} \quad E2_1 := 7 \cdot \text{GPa} \quad \nu12_1 := 0.401 \quad G12_1 := 2.5 \cdot \text{GPa}$$

Lâmina de Filamentos Contínuos (2)

$$E1_2 := 49.24 \cdot \text{GPa} \quad E2_2 := 6.56 \cdot \text{GPa} \quad \nu12_2 := 0.272 \quad G12_2 := 2.39 \cdot \text{GPa}$$

Lâmina de Manta de Filamentos Contínuos (3)

$$E1_3 := 7 \cdot \text{GPa} \quad E2_3 := 7 \cdot \text{GPa} \quad \nu12_3 := 0.401 \quad G12_3 := 2.5 \cdot \text{GPa}$$

Lâmina de Filamentos Contínuos (4)

$$E1_4 := 49.24 \cdot \text{GPa} \quad E2_4 := 6.56 \cdot \text{GPa} \quad \nu12_4 := 0.272 \quad G12_4 := 2.39 \cdot \text{GPa}$$

Lâmina de Manta de Filamentos Contínuos (5)

$$E1_5 := 7 \cdot \text{GPa} \quad E2_5 := 7 \cdot \text{GPa} \quad \nu12_5 := 0.401 \quad G12_5 := 2.5 \cdot \text{GPa}$$

Loop de Lâminas

$$i := 1.. \text{NLAM}$$

$$Q_i := \begin{bmatrix} \frac{E1_i}{1 - \left[ \left( \frac{E2_i}{E1_i} \right) \cdot \nu12_i \right]} & \frac{E2_i \cdot \nu12_i}{1 - \left[ \left( \frac{E2_i}{E1_i} \right) \cdot \nu12_i \right]} & 0 \\ \frac{E2_i \cdot \nu12_i}{1 - \left[ \left( \frac{E2_i}{E1_i} \right) \cdot \nu12_i \right]} & \frac{E2_i}{1 - \left[ \left( \frac{E2_i}{E1_i} \right) \cdot \nu12_i \right]} & 0 \\ 0 & 0 & G12_i \end{bmatrix}$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 8.341 \cdot 10^9 & 3.345 \cdot 10^9 & 0 \\ 3.345 \cdot 10^9 & 8.341 \cdot 10^9 & 0 \\ 0 & 0 & 2.5 \cdot 10^9 \end{bmatrix} \text{ Pa}$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 4.973 \cdot 10^{10} & 1.802 \cdot 10^9 & 0 \\ 1.802 \cdot 10^9 & 6.625 \cdot 10^9 & 0 \\ 0 & 0 & 2.39 \cdot 10^9 \end{bmatrix} \text{ Pa}$$

$$Q_3 = \begin{bmatrix} 8.341 \cdot 10^9 & 3.345 \cdot 10^9 & 0 \\ 3.345 \cdot 10^9 & 8.341 \cdot 10^9 & 0 \\ 0 & 0 & 2.5 \cdot 10^9 \end{bmatrix} \text{ Pa}$$

$$Q_4 = \begin{bmatrix} 4.973 \cdot 10^{10} & 1.802 \cdot 10^9 & 0 \\ 1.802 \cdot 10^9 & 6.625 \cdot 10^9 & 0 \\ 0 & 0 & 2.39 \cdot 10^9 \end{bmatrix} \text{ Pa}$$

$$Q_5 = \begin{bmatrix} 8.341 \cdot 10^9 & 3.345 \cdot 10^9 & 0 \\ 3.345 \cdot 10^9 & 8.341 \cdot 10^9 & 0 \\ 0 & 0 & 2.5 \cdot 10^9 \end{bmatrix} \text{ Pa}$$

Espessura total do Laminado:

$$t := 9.5 \cdot \text{mm}$$

$$h_0 := -4.75 \cdot \text{mm}$$

$$h_1 := -3.75 \cdot \text{mm}$$

$$h_2 := -0.5 \cdot \text{mm}$$

$$h_3 := 0.5 \cdot \text{mm}$$

$$h_4 := 3.75 \cdot \text{mm}$$

$$h_5 := 4.75 \cdot \text{mm}$$

$$A := \sum_{k=1}^5 (Q_k) \cdot (h_k - h_{k-1})$$

$$A = \begin{bmatrix} 3.483 \cdot 10^8 & 2.175 \cdot 10^7 & 0 \\ 2.175 \cdot 10^7 & 6.809 \cdot 10^7 & 0 \\ 0 & 0 & 2.304 \cdot 10^7 \end{bmatrix} \text{ m} \cdot \text{Pa}$$

$$\alpha := A^{-1}$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} 2.93 \cdot 10^{-9} & -9.358 \cdot 10^{-10} & 0 \\ -9.358 \cdot 10^{-10} & 1.499 \cdot 10^{-8} & 0 \\ 0 & 0 & 4.341 \cdot 10^{-8} \end{bmatrix} \frac{1}{\text{m} \cdot \text{Pa}}$$

$$E_x := \frac{1}{t \cdot \alpha_{(0,0)}} \quad E_x = 35.929 \cdot \text{GPa}$$

$$E_y := \frac{1}{t \cdot \alpha_{(1,1)}} \quad E_y = 7.024 \cdot \text{GPa}$$

$$G_{xy} := \frac{1}{t \cdot \alpha_{(2,2)}} \quad G_{xy} = 2.425 \cdot \text{GPa}$$

$$\nu_{yx} := \frac{-\alpha_{(0,1)}}{\alpha_{(1,1)}} \quad \nu_{yx} = 0.062$$

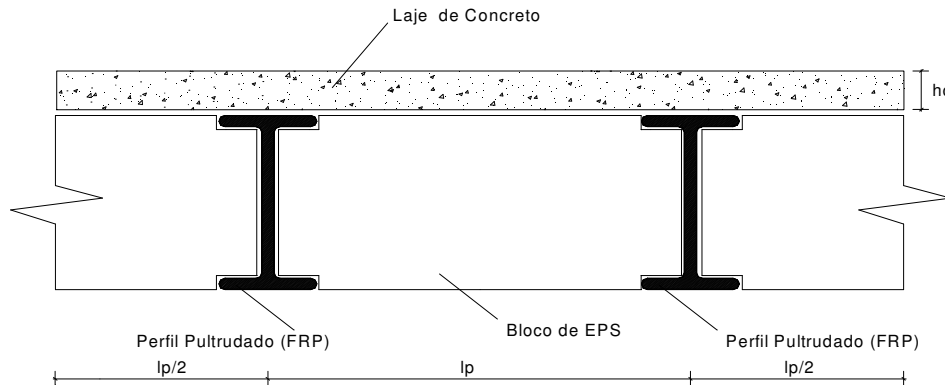
$$\nu_{xy} := \nu_{yx} \cdot \frac{E_x}{E_y} \quad \nu_{xy} = 0.319$$



Horas	0%			0,05%			0,10%			0,15%		
	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 1	Placa 2	Placa 3
1	1,06	1,63	1,40	1,36	1,06	1,50	1,22	1,62	0,91	0,72	0,82	0,87
2	1,73	2,53	2,10	2,12	1,89	2,00	1,99	2,61	2,21	0,79	1,78	1,67
3	2,51	3,68	2,96	3,05	3,03	2,40	2,98	3,65	3,19	1,29	2,92	2,54
4	3,39	4,61	4,01	4,00	3,96	2,95	3,74	4,58	4,32	1,81	3,72	3,26
5	3,94	5,20	4,53	4,56	4,67	3,40	4,33	5,17	5,16	2,54	4,29	4,07
6	4,46	5,51	4,99	4,99	5,21	3,90	4,87	5,65	5,58	3,01	4,75	4,40
7	4,75	5,82	5,27	5,28	5,64	4,05	5,19	6,14	6,08	3,21	5,14	5,02
8	5,10	6,10	5,56	5,59	6,04	4,20	5,54	6,29	6,29	3,68	5,42	5,27

# ANEXO E

## DEFINIÇÃO PRELIMINAR DO COMPRIMENTO DA LAJE UNIDIRECIONAL CONCRETO/PRF PARA O ESTADO LIMITE DE SERVIÇO



$$\text{GPa} := 10^9 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad \text{MPa} := 10^6 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad \text{kN} := 1000 \cdot \text{N} \quad \text{kgf} := 10 \cdot \text{N}$$

### CÁLCULO DA FLECHA PARA A CARGA CONSTRUTIVA

1) Dados do Perfil:

$$d := 10.16 \cdot \text{cm}$$

$$b_{fs} := 10.16 \cdot \text{cm}$$

$$t_{fs} := 0.9525 \cdot \text{cm}$$

$$b_{fi} := 10.16 \cdot \text{cm}$$

$$t_{fi} := 0.9525 \cdot \text{cm}$$

$$t_w := 0.9525 \cdot \text{cm}$$

$$d_w := d - t_{fs} - t_{fi} \quad d_w = 8.255 \cdot \text{cm}$$

2) Peso Próprio do Concreto

$$h_c := 4 \cdot \text{cm}$$

$$l_p := 40 \cdot \text{cm}$$

$$\gamma := 2400 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

$$\text{PPC} := \gamma \cdot h_c \cdot 2 \cdot l_p$$

$$\text{PPC} = 76.8 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \quad (\text{Peso próprio da capa de concreto /metro linear})$$

## 3) Peso Próprio do Perfil

$$A_p := (bfs \cdot tfs) + (bfi \cdot tfi) + (dw \cdot tw) \quad A_p = 2.722 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\gamma_p := 1950 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

$$p_f := A_p \cdot \gamma_p \quad p_f = 5.307 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

$$PPP := 2 \cdot p_f$$

$$PPP = 10.615 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

## 4) Peso Próprio dos EPS

$$heps := 10 \cdot \text{cm} \quad \gamma_{eps} := 18 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

$$PPEPS := \gamma_{eps} \cdot heps \cdot 2 \cdot l_p$$

$$PPEPS = 1.44 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

$$g := PPC + PPP + PPEPS$$

$$g = 88.855 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \quad (\text{Carregamento total na laje mista})$$

## 4) Momento de Inércia do Perfil

$$I_p := \left( \frac{bfi \cdot d^3}{12} \right) - \left[ \frac{(bfi - tw) \cdot dw^3}{12} \right]$$

$$I_p = 456.33 \text{ cm}^4$$

## 5) Módulo de Elasticidade do Perfil

$$E_p := 32.86 \cdot \text{GPa}$$

## 6) Cálculo do comprimento máximo para a laje mista:

## 6.1) Cálculo considerando o concreto fresco + perfis de PRFV + EPS

$$l_{\text{máx}} := \left( \frac{384 \cdot E_p \cdot 2 \cdot I_p}{5 \cdot 250 \cdot g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad l_{\text{máx}} = 4.698 \text{ m}$$

6.2) Cálculo considerando o peso próprio da laje (PRF+EPS) e um operário trabalhando

$$g_2 := \text{PPP} + \text{PPEPS} \quad g_2 = 12.055 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

$$q := 100 \cdot \text{kgf} \quad (\text{Peso de um operário})$$

$$f(L) := \left( \frac{5 \cdot g_2 \cdot L^3}{384 \cdot E_p \cdot I_p} \right) + \left( \frac{q \cdot L^2}{48 \cdot E_p \cdot I_p} \right) - \frac{1}{250}$$

$$L := 4.0 \cdot \text{m}$$

$$\text{root}(f(L), L) = 4.686 \text{ m}$$

Considerando os carregamentos do peso próprio da laje mais a capa de concreto e a carga accidental de um operário com o peso da laje, o limite para o comprimento da laje foi maior do que a consideração do peso do concreto atuando da laje. Desta maneira, a carga construtiva crítica é a consideração do peso próprio da laje e da capa de concreto.

### CÁLCULO DA FLECHA PARA CARGA EM SERVIÇO

1) Propriedades e Dados do Concreto

$$f_{ck} := 30 \cdot \text{MPa}$$

$$E_{ci} := \left[ 5600 \cdot (f_{ck})^{\frac{1}{2}} \right] \cdot \text{MPa}^{\frac{1}{2}} \quad E_{ci} = 3.067 \cdot 10^4 \cdot \text{MPa}$$

$$E_c := 0.85 \cdot E_{ci} \quad E_c = 26.072 \cdot \text{GPa} \quad (\text{Segundo a NBR 6118/2003})$$

$$l_p := 40 \cdot \text{cm}$$

$$b_c := 2 \cdot l_p \quad b_c = 0.8 \text{ m}$$

$$h_c := 4 \cdot \text{cm}$$

$$A_c := b_c \cdot h_c \quad A_c = 320 \cdot \text{cm}^2$$

3) Posição da Linha Neutra

$$n := \frac{E_c}{E_p} \quad n = 0.793 \quad (\text{Homogenização da seção para material compósito})$$

$$y_c := d + \frac{h_c}{2} \quad y_c = 12.16 \cdot \text{cm}$$

$$y_p := \frac{d}{2} \quad y_p = 5.08 \cdot \text{cm}$$

$$y := \frac{(n \cdot y_c \cdot h_c \cdot b_c) + (2 \cdot y_p \cdot A_p)}{n \cdot h_c \cdot b_c + 2 \cdot A_p}$$

$$y = 10.91 \cdot \text{cm}$$



$$dc := y_c - y \quad dc = 1.25 \text{ cm}$$

$$I_c := \frac{n \cdot 2 \cdot l_p \cdot h_c^3}{12} \quad I_c = 338.523 \text{ cm}^4$$

$$dp := y - y_p$$

$$dp = 5.83 \text{ cm}$$

#### 4) Momento de Inércia da Seção Transformada

$$I_{\text{seção}} := \left[ (I_c + n \cdot A_c \cdot dc^2) + 2 \cdot (I_p + A_p \cdot dp^2) \right]$$

$$I_{\text{seção}} = 3.498 \cdot 10^3 \text{ cm}^4$$

#### 5) Rigidez à Flexão da Seção Transformada (D)

$$D := E_p \cdot I_{\text{seção}} \quad D = 1.149 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

#### 6) Sobrecarga em Passarela de Pedestre

$$p := 5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad [\text{Carga móvel para passarela, conforme a NBR 7188 (1982)}]$$

$$q_{sc} := p \cdot 2 \cdot l_p \quad q_{sc} = 4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

#### 7) Cargas Permanentes

$$p_{\text{revest}} := 150 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \quad (\text{Carregamento adotado para revestimentos})$$

$$g_{\text{revest}} := p_{\text{revest}} \cdot 2 \cdot l_p$$

$$g_{\text{revest}} = 1.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$g_{\text{tot}} := g + g_{\text{revest}}$$

$$g_{\text{tot}} = 2.089 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

#### 8) Carregamento na Laje Mista Para a Estimativa da Flecha

$$C_{\text{tot}} := g_{\text{tot}} + 0.4 \cdot q_{sc}$$

$$C_{\text{tot}} = 3.689 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

#### 9) Cálculo da Flecha

$$L := 4.79 \cdot \text{m}$$

$$\delta := \frac{5 \cdot C_{\text{tot}} \cdot L^4}{384 \cdot D} \quad \delta = 21.996 \text{ mm}$$

10) Flecha máxima admissível

$$\delta_{\text{máx}} := \frac{L}{250}$$

$$\delta_{\text{máx}} = 19.16 \text{ mm}$$

OBS: Deve-se diminuir o comprimento da laje. Ou seja, quem está governando é o ELS, não a carga construtiva. Será realizado portanto o cálculo inverso, acha-se primeiro o Lmax devido o ELS e verifica-se depois as cargas construtivas.

## 2a HIPÓTESE DE CÁLCULO

1) Comprimento Máximo em Função da Carga em Serviço

$$l_{\text{max}} := \left( \frac{384 \cdot D}{5 \cdot 250 \cdot C_{\text{tot}}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad l_{\text{max}} = 4.575 \text{ m}$$

2) Flecha em Função do Carregamento Construtivo

$$L := 4.644 \text{ m}$$

$$\delta := \frac{5 \cdot g \cdot L^4}{384 \cdot E_p \cdot 2 \cdot I_p} \quad \delta = 17.944 \text{ mm}$$

3) Flecha máxima admissível

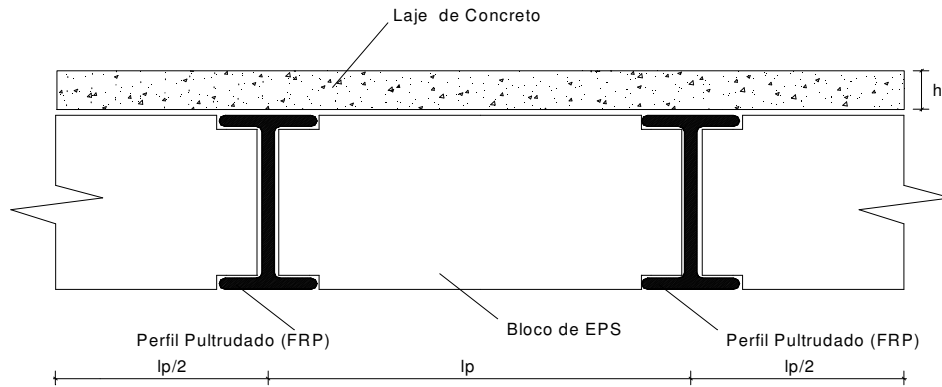
$$\delta_{\text{máx}} := \frac{L}{250}$$

$$\delta_{\text{máx}} = 18.576 \text{ mm}$$



# ANEXO F

## ANÁLISE TEÓRICA - ESTIMATIVA ELÁSTICA LAJE MISTA COM PERFIL H 10cm



$$\text{GPa} := 10^9 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad \text{MPa} := 10^6 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad \text{kN} := 1000 \cdot \text{N}$$

### 1) Propriedades e Dados do Concreto

$$f_{ck} := 56.279 \cdot \text{MPa}$$

$$E_{ci} := 5600 \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{MPa}^{\frac{1}{2}}$$

$$E_{ci} = 42.011 \cdot \text{GPa}$$

$$E_c := 0.85 \cdot E_{ci} \quad E_c = 35.709 \cdot \text{GPa}$$

$$\epsilon_c := 0.0030$$

$$l_p := 40 \cdot \text{cm}$$

$$b_c := 2 \cdot l_p \quad b_c = 0.8 \text{ m}$$

$$h_c := 4 \cdot \text{cm}$$

$$A_c := b_c \cdot h_c \quad A_c = 320 \cdot \text{cm}^2$$

2) Dados do perfil pultrudado (seção H)

$$d := 10.16 \cdot \text{cm}$$

$$bfs := 10.16 \cdot \text{cm}$$

$$tfs := 0.9525 \cdot \text{cm}$$

$$bfi := 10.16 \cdot \text{cm}$$

$$tfi := 0.9525 \cdot \text{cm}$$

$$tw := 0.9525 \cdot \text{cm}$$

$$dw := d - tfs - tfi \quad dw = 8.255 \cdot \text{cm}$$

$$Ap := (bfs \cdot tfs) + (bfi \cdot tfi) + (dw \cdot tw) \quad Ap = 27.218 \cdot \text{cm}^2$$

3) Módulo de Elasticidade Longitudinal do Perfil Pultrudado

$$E1 := 32.86 \cdot \text{GPa}$$

$$Gfrp := 2.67 \cdot \text{GPa}$$

4) Inércia do Perfil Pultrudado

$$yp := \frac{\left[ (bfi \cdot tfi) \cdot \frac{tfi}{2} \right] + \left[ (tw \cdot dw) \cdot \left( tfi + \frac{dw}{2} \right) \right] + \left[ (bfs \cdot tfs) \cdot \left( d - \frac{tfs}{2} \right) \right]}{(bfi \cdot tfi) + (tw \cdot dw) + (bfs \cdot tfs)}$$

$$yp = 5.08 \cdot \text{cm}$$

$$Ip := \left[ \left( \frac{bfi \cdot tfi^3}{12} \right) + (bfi \cdot tfi) \cdot \left( yp - \frac{tfi}{2} \right)^2 \right] + \left[ \left( \frac{bfs \cdot tfs^3}{12} \right) + (bfs \cdot tfs) \cdot \left( yp - d - \frac{tfs}{2} \right)^2 \right] + \left[ \left( \frac{tw \cdot dw^3}{12} \right) + (tw \cdot dw) \cdot \left( \frac{d}{2} - yp \right)^2 \right]$$

$$Ip = 549.982 \cdot \text{cm}^4$$

## 5) Posição da Linha Neutra

$$n := \frac{E_c}{E_1} \quad n = 1.087 \quad (\text{Homogenização da seção para material compósito})$$

$$y_c := d + \frac{h_c}{2} \quad y_c = 12.16 \text{ cm}$$

$$y := \frac{(n \cdot y_c \cdot h_c \cdot b_c) + (2 \cdot y_p \cdot A_p)}{n \cdot h_c \cdot b_c + 2 \cdot A_p}$$

$$y = 11.202 \text{ cm}$$

$$d_c := y_c - y \quad d_c = 0.958 \text{ cm}$$

$$I_c := \frac{n \cdot 2 \cdot I_p \cdot h_c^3}{12} \quad I_c = 463.662 \text{ cm}^4$$

$$d_p := y - y_p$$

$$d_p = 6.122 \text{ cm}$$

## 6) Momento de Inércia da Seção Transformada

$$I_{\text{seção}} := \left[ (I_c + n \cdot A_c \cdot d_c^2) + 2 \cdot (I_p + A_p \cdot d_p^2) \right]$$

$$I_{\text{seção}} = 3.923 \cdot 10^3 \text{ cm}^4$$

## 7) Rigidez à Flexão da Seção Transformada (D)

$$D := E_1 \cdot I_{\text{seção}} \quad D = 1.289 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

## 8) Rigidez ao Cisalhamento da Seção Transformada (Q)

$$Q := 2 \cdot G_{\text{frp}} \cdot d \cdot t_w \quad Q = 5.168 \cdot 10^6 \text{ N}$$

## 9) Cálculo do Fator de Forma da Seção Transformada

$$\text{Fator de forma: } f_s = \frac{A}{I^2} \int_A \frac{Q^2}{b^2} dA$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

$$Q_1 = \int y dA = \int_{-b/2}^{b/2} \int_{h_2}^{h_1} y dy dz = b_f \int_{h_2}^{h_1} y dy = b_f \left. \frac{y^2}{2} \right|_{h_2}^{h_1} = \frac{b_f}{2} (h_1^2 - h_2^2)$$

$$Q_2 = \int y dA = \int_{-b/2}^{b/2} \int_{h_3}^{h_2} y dy dz = b_w \int_{h_3}^{h_2} y dy = b_w \left. \frac{y^2}{2} \right|_{h_3}^{h_2} = \frac{b_w}{2} (h_2^2 - h_3^2)$$

$$Q_3 = \int y dA = \int_{-b/2}^{b/2} \int_{y_1}^{h_3} y_1 dy dz = b_f \int_{y_1}^{h_3} y_1 dy = b_f \left. \frac{y_1^2}{2} \right|_{y_1}^{h_3} = \frac{b_f}{2} (h_3^2 - y_1^2)$$

$$Q_4 = \int y dA = \int_{-b/2}^{b/2} \int_{y_2}^{h_4} y_2 dy dz = b_c \int_{y_2}^{h_4} y_2 dy = b_c \left. \frac{y_2^2}{2} \right|_{y_2}^{h_4} = \frac{b_c}{2} (h_4^2 - y_2^2)$$

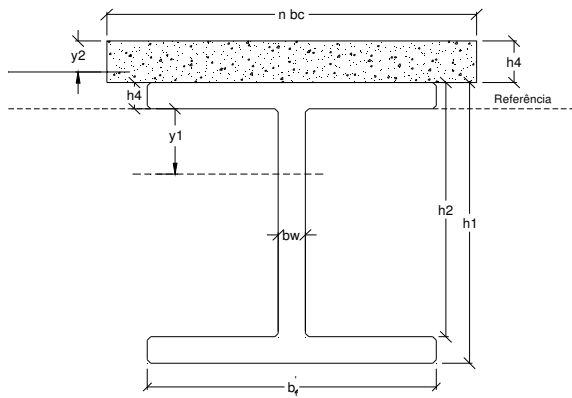
Logo:

$$Q = \frac{b_f}{2} (h_1^2 - h_2^2) + \frac{b_w}{2} (h_2^2 - h_3^2) + \frac{b_f}{2} (h_3^2 - y_1^2) + \frac{b_c}{2} (h_4^2 - y_2^2)$$

Como:  $y_2 = y_1 = 0$

$$Q = \frac{b_f}{2} (h_1^2 - h_2^2) + \frac{b_w}{2} (h_2^2 - h_3^2) + \frac{b_f}{2} (h_3^2) + \frac{b_c}{2} (h_4^2)$$

## Anexo F



$bc_{st} := n \cdot bc$        $bc_{st} = 0.869 \text{ m}$       (Largura da camada de concreto na seção transformada)

$bw_{st} := 2 \cdot tw$        $bw_{st} = 0.019 \text{ m}$       (Largura das almas dos perfis pultrudados)

$bf_{ist} := 2 \cdot bfi$        $bf_{ist} = 0.203 \text{ m}$       (Largura das mesas inferiores dos perfis pultrudados)

$bfs_{st} := 2 \cdot bfs$        $bfs_{st} = 0.203 \text{ m}$       (Largura das mesas superiores dos perfis pultrudados)

$h1 := d$

$h2 := d - tfi$

$h3 := tfs$

$y1 := 0$

$y2 := 0$

$h4 := hc$



Anexo F

$$Q1 := \left(\frac{bfist}{2}\right) \cdot (h1^2 - h2^2) \quad Q1 = 1.874 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$Q2 := \left(\frac{bwst}{2}\right) \cdot (h2^2 - h3^2) \quad Q2 = 7.989 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$Q3 := \left(\frac{bfsst}{2}\right) \cdot (h3^2) \quad Q3 = 9.218 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$Q4 := \left(\frac{bcst}{2}\right) \cdot (h4^2) \quad Q4 = 6.955 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$Ast := 2 \cdot Ap + Ac \cdot n \quad Ast = 402.182 \text{ cm}^2$$

$$R1 := \left(\frac{Q1}{bfist}\right)^2 \cdot (bfist \cdot tfi)$$

$$R2 := \left(\frac{Q2}{bwst}\right)^2 \cdot (bwst \cdot dw)$$

$$R3 := \left(\frac{Q3}{bfsst}\right)^2 \cdot (bfsst \cdot tfs)$$

$$R4 := \left(\frac{Q4}{bcst}\right)^2 \cdot (bcst \cdot hc)$$

$$Rtot := R1 + R2 + R3 + R4 \quad Rtot = 5.156 \cdot 10^{-8} \text{ m}^6$$

$$fs := \left(\frac{Ast}{Ise\c{c}{a}o^2}\right) \cdot Rtot \quad fs = 1.347$$

## 10) Cálculo da Flecha Máxima

$$P_{\text{tot}} := 20 \cdot \text{kN}$$

$$P := \frac{P_{\text{tot}}}{2} \quad P = 10 \cdot \text{kN}$$

$$L := 2.55 \cdot \text{m}$$

$$a := \frac{L}{3} \quad a = 0.85 \text{ m}$$

$$\delta f := \left( \frac{P \cdot a}{24 \cdot D} \right) \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2) \quad \delta f = 4.566 \cdot \text{mm}$$

$$\delta c := \left( \frac{P \cdot a}{Q} \right) \cdot f_s \quad \delta c = 2.216 \cdot \text{mm}$$

$$\delta_{\text{tot}} := \delta f + \delta c \quad \delta_{\text{tot}} = 6.782 \cdot \text{mm} \quad \delta_{\text{lim}} := \frac{L}{250} \quad \delta_{\text{lim}} = 10.2 \cdot \text{mm}$$

## 11) Cálculo das Deformações Específicas Máximas

$$y_{\text{maxc}} := (d + h_c) - y \quad y_{\text{maxc}} = 2.958 \cdot \text{cm}$$

$$M_{\text{max}} := P \cdot a \quad M_{\text{max}} = 8.5 \cdot 10^3 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \quad D = 1.289 \cdot 10^6 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2$$

$$\epsilon_c := \left( \frac{M_{\text{max}}}{D} \right) \cdot y_{\text{maxc}} \quad \epsilon_c = 1.951 \cdot 10^{-4} \quad y_{\text{maxc}} = 0.03 \text{ m}$$

$$\epsilon_t := \left( \frac{M_{\text{max}}}{D} \right) \cdot y \quad \epsilon_t = 7.386 \cdot 10^{-4} \quad y = 11.202 \cdot \text{cm}$$

### ANÁLISE TEÓRICA - RUPTURA DA LAJE MISTA

1) Verificação do carregamento à flexão

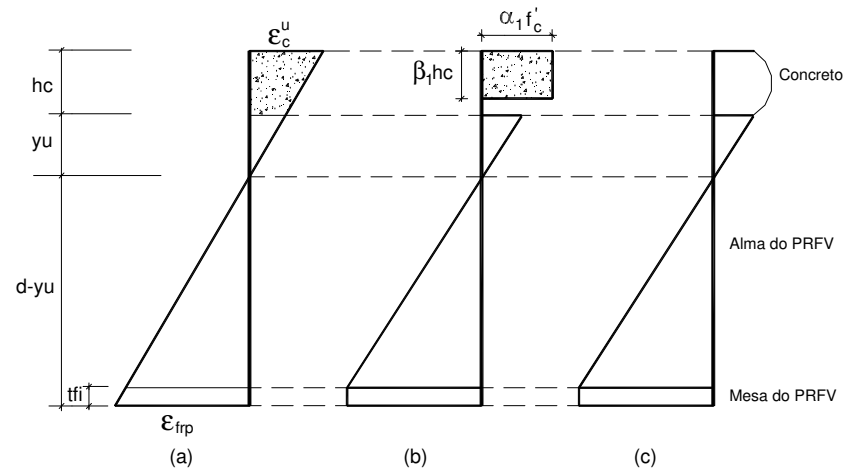
1.1) Posição da Linha Neutra (Ruptura à flexão)

$$\alpha_1 := 0.85$$

$$\beta_1 := 0.85$$

$$\epsilon_{cult} := 0.0030 \quad (\text{Deformação de ruptura do concreto})$$

$$\epsilon_{1ult} := 0.032 \quad (\text{Deformação de ruptura do PRFV})$$



$$y_u := \frac{(-2 \cdot \alpha_1 \cdot f_{ck} \cdot \beta_1 \cdot hc^2 \cdot l_p + E_1 \cdot t_w \cdot \epsilon_{cult} \cdot d^2 + E_1 \cdot t_w \cdot \epsilon_{cult} \cdot t_{fi}^2 - 2 \cdot E_1 \cdot t_w \cdot \epsilon_{cult} \cdot d \cdot t_{fi} + 2 \cdot E_1 \cdot t_{fi} \cdot b_{fi} \cdot \epsilon_{cult} \cdot d)}{(2 \cdot \alpha_1 \cdot f_{ck} \cdot \beta_1 \cdot hc \cdot l_p - 2 \cdot E_1 \cdot t_w \cdot \epsilon_{cult} \cdot t_{fi} + 2 \cdot E_1 \cdot t_w \cdot \epsilon_{cult} \cdot d + 2 \cdot E_1 \cdot t_{fi} \cdot b_{fi} \cdot \epsilon_{cult})}$$

$$y_u = -1.484 \text{ cm}$$

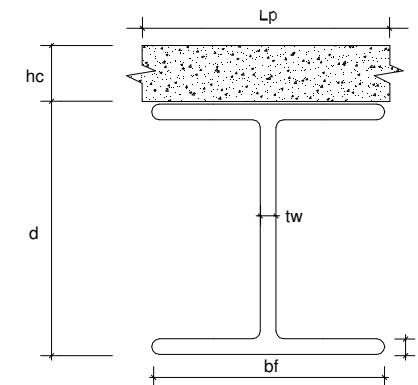
Sobre a condição de que a mesa inferior não apresenta ruptura ( $\epsilon_1 < \epsilon_{1ult}$ ), isto é,  $y_u$  deve ser maior que  $y_{u1}$ :

$$y_{u1} := \frac{(d \cdot \epsilon_{cult} - hc \cdot \epsilon_{1ult})}{(\epsilon_{cult} + \epsilon_{1ult})} \quad y_{u1} = -2.786 \text{ cm}$$

1.2) Resistência à flexão da laje mista

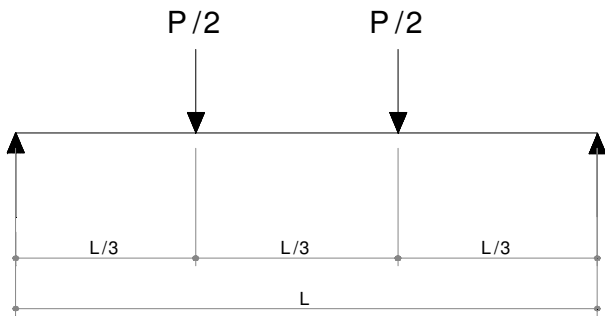
O momento que leva a peça à ruptura é dado por:

$$M_u := (2 \cdot \alpha_1 \cdot f_{ck} \cdot \beta_1 \cdot hc \cdot l_p) \cdot \left( d + hc - \frac{\beta_1 \cdot hc}{2} \right) + E_1 \cdot y_u^2 \cdot t_w \cdot \epsilon_{cult} \cdot \left[ \frac{\left( \frac{d - y_u}{3} \right)}{(hc + y_u)} \right] - E_1 \cdot t_w \cdot \epsilon_{cult} \cdot \left[ \frac{(d - y_u - t_{fi})^2}{(hc + y_u)} \right] \cdot \left[ \frac{(d - y_u + 2 \cdot t_{fi})}{3} \right] - E_1 \cdot t_{fi}^2 \cdot b_{fi} \cdot \epsilon_{cult} \cdot \frac{(d - y_u)}{(hc + y_u)}$$



$$M_u = 1.395 \cdot 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Adotando-se o seguinte esquema para o ensaio de flexão a quatro pontos da laje:



A carga de ruptura, em função dos esforços de flexão é:

$$P_{ult} := \frac{(6 \cdot M_u)}{L} \quad P_{ult} = 328.315 \text{ kN}$$

1.3) Tensão de cisalhamento na linha neutra da laje mista (capa de concreto)

1.3.1) Momento Estático

$$Q_{max} := \left[ \frac{((d + hc) - y)^2}{2} \right] \cdot (n \cdot bc)$$

$$Q_{max} = 380.409 \text{ cm}^3 \quad (\text{Na linha neutra da seção})$$

$$V := \frac{P_{ult}}{2} \quad (\text{Adotando a carga de ruptura de flexão para verificar a tensão de cisalhamento produzida})$$

$$\tau_{ult} := \frac{V \cdot Q_{max}}{I_{seção} \cdot n \cdot bc} \quad \tau_{ult} = 1.831 \text{ MPa}$$

#### 1.4) Tensão de cisalhamento na ligação mesa-alma

##### 1.4.1) Momento Estático

$$y1 := \frac{\left[ \left[ d - t_{fs} - \left( \frac{t_{fi}}{2} \right) \right] \cdot t_{fi} \cdot b_{fi} \right] + \left[ \left[ \frac{(d - (t_{fs} + t_{fi}))}{2} \right] \cdot t_w \cdot (d - (t_{fi} + t_{fs})) \right]}{(t_{fi} \cdot b_{fi}) + t_w \cdot (d - (t_{fi} + t_{fs}))}$$

$$y1 = 6.667 \text{ cm} \quad (\text{Altura da linha neutra, tomando-se como referência a ligação mesa-alma superior, com sentido para a face inferior do perfil})$$

$$Q_{ma} := (y1 + (y - d) + t_{fs}) \cdot 2 \cdot ((b_{fi} \cdot t_{fi}) + (t_w \cdot (d - (t_{fs} + t_{fi}))))$$

$$Q_{ma} = 303.858 \text{ cm}^3$$

$$\tau_{ult\_prfv} := 20.59 \text{ MPa} \quad (\text{Tensão de cisalhamento de ruptura do material PRFV, considerando-o unidirecional - Anexo B})$$

$$P_{ult\_mesa\_alma} := \frac{4 \cdot \tau_{ult\_prfv} \cdot I_{seção} \cdot t_w}{Q_{ma}}$$

$$P_{ult\_mesa\_alma} = 101.28 \text{ kN}$$

## 1.5) Tensão de cisalhamento na interface concreto-PRFV

## 1.5.1) Momento Estático

$$y2 := \frac{\left[ \left[ d - \left( \frac{t_{fi}}{2} \right) \right] \cdot t_{fi} \cdot b_{fi} \right] + \left[ \left[ t_{fs} + \frac{d - (t_{fs} + t_{fi})}{2} \right] \cdot t_w \cdot (d - (t_{fi} + t_{fs})) \right] + \left[ \left( \frac{t_{fs}}{2} \right) \cdot (t_{fs} \cdot b_{fs}) \right]}{(t_{fi} \cdot b_{fi}) + t_w \cdot (d - (t_{fi} + t_{fs})) + (t_{fs} \cdot b_{fs})}$$

$$y2 = 5.08 \text{ cm} \quad (\text{Altura da linha neutra, tomando-se como referência a interface concreto-PRF, com sentido para a face inferior do perfil})$$

$$Q_{c\_prf} := y2 \cdot (2 \cdot (b_{fi} \cdot t_{fi}) + (d_w \cdot t_w) + (b_{fs} \cdot t_{fs}))$$

$$Q_{c\_prf} = 276.532 \text{ cm}^3$$

$$\tau_{ult\_conc\_prfv} := 2.64 \cdot \text{MPa} \quad (\text{Tensão de aderência concreto/PRFV - Valor médio para o concreto de 30MPa, com resina Sikadur 31})$$

$$P_{ult\_conc\_prf} := \frac{4 \cdot \tau_{ult\_conc\_prfv} \cdot I_{seção} \cdot b_{fs}}{Q_{c\_prf}}$$

$$P_{ult\_conc\_prf} = 152.204 \text{ kN}$$