

LUÍS HENRIQUE SCHLICHTING

COMPÓSITO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO PRÉ-
TRACIONADA: INFLUÊNCIA DA PROTENSÃO NAS
PROPRIEDADES FLEXURAS.

Florianópolis
2007

LUÍS HENRIQUE SCHLICHTING

COMPÓSITO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO PRÉ-
TRACIONADA: INFLUÊNCIA DA PROTENSÃO NAS
PROPRIEDADES FLEXURAS.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Odontologia - Área de concentração: Dentística.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Amaral Caldeira de Andrada

Co-Orientador: Prof. Dr. Luiz Clóvis Cardoso Vieira

Florianópolis
2007

S344c Schlichting, Luís Henrique

Compósito reforçado com fibra de vidro pré-tracionada: influência da protensão nas propriedades flexurais / Luís Henrique Schlichting; orientador Mauro Amaral Caldeira de Andrada. - Florianópolis, 2007. 174 f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Ciências da Saúde. Programa de Pós-Graduação em Odontologia - Opção Dentística.

Inclui bibliografia.

1. Resinas compostas. 2. Resistência à tração. 3. Fibras de vidro. 4. Dentística operatória. I. Andrada, Mauro Amaral Caldeira de. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Odontologia. III. Título.

CDU 616.314-089

Catálogo na fonte por: Vera Ingrid Hobold Sovernigo CRB-14/009

Luís Henrique Schlichting

**COMPÓSITO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO
PRÉ-TRACIONADA: INFLUÊNCIA DA PROTENSÃO NAS
PROPRIEDADES FLEXURAS.**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de MESTRE EM ODONTOLOGIA – ÁREA DE CONCENTRAÇÃO DENTÍSTICA e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Odontologia.

Florianópolis, 9 de fevereiro de 2007.

Prof. Dr. Ricardo Vieira
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Odontologia

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mauro Amaral Caldeira de Andrada
Orientador

Prof. Dr. Guilherme Mariz de Oliveira Barra
Membro

Prof. Dr. Alfredo Meyer Filho
Membro

Prof. Dr. Luiz Clóvis Cardoso Vieira
Suplente

Ao meu maior Amigo,
SENHOR JESUS,
digno de toda honra e glória,
pela minha vida.

À minha amada KATHRYN,
esposa virtuosa e
co-autora deste trabalho.

Aos meus pais, NEORY e BEATRIZ,
sempre exemplos em minha vida.

Aos meus irmãos, também dentistas,
MARCELO e LUCIANE,
e à MAIRA, minha cunhada,
pelo apoio em todos os momentos.

Amo muito vocês!!!

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. DR. MAURO AMARAL CALDEIRA DE ANDRADA, pelos ensinamentos, conselhos, motivação, auxílio, exemplo de vivência clínica e incansável professor; minha estima, respeito e gratidão.

Ao Prof. DR. LUIZ CLÓVIS CARDOSO VIEIRA, meu co-orientador, pelo apoio e bom humor sempre contagiante.

Ao Prof. DR. LUIZ NARCISO BARATIERI, que acreditou neste trabalho desde o primeiro instante; pelo exemplo de professor e cirurgião-dentista; minha admiração e gratidão.

Ao Prof. DR. SYLVIO MONTEIRO JÚNIOR, pelo exemplo de docência e distinção e ainda pelos momentos de descontração.

Ao Prof. DR. ÉLITO ARAÚJO, pelas sugestões sempre pertinentes.

Ao Prof. DR. HAMILTON PIRES MAIA, pelos "rabiscos" no quadro do laboratório que originaram o dispositivo de protensão.

Ao Prof. DR. JOÃO ROBERTO SANFORD LINS, pelos ensinamentos, sensibilidade e agradáveis momentos durante o estágio de docência.

Aos Prof. DR. CÉSAR ANDRADE, pela convivência e conselhos durante o estágio de docência.

Ao Prof. DR. CLÉO NUNES DE SOUZA, pela experiência profissional e descontração durante o estágio de docência.

Ao Prof. DR. GUILHERME CARPENA LOPES, pelos conselhos e conhecimento compartilhado durante o curso.

Ao Prof. DR. GUILHERME MARIZ DE OLIVEIRA BARRA, do Departamento de Engenharia Mecânica, pela receptividade e auxílio inestimável no trabalho.

Ao Prof. DR. ALFREDO MEYER FILHO, pela participação na Banca Examinadora e pelas relevantes contribuições no trabalho.

Aos colegas de mestrado, FERNANDO, FLÁVIA, GUSTAVO, JUSSARA, KAZUZA, LEANDRO, LESSANDRO, MÔNICA e TIAGO, por tudo que vivemos juntos. Lutamos e conseguimos!

Aos colegas do doutorado, CLÁUDIA, FABIANO MARSON, FABIANO ARAÚJO, ISANA, LIZETTE, LUÍS, MARY, PAULA, RENATA, SAULO E SÉRGIO, pelos bons momentos.

A NEORY SCHLICHTING, pela confecção do dispositivo de protensão, da "pista fotográfica" que utilizamos para o livro e muito mais... Valeu meu grande Professor, Artesão, Amigo e Pai!!!

Ao Governador COLOMBO MACHADO SALLES, engenheiro civil, pela agradável conversa e pelo suporte bibliográfico em livros, e inúmeras fotos.

Ao Prof. DR. MÁRCIO CELSO FREDEL, do Departamento de Engenharia Mecânica, pela presteza e eficiência em ajudar sempre que necessário.

Ao DR. OLAVO ARANTES, engenheiro civil, pelo auxílio bibliográfico.

Ao eng civil UDO HARRY KIRST, pelo auxílio com material bibliográfico.

Ao Prof. DR. HAZIM ALI AL-QURESHI, do Departamento de Engenharia Mecânica, pela "aula" de mecânica.

Ao amigo LESSANDRO MACHRY, pela convivência durante a confecção do livro e dos casos clínicos. Um forte abraço "lageano"!

Ao amigo LEANDRO AUGUSTO HILGERT, que gentilmente fez a análise estatística.

Aos amigos de longa data LUÍS BOFF, EMERSON DUARTE, ROBERTO GARANHANI, MÁRIO HOMEM E UMBERTO PAZ, que me incentivaram a fazer este curso.

Aos Professores SUENE CALDEIRA DE SENA e IZO MILTON ZANI, que me ensinaram os primeiros passos na carreira docente. Sempre grato.

À doutoranda em Ciências e Engenharia de Materiais BETSY KILIAN MARTINS LUIZ, pela ajuda com os equipamentos do laboratório do Departamento de Química.

Aos Pós-graduandos AURÉLIO DA COSTA SABINO NETTO e FREDERIC DABBAS, do Departamento de Engenharia Mecânica, pelos confecção das plantas em CAD.

À Profa. LIENE CAMPOS, pelas sugestões e atenção especial na revisão do trabalho.

Ao fotógrafo GERALDO COELHO pelos ensinamentos, ajuda e dicas na documentação fotográfica do trabalho.

Aos alunos de graduação em Engenharia Mecânica HENRIQUE HIEBERT e CÍCERO BORBA WALENDOWSKY, do GRANTE, pela realização dos testes de compressão.

Ao Sr. JOAQUIM DUTRA COELHO, artífice mecânico, pela execução das garras e peças em inox do dispositivo de protensão.

A CHRISTIAN FOGAÇA pelo reparo do disco rígido do computador da máquina Instron.

Ao técnico da empresa Instron Ltda. LUCIANO F. VENCATO, pelo auxílio com o programa Instron Series IX.

À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, pela minha formação, desde os tempos de Colégio de Aplicação.

Aos professores MAURO AMARAL CALDEIRA DE ANDRADA e RICARDO DE SOUZA VIEIRA, coordenadores do Programa de Pós-Graduação em Odontologia, pela competência administrativa demonstrada.

A todos os PROFESSORES do Curso de Pós-Graduação em Odontologia pelo empenho em manter o padrão de excelência do Curso.

À ANA e demais funcionários da Coordenadoria de Pós-Graduação, pelo atendimento sempre eficiente.

Aos FUNCIONÁRIOS das clínicas pela cordialidade e presteza.

À Empresa ANGELUS, na pessoa da Dra. LYGIA MADI KRANZ, pela doação da fibra de vidro e do agente silano.

À Empresa DENTSPLY, representada por VANDERLEI MOREIRA DA SILVA, pela doação da resina Quixfil.

À empresa IVOCLAR-VIVADENT, através do Sr. HERBERT MENDES, pela doação das resinas Adoro e Vectris Glue.

Aos amigos e técnicos em prótese dentária JOSÉ LUIZ BATISTA e ARNO EGON, pelo apoio nos casos clínicos.

Aos funcionários das disciplinas de Dentística e Clínica Integrada, Dona LÉA, RICHARD e Dona THALITA, pela cordialidade e presteza em todas as horas.

Às Secretárias do consultório do Prof. Baratieri, ROSÂNGELA e TEREZINHA, pelo atendimento sempre alegre e eficiente.

Aos amigos SAULO FORTKAMP e CLÁUDIA ÂNGELA MAZIERO VOLPATO. Obrigado pela força!

Ao amigo e designer ROGÉRIO OTTO LOHMAN, pelos "toques e retoques" nas apresentações.

Aos artistas UGO RUBILAR e SOL JARA, pelos desenhos nas aberturas dos capítulos.

Ao graduando em Engenharia Mecânica HUMBERTO PAVANELLI, pela confecção do clipe.

Ao funcionário LAURO, do laboratório de pesquisa, pelo apoio durante a fase experimental.

“Agrada-te do Senhor,
e ele satisfará aos desejos do teu coração.
Entrega o teu caminho ao Senhor,
confia nele e o mais ele fará.”

Salmo 37:4-5

SCHLICHTING, Luís Henrique. **Compósito reforçado com fibra de vidro pré-tracionada:** influência da protensão nas propriedades flexurais. 2007. 174f. Dissertação (Mestrado em Odontologia – opção Dentística) – Programa de Pós-Graduação em Odontologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar a influência da protensão nas propriedades flexurais de duas resinas compostas, uma de uso direto (Quixfil) e outra de uso indireto (Adoro), reforçadas com fibra de vidro pré-tracionada. Foram realizados testes preliminares de resistência à compressão, para as resinas, e de aderência interfacial entre a fibra e as resinas (*pull-out*). Nos grupos experimentais, os espécimes foram reforçados com dois feixes de fibra, simetricamente posicionados próximo da base e do topo, pré-tracionados sob uma carga equivalente a 73,5% da resistência à tração (0,496KN). Nos grupos controle, os feixes foram posicionados exatamente como nos grupos experimentais, entretanto sem qualquer tração prévia. Adicionalmente, foram incluídos mais dois grupos, com as mesmas dimensões (2x2x25 mm), porém sem reforço de fibra. Após armazenagem de 24 h, os espécimes foram submetidos ao teste flexural de três pontos para determinar o módulo flexural, a deflexão correspondente à falha inicial e à resistência flexural. Os dados foram analisados pelo testes de análise de variância e Tukey HSD. Os resultados demonstraram que a protensão aumentou discretamente o módulo flexural da resina de uso indireto Adoro, enquanto para a resina de uso direto Quixfil não foram observadas alterações significativas. Os espécimes protendidos precisaram alcançar deflexões maiores do que os espécimes com reforço convencional para o início do processo de falha (um aumento de 33% para Quixfil e 58% para Adoro). A protensão também determinou incrementos significantes na resistência flexural dos espécimes (28,3% para Adoro e 33,5% para Quixfil).

Palavras-chave: Resinas compostas. Resistência à tração. Fibra de vidro. Protensão. Falha inicial.

SCHLICHTING, Luís Henrique. **Compósito reforçado com fibra de vidro pré-tracionada:** influência da protensão nas propriedades flexurais. 2007. 174f. Dissertação (Mestrado em Odontologia – opção Dentística) – Programa de Pós-Graduação em Odontologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate the influence of prestressing on the flexural properties of two composite resins, a direct composite resin (Quixfil) and an indirect composite resin (Adoro), reinforced with pre-tensioned fiber glass. It was accomplished a preliminary compressive strength test of composite resins and the interfacial adherence test among fiber glass and composite resins (pull-out). In the experimental groups, specimens were reinforced with two fiber bundles symmetrically positioned along the bottom and top, pre-tensioned under a load equivalent to 73.5% of tensile strength (0.496 kN). In the control groups, the bundles were positioned exactly as in the experimental groups, except with no previous stress. Additionally, two groups were included in this study with the same dimensions (2x2x25 mm), except with no fiber reinforcement. After 24h storage, specimens were subjected to a three point flexural bending test to establish the flexural module, the deflection regarding the initial failure and the flexural strength. Data were analyzed using ANOVA and Tukey HSD tests. The results showed that prestressing increased slightly the flexural module of indirect composite resin Adoro, while direct composite resin Quixfil didn't demonstrate significant changes. The prestressed specimens needed to reach greater deflection than specimens with conventional reinforcement for the beginning of failure process (an increase of 33% for Quixfil and 58% for Adoro). The prestressing also determined significant increments on the flexural strength of specimens (28.3% for Adoro and 33% for Quixfil).

Key-words: Composite resin. Tensile strength. Fiber glass. Prestressing. Initial failure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação para os vários tipos de compósitos	30
Figura 2 - Representações esquemáticas de compósitos reforçados.....	35
Figura 3 - Padrão de deformação na matriz ao redor de uma fibra	37
Figura 4a - Ensaio de <i>pull-out</i> de uma barra metálica de um bloco de concreto.....	53
Figura 4b - Distribuição da tensão de aderência	53
Figura 5 - Teste <i>pull-out</i>	55
Figura 6 - Comportamento flexural de uma viga com dois apoios livres.....	56
Figura 7 - a) Um esforço compressivo nas extremidades de uma peça	58
Figura 8 - Pré-compressão descentralizada.....	59
Figura 9 - <i>Roving</i> de fibra de vidro	72
Figura 10 - Filamentos em microscopia eletrônica de varredura	72
Figura 11 - Medição do diâmetro da fibra de vidro	146
Figura 12 - Conjunto de micrografias totalizando a contagem de 3468 filamentos	147
Figura 13 - Feixes de fibra de vidro dispostos em uma placa de Petri.....	75
Figura 14 - Pesagem dos feixes em balança de precisão.....	75
Figura 15 - Secagem da fibra de vidro em estufa à vácuo.....	76
Figura 16 - Garra em aço inoxidável	77
Figura 17 - Vista explodida em CAD.....	77
Figura 18 - Planta da garra para tração de fibras.....	150
Figura 19 - Fibra de vidro em teste de tração	78
Figura 20 - Cômputo de Quixfil e pistola aplicadora.....	80
Figura 21 - Resina de uso laboratorial Adoro.....	80
Figura 22 - Espécimes de Quixfil e matriz de aço inoxidável.....	81
Figura 23 - Espécimes de Adoro	81
Figura 24 - Corte da fibra de vidro com tesoura	83
Figura 25 - Fibra cortada com filamentos estabilizados com uma etiqueta adesiva.....	83

Figura 26 – Demarcação do feixe com o auxílio de um estereoscópio	83
Figura 27 – Delimitação do segmento a ser embebido	84
Figura 28 – Impregnação com resina composta de baixa viscosidade	84
Figura 29 – Matriz em Teflon®	84
Figuras 30 e 31 – Preenchimento da matriz com resina composta	84
Figura 32 – Acomodação da resina com espátula	84
Figura 33 – Fibra inserida na resina composta	85
Figura 34 – Fotoativação	85
Figura 35 – Fotoativação final	85
Figura 36 – Espécime pronto	86
Figura 37 – Espécime pronto em detalhe	86
Figura 38 – Dispositivo retentor afixado na base da máquina de testes universal	86
Figura 39 – Teste de <i>pull-out</i>	87
Figura 40 – Espécime após teste	87
Figura 41 – Demarcação com grafite	90
Figura 42 – Medição do alongamento com paquímetro	90
Figura 43 – Fibras dispostas sobre uma mesa	91
Figura 44 – Delimitação do segmento útil	91
Figura 45 – Silanização por gotejamento	91
Figura 46 – Remoção dos excessos de silano com papel absorvente	91
Figura 47 – Secagem das fibras com ar aquecido	91
Figuras 48 e 49 – Recipiente para impregnação da fibra por imersão	92
Figura 50 – Acondicionamento da fibra com auxílio de uma espátula	92
Figura 51 – Feixes impregnados	92
Figura 52 – Dispositivo de protensão	93
Figura 53 – Planta do dispositivo para pré-tracionamento	158
Figura 54 – Remoção dos excessos	94
Figura 55 – Inserção dos feixes	94
Figura 56 – Enrolamento nos carretéis	94

Figura 57 – Feixes de fibra aprisionados pela garra	94
Figura 58 – Detalhe do feixe de fibra de vidro sobre a roldana	95
Figura 59 – Colocação de anilhas de ferro empilhadas em suporte	95
Figura 60 – Feixes montados no dispositivo	95
Figura 61 – Detalhe da separação de 1 mm promovida pelo alfinete	95
Figura 62 – Remoção do excedente de resina composta de baixa viscosidade.....	96
Figura 63 – Feixes desalinhados	96
Figura 64 – Alinhamento dos feixes.....	96
Figura 65 – Fixação do cavalete com porca borboleta.....	96
Figura 66 – Inserção da resina Quixfil	97
Figura 67 – Adaptação da resina aos feixes.....	97
Figura 68 – Acomodação da resina com espátula	98
Figura 69 – Pré-tracionamento da fibra com carga de 50,65 Kg	98
Figura 70 – Tira de poliéster sobre a resina em nítido excesso.....	98
Figura 71 – Colocação de uma lâmina de vidro	98
Figura 72 – Fixação da lâmina com prendedores de papel.....	99
Figura 73 – Fotopolimerizador Optilux 501.....	99
Figura 74 – Fotoativação inicial	99
Figura 75 – Fotoativação em intervalos de 5mm.....	100
Figura 76 – Fotoativação reversa.....	100
Figura 77 – Protensão do espécime: remoção das anilhas.....	101
Figura 78 – Protensão do espécime: remoção da última anilha.....	101
Figura 79 – Marcas no espécime antes da transferência da carga.....	101
Figura 80 – Espécime protendido.....	101
Figura 81 – Espécime removido do dispositivo.....	101
Figura 82 – Unidade Targis Power Upgrade	102
Figura 83 – Vista da polimerização dos espécimes através da escotilha	102
Figura 84 – Corte com disco diamantado ultrafino.....	104
Figura 85 – Desbaste com disco flexível Sof-Lex.....	104

Figura 86 – Lixa d'água 1200	104
Figura 87 – Remoção das rebarbas	104
Figura 88 – Medição com paquímetro	105
Figura 89 – Medição em detalhe	105
Figura 90 – Dispositivo para lixar o topo do espécime	105
Figura 91 – Acabamento com lixa 1200	105
Figura 92 – Espécimes após acabamento.....	105
Figura 93 – Vista em detalhe dos espécimes	105
Figura 94 – Dimensões em milímetros.....	106
Figura 95 – Máquina de testes universal Instron 444.....	107
Figura 96 – Detalhe da célula de carga – capacidade de 2 KN.....	107
Figura 97 – Teste flexural	108
Figura 98 – Falha inicial confirmada pela trinca	109
Figura 99 – Fotografia do painel da máquina de testes	110
Figura 100 – Valores "Força" e "Deflexão"	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição das fibras de vidro (em peso %)	42
Tabela 2 – Propriedades das fibras de vidro	44
Tabela 3 – Mensurações e média do diâmetro do filamento de fibra de vidro	146
Tabela 4 – Pesagem de 10 cm lineares de fibra de vidro (em g)	149
Tabela 5- Mensurações, média da carga e resistência à tração do feixe de fibra	154
Tabela 6- Módulo de elasticidade (MPa) da fibra de vidro	154
Tabela 7 - Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos compósitos	155
Tabela 8 - Aderência interfacial entre fibra de vidro e a resina Adoro	156
Tabela 9 - Aderência interfacial entre fibra de vidro e a resina Quixfil	157
Tabela 10 - Pesagem das anilhas, suporte e garra em Kg	162
Tabela 11 – Resultados do teste piloto para a resina Adoro Convencional	163
Tabela 12 – Resultados do teste piloto para a resina Adoro Protendida	163
Tabela 13 – Resultados do teste piloto para a resina Quixfil Convencional	164
Tabela 14 – Resultados do teste piloto para a resina Quixfil Protendida	164
Tabela 15 – Resultados para a resina Adoro sem fibra (G1)	165
Tabela 16 – Resultados para a resina Adoro Convencional (G2)	166
Tabela 17 – Resultados para a resina Adoro Protendida (G3)	167
Tabela 18 – Estatística descritiva do módulo flexural (MPa) para a resina Adoro	115
Tabela 19 – Teste <i>post hoc</i> de Tukey HSD	116
Tabela 20 – Estatística descritiva da falha inicial (mm) para a resina Adoro	117
Tabela 21 – Teste <i>post hoc</i> de Tukey HSD	117
Tabela 22 – Estatística descritiva da resistência flexural (MPa) para a resina Adoro	118
Tabela 23 – Teste <i>post hoc</i> de Tukey HSD	119
Tabela 24 - Coeficiente de correlação de Pearson (r)	120
Tabela 25 - Coeficiente de determinação (r^2)	120
Tabela 26 – Resultados para a resina Quixfil sem fibra (G4)	168

Tabela 27 – Resultados para a resina Quixfil convencional (G5).....	169
Tabela 28 – Resultados para a resina Quixfil protendida (G6).....	170
Tabela 29 – Estatística descritiva do módulo flexural (MPa) para a resina Quixfil	122
Tabela 30 – Teste <i>post hoc</i> de Tukey HSD	122
Tabela 31 – Estatística descritiva da falha inicial (mm) para a resina Quixfil.....	123
Tabela 32 – Teste <i>post hoc</i> de Tukey HSD	124
Tabela 33 – Estatística descritiva da resistência flexural (MPa) para a resina Quixfil	124
Tabela 34 – Teste <i>post hoc</i> de Tukey HSD	125
Tabela 35 - Coeficiente de correlação de Pearson (r).....	126
Tabela 36 - Coeficiente de determinação (r^2)	126
Tabela 37 – Médias (Desvios-padrão) para o grupo Adoro.....	128
Tabela 38 – Médias (Desvios-padrão) para o grupo Quixfil.....	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

% - por cento

cm - centímetro

cm³ - centímetro cúbico

d - diâmetro

E - módulo

FRP - polímero reforçado por fibra

g - grama

G1 - Adoro

G2 - Adoro convencional

G3 - Adoro protendida

G4 - Quixfil

G5 - Quixfil convencional

G6 - Quixfil protendida

GPa - gigapascal

° - graus

°C - grau Celsius

h - hora

Hg - mercúrio

Kg - quilograma

Km - quilômetro

KN - quilonewton

l - comprimento

MEV - microscopia eletrônica de varredura

mg - miligrama

min - minuto

µm - micrometro

mm – milímetro

mw- miliwatt

MO – mesiooclusal

MOD – mesioclusodistal

N - newton

OD – ocluso distal

s - segundo

TEX – densidade linear

σ – tensão de engenharia

ϵ – deformação de engenharia

π – constante pi (3,14)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	24
2 REVISÃO DA LITERATURA	28
2.1 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS	28
2.1.1 A fase matriz	32
2.1.2 A fase fibra	33
2.1.3 Orientação e concentração da fibra	34
2.1.4 Comprimento da fibra	36
2.1.5 Impregnação	38
2.1.6 Comportamento tensão-deformação de um compósito com fibras contínuas	39
2.1.7 Fibra de vidro	41
2.1.8 Significância clínica do reforço com fibras	45
2.2 MEDIÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO ENTRE MATRIZ-FIBRA POR ARRANCAMENTO (TESTE PULL-OUT)	52
2.3 ANALOGIA DAS RESINAS REFORÇADAS COM FIBRA AO CONCRETO ARMADO	56
2.4 PROTENSÃO	57
3 PROPOSIÇÃO	67
4 MATERIAL E MÉTODOS	69
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS	69
4.2 DISPOSITIVOS, EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS.....	69
4.3 MÉTODO	71
4.3.1 Determinação das propriedades físicas da fibra de vidro	72
4.3.2 Determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade dos compósitos	80
4.3.3 Determinação da tensão de cisalhamento entre matriz-fibra por ensaio de arrancamento (<i>pull-out</i>)	82

4.3.4 Determinação da força de tração dos feixes de fibra de vidro	88
4.3.5 Determinação do alongamento do feixe de fibra de vidro	89
4.3.6 Construção dos espécimes para os testes flexurais	90
4.3.7 Pesagem dos espécimes	107
4.3.8 Teste flexural	107
4.3.9 Análise estatística dos dados do teste flexural	110
4.3.10 Síntese do experimento	112
5 RESULTADOS	115
5.1 PARA A RESINA DE USO LABORATORIAL ADORO	115
5.1.1 Módulo Flexural	115
5.1.2 Falha inicial	117
5.1.3 Resistência Flexural	118
5.1.4 Interações entre as propriedades flexurais observadas	119
5.2 PARA A RESINA DE USO DIRETO QUIXFIL	122
5.2.1 Módulo Flexural	122
5.2.2 Falha inicial	123
5.2.3 Resistência Flexural	124
5.2.4 Interações entre as propriedades flexurais observadas	126
5.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS	128
5.3.1 Síntese dos resultados descritivos	128
5.3.2 Síntese dos resultados da análise estatística	129
6 DISCUSSÃO	131
7 CONCLUSÕES	140
REFERÊNCIAS	142
APÊNDICES A - X	146

Introdução

1 INTRODUÇÃO

Muitos dos recursos tecnológicos atuais exigem dos materiais combinações de propriedades que seriam impossíveis de serem cumpridas pelas ligas metálicas, cerâmicas e polímeros convencionais isoladamente. A engenharia aeronáutica, por exemplo, cada vez mais procura por materiais estruturais que apresentem baixas densidades, sejam fortes, rígidos, resistentes à abrasão e ainda ao impacto. Uma combinação, no mínimo, formidável. Nos materiais compósitos, uma junção multifásica de dois ou mais distintos materiais, acontece o princípio da ação combinada, onde se busca a melhor combinação possível das propriedades de cada fase (CALLISTER JR, 2002). Uma de suas características significantes é a elevadíssima resistência, rigidez, ou ambas, relativa ao peso, podendo ser utilizados em aplicações estruturais de alto rendimento (REINHART, 1998). Tecnicamente, os compósitos que mais se encaixam nesse modelo são os reforçados com fibras.

Na Odontologia, os compósitos reforçados com fibra já são utilizados há quase 40 anos. Mais recentemente, a partir dos anos 90, diversos esforços tecnológicos viabilizaram a utilização de estruturas reforçadas com fibras em próteses sobre-implantes, próteses fixas convencionais, esplintagem periodontal e pinos endodônticos (FREILICH et al., 2000).

As resinas compostas híbridas utilizadas na clínica odontológica, podem ser comparadas ao concreto utilizado na engenharia civil sob diversos aspectos. O concreto é formado por partículas grandes (brita) e pequenas (areia), aglutinadas por um aglomerante (cimento e água) (RUSCH, 1980). O concreto simples resiste bem às tensões de compressão, e mal às de tração na proporção aproximada de 10 para 1. Para sanar tal inconveniente, colocam-se armaduras de aço, seguindo a direção das forças internas de tração, resultando o concreto armado. (RUSCHEL, 1974). De forma muito

similar, as resinas são constituídas de uma fase matriz, usualmente uma resina dimetacrilato, e uma fase dispersa, representada pela carga inorgânica (vidro, quartzo e sílica). As resinas compostas também resistem bem mais aos esforços compressivos do que aos de tração na proporção aproximada de 8 para 1 (O'BRIEN, 1997). De maneira análoga ao concreto armado, fibras estrategicamente posicionadas conferem ao conjunto a resistência adequada aos esforços de tração.

Uma viga qualquer, ao ser flexionada, experimentará simultaneamente esforços compressivos na sua parte superior e de tração na sua parte inferior (BAUD, 1970). Sendo o concreto um material de propriedades tão diferentes à compressão e à tração, a engenharia desenvolveu o artifício da protensão. Um estado prévio de tensões compressivas é introduzido numa estrutura a fim de melhorar sua resistência ou seu comportamento, sob ação de diversas solicitações, originando o concreto protendido. A protensão desloca a faixa de trabalho do concreto para o âmbito das compressões, onde o material é mais eficiente (PFEIL, 1991).

Basicamente, há duas técnicas de protensão. Na primeira, denominada de pré-tracionamento, cabos de aço com alta resistência são posicionados dentro dos moldes vazios, sendo alongados com elevada força de tração e mantidos neste estado. O concreto é então vertido no molde e após sua cura, a tração dos cabos é liberada. A recuperação dimensional dos cabos colocará a estrutura em estado compressivo, já que a transferência da tensão será dada pela aderência entre cabo e concreto. Na outra técnica, a tensão é aplicada somente após o endurecimento do concreto. Daí ser denominada de pós-tracionamento. Tubos metálicos ou emborrachados já estão posicionados no interior da estrutura quando do vazamento do concreto. Após a cura do concreto ter atingido um determinado ponto, os cabos no interior dos tubos são tracionados por meio de macacos hidráulicos apoiados nas cabeceiras da estrutura (CALLISTER JR, 2002).

“Não lute com as forças; use-as.” As palavras do engenheiro e arquiteto R. Buckminster Fuller incitam a desvendar o complexo mecanismo da mecânica das forças e suas interações no universo material (GLANZ,1997). Aproveitando a base conceitual relativa a protensão de estruturas e conhecendo as propriedades das resinas e fibras utilizadas, o propósito deste trabalho foi analisar a influência da protensão, pelo método do pré-tracionamento, nas propriedades flexurais de dois tipos de resina composta reforçadas com fibra de vidro.

Revisão da Literatura

2 REVISÃO DA LITERATURA¹

2.1 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

As fibras são materiais de uso relativamente recente em Odontologia. O sucesso alcançado em diversas áreas da indústria motivou a implementação de seu uso na clínica diária, abrangendo praticamente todas as áreas, especialmente a Prótese e a Dentística. Os primeiros empreendimentos, utilizando reforço com fibras na clínica odontológica, remontam ao início da década de 60, quando pesquisadores procuraram reforçar dentaduras com fibras de carbono e fibras de vidro. Nos anos 80 foram realizados esforços similares, tornando possível a construção de estruturas reforçadas com fibras utilizadas em próteses sobreimplantes, próteses fixas convencionais, ortodontia e esplintagem periodontal. Nessa época, a maioria dos procedimentos propostos envolvia a manipulação das fibras, de forma intuitiva, e não raro, a dificuldade de manuseio contribuía para danos e contaminação das fibras. Embora a adição de fibras melhorasse as propriedades mecânicas, o grau de incremento estava muito abaixo daquele observado em outras aplicações comerciais. No final dos anos 80, a comunidade científica reconheceu a importância da efetiva união e impregnação entre a trama de fibras e a matriz resinosa, e métodos apropriados para dentistas foram desenvolvidos (FREILICH et al., 2000).

Shuman (2000) ressaltou que a idéia de se usar fibras como material de reforço é antiga; uma das referências registra essa prática encontra-se no livro de Gênesis, da Bíblia Sagrada, onde os israelitas utilizavam a palha para reforçar seus tijolos. Isso há quatro mil anos.

¹ Baseada na NBR 10520: 2002 da ABNT.

O autor organizou as características desejáveis de uma resina composta reforçada por fibras (QUADRO 1):

Durabilidade	As fibras deveriam ser capazes de suportar uma carga significativa com mínima distorção elástica.
Resistência	Uma grande quantidade de energia deveria ser requerida para quebrar a fibra.
Absorção de água	A fibra deveria absorver uma mínima quantidade de água.
Propriedades ópticas	Com os materiais estéticos, a fibra deveria se tornar camuflada dentro da resina composta.
Biocompatibilidade	A fibra deve ser biocompatível para evitar injúrias tóxicas e apresentar um estado físico tal que evite uma resposta biológica à irritação física.
Adesividade/União	A fibra deveria se unir quimicamente à resina, para que seja minimizado o efeito de deslizamento, induzido pela ruptura ou descolamento entre a fibra e o frágil material resinoso.
Adaptação/Conformação	A fibra deveria adaptar-se e permanecer adaptada à geometria subjacente ou à configuração dos dentes e arco dental.
Configuração das fibras	A configuração das fibras deveria ser de tal modo que a forma fabricada resultante seja fácil de usar e realize bem a função.
Maneabilidade	A maneabilidade determina a facilidade de uso que o dentista encontrará na colocação do material.
Modo de falha	O modo de falha deveria ser tal que, se e quando a fibra falhar, a chance de injúria ao paciente deveria ser insignificante

Quadro 1 - Características de uma resina dental reforçada por fibras
Fonte: Shuman, 2000

A moderna tecnologia exige dos materiais combinações incomuns de propriedades que não poderiam ser atendidas isoladamente pelas ligas metálicas, cerâmicas ou materiais poliméricos convencionais. Isso é bastante evidente quanto às aplicações aeroespaciais, subaquáticas e de transporte. A indústria aeronáutica, por exemplo, está investindo cada vez mais em materiais que possuam baixa densidade, sejam fortes, rígidos, resistentes à corrosão e apresentem resistência ao impacto e à abrasão. Segundo Callister Jr (2002), um material compósito compreende qualquer material multifásico que exiba uma proporção considerável das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal forma que seja alcançada uma melhor combinação das propriedades, o que também é chamado de "princípio de ação combinada". A própria natureza exibe uma variedade de compósitos. A madeira, por exemplo, é constituída por

fibras de celulose resistentes e flexíveis, envoltas e mantidas unidas por um material mais rígido chamado lignina. Os ossos também são um compósito onde uma proteína forte, porém mole, conhecida por colágeno, está associada a um mineral duro e frágil - a apatita. O projeto de materiais compósitos exige muitos esforços dos engenheiros e cientistas, onde a combinação de vários metais, cerâmicas e polímeros produz uma nova geração de materiais com características extraordinárias. Do ponto de vista tecnológico, os compósitos mais importantes são aqueles em que a fase dispersa encontra-se sob a forma de uma fibra. O principal objetivo de projeto dos compósitos reforçados com fibra é alcançar elevadas resistências em relação ao seu peso. Tal característica é expressa através dos parâmetros resistência específica e módulo específico, os quais correspondem, respectivamente, às razões da resistência à tração e ao módulo de elasticidade em relação à densidade relativa. A FIG. 1 apresenta de forma simples um esquema da classificação dos materiais compósitos. Esse esquema é encabeçado por três grandes grupos: os compósitos reforçados com partículas, os compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais.

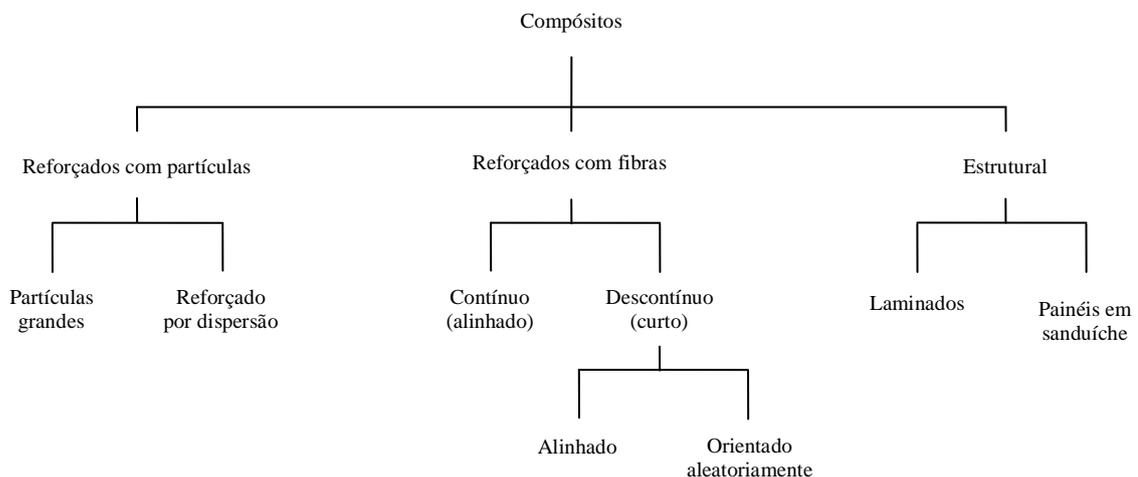


Figura 1 – Classificação para os vários tipos de compósitos
 Fonte: Adaptado de Callister Jr., 2002

O sucesso da técnica dos compósitos reforçados com fibras mudou o paradigma da Odontologia Restauradora. A utilização da combinação resinas compostas/fibras só tem aumentado nos últimos anos. Há uma variedade de tipos e arquiteturas de fibras

disponíveis para uso clínico e laboratorial. As fibras mais utilizadas são as de kevlar, carbono, vidro e polietileno de alto peso molecular. Ellakwa; Shortall; Marquis (2002), listaram algumas características de cada uma delas. O polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE) tem uma densidade aproximada de $0,97 \text{ g/cm}^3$, o que lhe confere propriedades como excelente resistência à abrasão, excelente resistência ao impacto e um baixo coeficiente de atrito. Quimicamente, o vidro é um material amorfo, basicamente constituído por sílica tetraedra, aleatoriamente agregada. Suas fibras fundem a $850 \text{ }^\circ\text{C}$, entretanto, $250 \text{ }^\circ\text{C}$ já são suficientes para iniciar uma queda abrupta nas propriedades mecânicas, como o módulo de elasticidade e a resistência. As fibras de Kevlar 49 são muito mais sensíveis, termicamente, que as fibras de vidro e de carbono, e também sofrem uma severa fotodegradação quando expostas à luz. Possuem um comportamento dúctil na proximidade da zona de fratura, quando comparadas às fibras de vidro e carbono que são bem mais friáveis. Por serem extremamente anisotrópicas, as fibras de Kevlar resistem à compressão apenas 20% do que suportam as cargas de tração. Nem por isso, deixam de ser utilizadas no reforço de compósitos na Odontologia. O reforço de polímeros por fibras tem como condição *sine qua non* uma ótima adesão entre as fibras e a matriz polimérica. Fibras não tratadas agem na matriz como corpos estranhos e ao invés de reforçar, podem até enfraquecer a resina. A opção pela utilização de carga nos agentes de impregnação das fibras melhora a radiopacidade e teoricamente diminui a contração de polimerização.

Segundo Dyer et al. (2004), materiais compósitos são uma combinação de dois ou mais componentes distintos, formando um novo material com propriedades aperfeiçoadas. A maioria dos compósitos utilizados na engenharia são compostos de fibras resistentes, envoltas por uma matriz, geralmente um polímero. Nos últimos 30 anos, a Odontologia permitiu a utilização das fibras em inúmeras modalidades de tratamento. Vários estudos testaram e recomendaram a utilização de fibras de polietileno, grafite, carbono e vidro em várias especialidades, dentre elas: prótese, periodontia e ortodontia. Estes estudos também listaram fatores fortemente ligados às

propriedades mecânicas das resinas reforçadas com fibras: 1) propriedades materiais inerentes a fibras e às matrizes poliméricas; 2) tratamento superficial e impregnação das fibras com resina; 3) adesão das fibras à matriz polimérica 4) quantidade de fibras; 5) direção das fibras; 6) posição das fibras; e 7) sorção de água da matriz polimérica.

2.1.1 A fase matriz

Segundo Callister Jr (2002), a fase matriz serve para diversas funções. Em primeiro lugar, ela une as fibras umas às outras e transmite e distribui as tensões que são aplicadas externamente para as fibras. Apenas uma porção pequena da carga aplicada é de fato suportada pela matriz. Consequentemente, o módulo de elasticidade da fibra é muito superior ao apresentado pela matriz. A segunda função da matriz é proteger as fibras de danos superficiais causados pela abrasão mecânica ou por agentes químicos. Por fim, a matriz mantém as fibras separadas umas das outras, e pela sua moleza e plasticidade, evita a propagação de trincas frágeis de uma fibra para outra, o que poderia desencadear propagação de trincas e possíveis falhas catastróficas.

2.1.1.1 Processo de polimerização das resinas compostas após a fotoativação

Leung; Fan; Johnston (1983) avaliaram o grau de conversão de uma resina fotopolimerizável, através de um mecanismo de avaliação indireto (teste de microdureza). As variáveis incluíram variação no tempo de fotoativação (15, 20, 40 e 60 s) e a dureza alcançada após 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 min, 1 dia e 1 semana pós-fotoativação. Os resultados mostraram que as diferenças de dureza entre os espécimes fotoativados por 40 s e 60 s foi relativamente menor que as diferenças entre aqueles

fotoativados por 20 e 40 s. Os autores concluíram que os efeitos do aumento do tempo de fotoativação, recomendado pelo fabricante, são menores que os efeitos de uma subexposição. O trabalho também mostrou que nos primeiros 10 a 20 min seguintes ao término da fotoativação ocorreram os maiores incrementos nos valores de dureza.

Stansbury (2000) revisou o mecanismo completo da cura dos compósitos através da fotopolimerização. O autor ressaltou que o maior potencial de conversão para uma resina composta qualquer acontece nos primeiros minutos após sua fotoativação. E que o processo pós-cura é intensamente acelerado pela aplicação de calor, que aumenta a mobilidade dentro da malha polimérica, facilitando que monômeros livres encontrem radicais disponíveis para o acoplamento.

Uctasli et al. (2005) avaliaram o grau de conversão através de Espectroscopia por Transformada de Fourier de diversas resinas reforçadas com fibra. Para o compósito reforçado por fibra de vidro Stick (StickTeckLtd, Turku, Finland) e polimerizado por 40 s com uma unidade de luz halógena (Optilux 501, Kerr, EUA), o grau de conversão imediatamente após a fotoativação foi de 65%. Aos 10 min alcançou 71% e aos 15 min 71,9%.

2.1.2 A fase fibra

Uma característica peculiar de grande parte dos materiais, especialmente os frágeis, é que uma fibra com um diâmetro micrométrico é muito mais forte e resistente que o mesmo material bruto com dimensões maiores. A probabilidade de haver defeitos críticos de superfície capazes de deflagrar uma fratura diminui com a redução no volume da amostra. Essa vantagem é muito bem aproveitada nos compósitos reforçados com fibra (CALLISTER JR, 2002).

2.1.3 Orientação e concentração da fibra

Shahawy e Beitelman (1996a) assinalaram que as fibras, em concentrações entre 40% e 70% em volume, são os principais elementos de suporte de carga. A matriz polimérica, por outro lado, atua como um meio de transferência de carga e protege as fibras de danos ambientais.

Reinhart (1998) salientou que o aumento do volume da fração fibra resulta em incrementos nas propriedades mecânicas até um determinado nível a partir do qual há insuficiente matriz para suportar as fibras e transferir a carga dentro do compósito.

Para Vallittu (1999a), as propriedades mecânicas das resinas com fibras são diretamente dependentes da direção das fibras na matriz polimérica. Fibras unidirecionais conferem elevada resistência e rigidez ao compósito, porém em apenas uma direção, que coincide com a orientação das fibras. Dessa forma, o efeito de reforço das fibras unidirecionais é chamado de anisotrópico, em contraste com as fibras entrelaçadas que reforçam o polímero em duas direções, descrevendo um efeito ortotrópico. Por sua vez, se as fibras estão orientadas de forma aleatória, como em um emaranhado de fibras, as propriedades mecânicas são similares em todas as direções, conferindo ao sistema um comportamento mecânico isotrópico. Exemplificando: o fator Krenchel, que mede a eficiência teórica do reforço, é um para as fibras unidirecionais e a metade para as fibras entrelaçadas.

Giordano (2000) apontou o baixo conteúdo de fibras e a pobre adesão entre as fibras e a matriz, como as principais causas das falhas dos compósitos reforçados com fibras nas aplicações dentárias. Concentrações de fibra da ordem de 40% a 70% em volume são bastante adequadas.

Stoll; Saliba; Casper (2000) testaram a utilização de polímeros reforçados com fibras pretensionadas em vigas de concreto. A proporção fibra/matriz utilizada variou de 65% a 70% em volume.

Segundo Felipe et al. (2001) o volume de fibras influencia diretamente na resistência de uma estrutura. Nos sistemas pré-impregnados, como o Vectris (Ivoclar) e Fibrekor (Jeneric/Pentron), o cálculo volumétrico mostrou uma relação ideal em torno de 45% de fibra na estrutura. Nos outros sistemas, onde a incorporação fica à cargo do profissional de laboratório, ou do próprio dentista, o volume correto ainda permanece uma incógnita. Assim, a regra de se incorporar o máximo de fibra possível, pode criar um risco de um molhamento inadequado por parte da matriz resinosa, resultando em menor resistência.

O arranjo ou orientação das fibras, sua concentração e sua distribuição influencia de forma significativa as propriedades dos compósitos por elas reforçados. (FIG. 2) (CALLISTER JR, 2002).

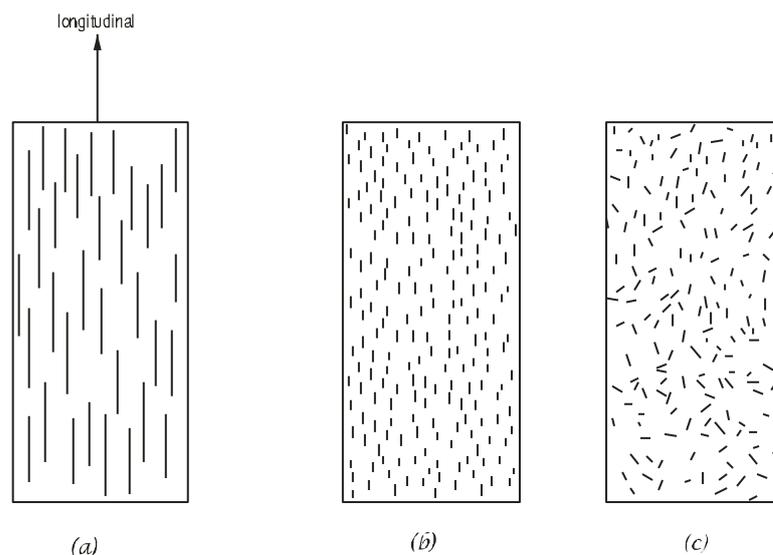


Figura 2 - Representações esquemáticas de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, e (c) descontínuas e aleatoriamente orientadas
Fonte: Adaptado de Callister Jr, 2002

2.1.4 Comprimento da fibra

Segundo Callister Jr (2002), as propriedades mecânicas de um compósito reforçado com fibras não dependem somente das propriedades da fibra, mas também da magnitude pela qual as cargas aplicadas são transmitidas às fibras pela matriz circundante. A ligação interfacial entre as fases fibra e matriz é fundamental para essa transmissão de carga. A FIG. 3 mostra o padrão de deformação que ocorre na matriz ao redor de uma fibra tensionada e que cessa nas extremidades dessa fibra. As fibras precisam ter um comprimento mínimo para que possam contribuir efetivamente na resistência do material compósito. Esse comprimento crítico (l_c), é dependente do diâmetro da fibra (d), do seu limite de resistência à tração (σ_f), e da força de ligação entre a fibra e a matriz (τ_c), conforme a seguinte fórmula:

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_c}$$

Para diversas combinações matriz-fibra de vidro ou de carbono, esse comprimento crítico é da ordem de 1mm, o que corresponde entre 20 e 150 vezes o diâmetro da fibra. Quando uma tensão igual a σ_f é aplicada a uma fibra que possui exatamente o comprimento crítico, a carga máxima na fibra é atingida exatamente na metade do comprimento desta fibra. À medida que o comprimento da fibra " l " aumenta, o reforço proporcionado pela fibra aumenta. As fibras em que $l > 15l_c$ são chamadas de contínuas; as fibras descontínuas ou curtas possuem comprimentos menores que este. No caso das fibras descontínuas com comprimentos menores que l_c , a matriz se deforma ao redor da fibra, sem haver qualquer transferência de carga, o que significa pequenos reforços.

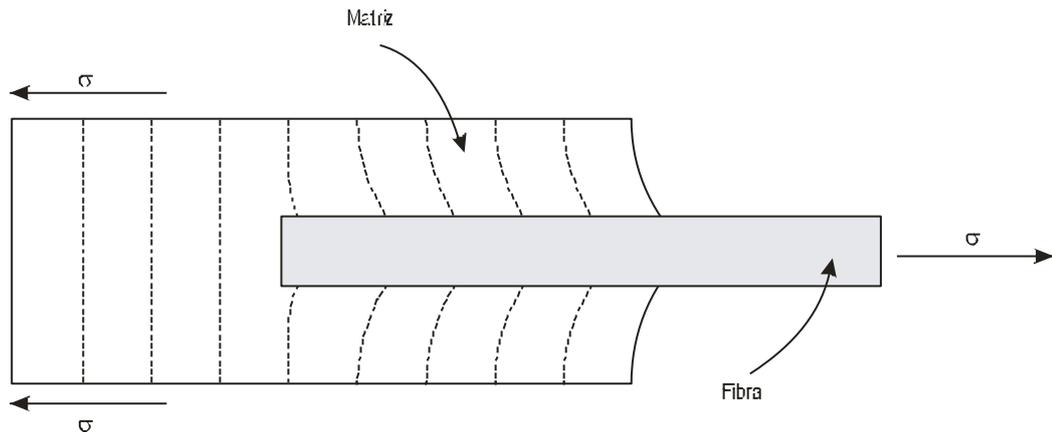


Figura 3 - Padrão de deformação na matriz ao redor de uma fibra sujeita a uma carga de tração
 Fonte: Adaptado de Callister Jr, 2002

A eficácia do reforço com fibras depende de muitas variáveis, dentre as quais destacam-se: os materiais utilizados, a quantidade, o diâmetro, o comprimento e a orientação das fibras; a adesão entre as fibras e a matriz, bem como a localização das fibras. O reforço de compósitos com fibras unidirecionais proporciona um comportamento anisotrópico, com elevada resistência e rigidez em uma única direção. A utilização de fibras curtas e aleatoriamente orientadas proporciona propriedades semelhantes em todas as direções, também chamadas de propriedades isotrópicas. Karacaer et al. (2003) justificaram a utilização de fibras curtas em detrimento das fibras contínuas para determinadas aplicações, como bases de dentaduras. Apesar das fibras contínuas apresentarem propriedades de reforço superiores às curtas, sua manipulação é mais crítica e pode desencadear a formação de falhas, na forma de espaços vazios, o que está fortemente ligado às dificuldades de impregnação das fibras pela matriz polimérica. Os autores testaram o efeito de várias concentrações e comprimentos de fibra de vidro curtas sobre a resistência flexural, módulo flexural e resistência ao impacto. Foram testadas fibras com 4 mm, 6 mm e 8 mm de comprimento e com as concentrações de 1%, 3% e 5% de fibra em peso, em dois tipos de prensagem (por compressão e por injeção). As fibras foram lavadas em água fervente durante 10 min, secas com ar e cortadas nos comprimentos pré-determinados. As fibras foram então silanizadas por imersão em uma solução de silano (A174, Hüls-Veba GmbH, Germany) e secas ao ar

durante 40 min. Antes de serem impregnadas pela resina acrílica, foram colocadas em uma estufa durante o tempo de 1 h, à temperatura de 115°C. Os espécimes utilizados para a determinação da resistência e módulo flexurais mediam 65 x 10 x 2,5 mm, e àqueles destinados ao teste de resistência ao impacto mediam 60 x 7,5 x 4 mm. Os resultados mostraram que a combinação das fibras de 6 mm a 5% em peso e associadas à prensagem por injeção, apresentaram os melhores resultados de resistência flexural, módulo flexural e resistência ao impacto para bases de dentadura.

Lassila et al. (2004) recomendaram que, em compósitos de alta performance flexural, especialmente os anisotrópicos, a razão distância/ diâmetro da fibra fique entre 40:1 a 60:1, a fim de eliminar os efeitos cortantes - de cisalhamento - durante as solicitações de flexão.

2.1.5 Impregnação

Altieri et al. (1994) salientaram que a impregnação manual de fibras resulta, comumente, em baixas frações de volume e união insatisfatória entre fibra e matriz resinosa. Uma abordagem para se otimizar o proporcionamento entre fibra e resina, consiste na confecção prévia de estruturas de resina composta reforçada com fibras (FRC) sob condições controladas. Obtiveram, dessa forma, estruturas pré-fabricadas, prontas para serem utilizadas em casos selecionados. Foi proposto um estudo clínico para avaliar o desempenho de 14 próteses adesivas, feitas com estruturas em resina reforçada com fibras. Os dentes pilares não sofreram preparo algum, sendo o espaço protético de um elemento faltante. Cada dente pilar recebeu dois braços retentores, um por vestibular e outro por lingual/palatal. A FRC para compor as estruturas experimentais foi construída por processo mecanizado. Para tal, utilizaram uma extrusora, na qual as fibras são simultaneamente puxadas com a resina composta. As estruturas apresentaram

de 50% a 60% em peso, e de 33% a 42% em volume de fibras de vidro. As próteses foram cimentadas com resina composta, seguindo o protocolo recomendado para adesão a esmalte. Avaliações foram feitas em intervalos de 3 meses. As restaurações foram consideradas fracassadas sempre que pudesse ser demonstrado qualquer movimento entre os retentores e os dentes pilares. As restaurações sofreram uma taxa de fracasso em torno de 50% em 12 meses. O fracasso se manifestou através da ruptura adesiva entre a FRC e a resina composta adesiva. Não foi observado fratura transversa macroscópica ou empenamento da FRC.

Segundo Lastumäki; Lassila; Vallittu (2003) a impregnação efetiva está associada a um contato da superfície de cada filamento de fibra pela resina que a envolve. Caso a impregnação for incompleta, espaços na matriz podem comprometer as propriedades mecânicas da FRC, favorecer a absorção d'água bem como a descoloração devido a penetração de microorganismos na estrutura.

2.1.6 Comportamento tensão-deformação de um compósito com fibras contínuas

Callister Jr (2002) afirmou que as respostas mecânicas de um compósito reforçado por fibras contínuas depende de diversos fatores, mas de forma preponderante dos comportamentos tensão-deformação das fases fibra e matriz, das frações volumétricas das fases e considerando ainda a anisotropia das fibras alinhadas, da direção de aplicação da carga. O GRAF. 1a representa esquematicamente o comportamento tensão-deformação para as fases fibra e matriz. As curvas não deixam dúvida quanto à fragilidade da fibra e também quanto à ductilidade da matriz, onde as resistências à fratura sob tração para a fibra e matriz, σ_f^* e σ_m^* , respectivamente, são correspondidas proporcionalmente pelas deformações no momento da fratura ϵ_f^* e ϵ_m^* .

Neste caso, $\epsilon_m^* > \epsilon_f^*$, indiscutivelmente. A GRAF. 1b mostra o comportamento de um compósito reforçado com fibras. Na região denominada de Estágio I, tanto a matriz como a fibra se deformam elasticamente, gerando uma curva linear. No estágio II, a matriz já experimenta deformações plásticas, enquanto que as fibras continuam a se deformar elasticamente, uma vez que seu limite de resistência à tração é significativamente superior ao limite de escoamento da matriz. A transição do Estágio I para o Estágio II aumenta à proporção de carga aplicada, que é suportada pelas fibras. O compósito começa a falhar à medida que as fibras passam a se fraturar, o que corresponde à deformação ϵ_f^* demarcada no gráfico. A falha de um compósito reforçado com fibras não é catastrófica, devido a duas razões: nem todas as fibras fraturam ao mesmo tempo e, mesmo após a falha da fibra, a matriz ainda continua intacta, já que $\epsilon_f^* < \epsilon_m^*$ (GRAF. 1a).

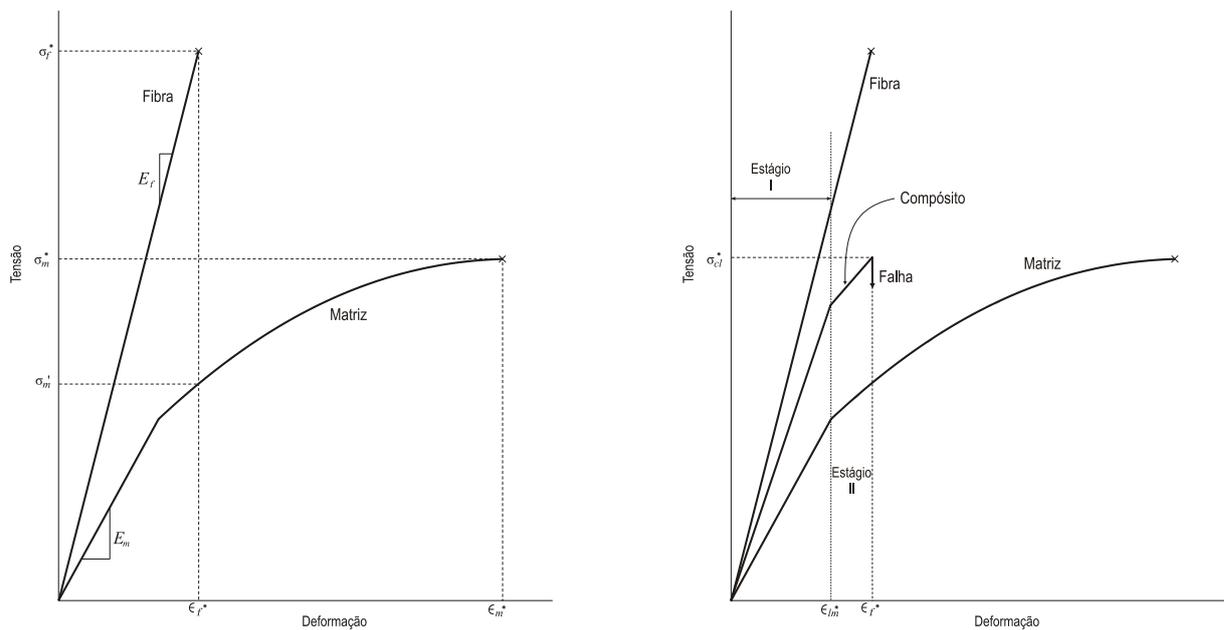


Gráfico 1 – (a) Curvas esquemáticas tensão-deformação para materiais com fibra frágil e matriz dúctil. (b) Curva esquemática tensão-deformação para um compósito reforçado com fibras alinhadas sob tensão uniaxial na direção do alinhamento

Fonte: Adaptado de Callister Jr, 2002

2.1.7 Fibra de vidro

O vidro foi produzido pela primeira vez há cerca de 4000 anos, provavelmente no Egito, em fornalhas usadas para a produção de cerâmica. A utilização do vidro em forma de fibra data do século XVII quando os venezianos a utilizaram na confecção de vestidos. Entretanto, a utilização comercial em grande escala da fibra de vidro não aconteceria antes de 1939 com a fundação da Owens-Corning FiberGlass Corporation nos Estados Unidos. (VAUGHAN, 1998).

2.1.7.1 Composição

O vidro geralmente é definido como um material amorfo, não sendo considerado sólido nem líquido. Quimicamente o vidro é feito de elementos como sílica, boro e fósforo que são convertidos em vidro quando combinados com oxigênio, enxofre, telúrio e selênio. A sílica necessita de elevadas temperaturas para sua liquefação, o que torna necessário a adição de outros elementos à mistura para arrefecer a temperatura e produzir uma viscosidade ideal para a produção dos filamentos de vidro. Vaughn (1998) afirmou que diversos tipos de vidro podem ser obtidos dependendo das propriedades desejadas das fibras resultantes: (TAB. 1).

- a) vidro A: Altamente alcalino. Aplicações onde é necessário uma alta resistência química;
- b) vidro E: Pouco alcalino; baseado em borosilicato de alumínio. O pioneiro dos filamentos de vidro. Possui excelentes propriedades elétricas e é amplamente utilizado na produção de fibra de vidro têxtil;

- c) vidro C: Material baseado em borossilicato que produz fibras com alta resistência química;
- d) vidro S-2: contém alta porcentagem de alumina comparado ao vidro E. Oferece alta resistência. A resistência à tração é aproximadamente 40% maior comparada à do vidro E;
- e) vidro D: Suas características dielétricas são muito boas. Compostos à base de vidro D têm composições dielétricas muito baixas, tornando-os permeáveis a ondas eletromagnéticas. Fibra de vidro D é usada na fabricação de radomes², janelas eletromagnéticas, e superfícies de circuito impresso de alto desempenho;
- f) vidro AR: Composição especial de vidro alcalino resistente. O vidro AR foi desenvolvido especialmente para o reforço de cimento. Seu alto conteúdo de óxido de zircônio oferece resistência excelente para os compostos alcalinos gerados durante a secagem.

Tabela 1 – Composição das fibras de vidro (em peso %)

	<i>Vidros</i>			
	<i>A</i> <i>(high alkali)</i>	<i>C</i> <i>(chemical)</i>	<i>E</i> <i>(electrical)</i>	<i>S</i> <i>(high strength)</i>
Óxido de silício	72,0	65,6	54,3	64,2
Óxido de alumínio	0,6	4,1	15,2	24,8
Óxido férrico	-	-	-	0,21
Óxido de cálcio	10,0	13,2	17,2	0,01
Óxido de magnésio	2,5	3,3	4,7	10,27
Óxido de sódio	14,2	7,7	0,6	0,27
Óxido de potássio	-	1,7	-	-
Óxido de boro	-	4,7	8,0	0,01
Óxido de bário	-	0,9	-	0,2
Miscelânea	0,7	-	-	-

Fonte: Vaughn, 1998

²Radomes – domos para radares

2.1.7.2 Propriedades

O fabricante Saint Gobain/Vetrotex (2006a) listou 10 vantagens de um filamento de vidro:

1- Força mecânica: O filamento de vidro apresenta uma resistência específica mais alta (resistência à tensão/massa volumétrica) que a do aço. Esta característica é o ponto de partida para a produção de compostos de altíssimo desempenho.

2- Características elétricas: Suas excelentes propriedades como um isolador elétrico, mesmo em pequenas espessuras, combinadas com sua força mecânica e comportamento a temperaturas diferentes, tornaram possível as primeiras aplicações para o filamento de vidro.

3- Incombustibilidade: Sendo um material mineral, a fibra de vidro é naturalmente incombustível. Não propaga nem tampouco mantém uma chama e, quando exposta ao calor, não emite fumaça nem produtos tóxicos.

4- Estabilidade dimensional: O filamento de vidro é insensível a variações térmicas e higrométricas e tem um baixo coeficiente de expansão linear.

5- Compatibilidade com matrizes orgânicas: A fibra de vidro possibilita a combinação com muitas resinas sintéticas e também com certas matrizes minerais (gesso, cimento).

6- Não apodrecimento: O filamento de vidro não deteriora e não apodrece. Não é afetado pela ação de insetos e roedores.

7- Baixa condutividade térmica: Esta característica é de grande estima na construção civil, onde o uso de compostos de fibra de vidro torna possível eliminar passagens térmicas, possibilitando economia de calor.

8- Permeabilidade de dielétricos: Isto é essencial em aplicações como radomes (para radares), janelas eletromagnéticas, entre outros.

9- Integração de funções: Um material composto de fibra de vidro pode ser usado para produzir partes de uma peça que integram várias funções e substituir diversas partes montadas.

10- Elevada resistência a agentes químicos: Quando combinada com resinas apropriadas, compostos com esta característica podem ser feitos de filamento de vidro.

As propriedades dos principais tipos de fibra de vidro estão listadas na TAB. 2:

Tabela 2 – Propriedades das fibras de vidro

	<i>Vidros</i>			
	<i>A</i>	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>S</i>
Propriedades Mecânicas				
Resistência à tração (MPa)				
à 22 °C	3033	3033	3448	4585
à 371 °C	-	-	2620	3758
à 538 °C	-	-	1724	2413
Módulo de Elasticidade (Gpa)				
à 22 °C	-	69	72,4	85,5
Alongamento (ruptura), %	-	4,8	4,8	5,7
Recuperação elástica, %	-	100	100	100
Coefficiente de Poisson	-	-	0,23	-
Propriedades ópticas				
Índice de refração	-	-	1,547	1,523

Fonte: Adaptado de Vaughn, 1998

2.1.7.3 Cuidados com manuseio

Segundo Vallitu e Narva (1997), as fibras que por algum motivo ficarem expostas na superfície da prótese, podem desencadear irritação mecânica à mucosa oral.

Giordano (2000) advertiu que as fibras de vidro podem impor um risco à saúde. Elas são suficientemente pequenas para serem aspiradas e depositadas nos pulmões, podendo causar uma pneumoconiose chamada de silicose. Por essa razão, durante o manuseio, se as fibras forem cortadas ou desgastadas, é de suma importância a utilização de máscara. Além disso, o uso de luvas é recomendável para a proteção contra irritações cutâneas.

2.1.8 Significância clínica do reforço com fibras

De uma forma geral, uma composição de materiais deve combinar, em um arranjo geométrico adequado, uma fase com elevado módulo de elasticidade e resistência com uma segunda fase, que tem um módulo de elasticidade mais baixo e uma tenacidade mais alta. O módulo de elasticidade diz respeito à rigidez do material. Um material com um elevado módulo de elasticidade sofrerá menor deformação elástica quando da aplicação de uma determinada carga. A tenacidade revela a capacidade de absorção de energia na zona plástica. O módulo de tenacidade representa a quantidade de energia, por unidade de volume, que um material pode absorver antes de sofrer ruptura. A tenacidade está diretamente relacionada à resistência e à ductibilidade do material. Um material composto responderá a uma carga mecânica de acordo com o arranjo geométrico das duas fases, das propriedades mecânicas dos componentes e das características da interface. Uma adesão eficiente é fundamental para a correta transferência de cargas entre as fases resistente e resiliente (SIMONETTI, 1997).

Vallittu (1998) observou que a qualidade de uma restauração provisória é dependente da boa integridade marginal e da rigidez e resistência adequadas. A utilização de fibras na fabricação de próteses tem sido problemática. As maiores dificuldades no uso de polímeros acrílicos reside na impregnação inadequada das fibras com a resina polimérica e na dificuldade de manejo das fibras, devido ao seu esfiapamento ou empalhamento em regiões indesejáveis da prótese. Para solucionar o problema de impregnação das fibras com polímeros de alta viscosidade, foi desenvolvido um reforço de fibra de vidro experimental pré-impregnado. Os reforços, denominados Stick R (unidirecionais) e Stick W (entrelaçadas), foram pré-impregnados por um polímero (Dentalon plus, Heraeus Kulzer GmbH, Alemanha), que podia ser umedecido posteriormente com monômeros, comumente utilizados em Odontologia. A pré-impregnação dos feixes e dos entrelaçamentos de fibras tornou o procedimento de

reforço bastante fácil, não acontecendo esfiapamentos e maiores dificuldades na inserção na região desejada da prótese. Os reforços com fibras unidirecionais foram localizados próximos à superfície oclusal e os reforços entrelaçados, próximos aos *abutments*. Ao receber a carga proveniente da região oclusal, a porção oclusal da ponte experimental estresse de compressão. Isso explica porque o efeito das fibras unidirecionais sobre a resistência à fratura não foi significativa, já que o seu posicionamento ideal seria no lado de tração, ou seja, o mais gengival possível. Quanto ao reforço de fibra entrelaçado, houve uma expressiva resistência à fratura, considerando que este reforço foi posicionado exatamente no lado de tração da prótese. Clinicamente, as cargas necessárias para fraturar as restaurações provisórias, reforçadas com Stick, foram um pouco maiores que aquelas de força oclusal máxima na região de molares (de 600 a 1200 N). Tal achado sugere a probabilidade de sucesso clínico, a longo prazo, para próteses parciais fixas provisórias reforçadas com Stick. Também foi concluído que a utilização do reforço experimental de fibra de vidro em restaurações provisórias, do tipo ponte de três elementos, aumentou consideravelmente a resistência à fratura, apesar da posição do reforço unidirecional não ter sido ideal.

Para McLaren; Rifkin; Devaud (1999), a indicação primária das resinas reforçadas com fibras é na fabricação de coroas, quando o desgaste da dentição antagonista é importante, apesar de também serem utilizadas quando os *copings* metálicos são recusados pelo paciente, ou em caso de alergia a íons metálicos. Um benefício dessa nova classe de materiais é a facilidade do reparo, mesmo que ainda não existam dados que ratifiquem a confiabilidade de tais procedimentos. Para os autores, a confecção de próteses parciais fixas em resinas reforçadas com fibras associadas a laminados cerâmicos, pode causar concentração de estresse desfavorável na porção cerâmica. O modelo pressupõe uma porcelana de alto módulo flexural e friável, aplicada sobre uma infra-estrutura de fibras de vidro ou polietileno infiltradas em resina, com menor módulo. Qualquer força aplicada que gerar flexão na estrutura subjacente de resina reforçada com fibra poderá causar um fracasso em potencial. Assim, as resinas compostas

laboratoriais, por apresentarem uma resistência flexural semelhante àquela das resinas impregnadas com fibras, são o material de revestimento ideal.

Vallittu (1999b) descreveu um caso clínico no qual foi confeccionada uma prótese parcial adesiva de resina composta reforçada com fibra de vidro. Segundo o autor, a prótese adesiva é uma alternativa de tratamento para substituição de dentes ausentes desde meados dos anos 70, quando Rochette descreveu o primeiro método para esplintagem de dentes com mobilidade periodontal, utilizando uma estrutura metálica fundida. Entretanto, as próteses adesivas estruturadas em metal sempre apresentaram como inconvenientes o custo relativamente alto, a limitação estética em regiões anteriores devido à coloração escura do metal e o desprendimento adesivo entre o metal e o cimento resinoso, apesar da evolução dos agentes adesivos metálicos. O fracasso das próteses adesivas com metal tem sido atribuído às dificuldades encontradas na adesão da resina à superfície das ligas metálicas. Outra possível causa dos freqüentes desprendimentos das restaurações adesivas metálicas seria a rigidez estrutural inerente ao metal. Como os dentes apresentam um certo grau de mobilidade quando em função, forma-se um estresse repetitivo de tensão e compressão na interface entre cimento resinoso e estrutura metálica. Uma maneira de minimizar esse fenômeno consiste na escolha de materiais com menor rigidez estrutural que a liga metálica fundida. O módulo de flexão de uma resina reforçada com fibras é de aproximadamente 18 GPa. Já na liga de cromo-cobalto, esse valor sobe para cerca de 180 GPa. O uso das estruturas de resina composta reforçada com fibra de vidro pode contornar a estética deficiente e a limitada retenção, principais desvantagens das estruturas metálicas convencionais.

Segundo Nishioka et al. (2001), as próteses adesivas indiretas promovem um mínimo desgaste dental, porém as aletas axiais e os apoios oclusais, quando em metal, prejudicam a estética. Dessa forma, o paciente precisa optar entre um maior desgaste de estrutura dental ou o aparecimento do metal. Considerando essa característica desfavorável das próteses adesivas indiretas convencionais, foi apresentada uma

alternativa de baixo custo, no relato de um caso clínico onde foi empregada fibra de polietileno associada à resina laboratorial Solidex. Uma paciente de 37 anos apresentava ausência do elemento 46, perdido há 16 anos. Após a realização dos exames clínico e radiográfico, constataram que os dentes pilares apresentavam condição periodontal normal, estando o dente 45 hígido e o 47 com uma restauração tipo classe I em amálgama. Os dentes pilares foram preparados de forma a acomodar e reter a estrutura de resina reforçada com fibra. As faces linguais foram chanfradas supragengivalmente, com um desgaste de 1,2 a 1,5 mm de profundidade. Os apoios ocluso-proximais foram dimensionados com profundidade e largura mínimas de 1,5 mm e 2,0 mm, respectivamente. Uma vez confeccionada, a prótese foi cimentada com cimento resinoso Enforce (Dentsply, Brasil) sob isolamento absoluto e com remoção dos excessos previamente à polimerização. Os autores chegaram à conclusão de que o emprego da prótese fixa adesiva de material polimérico impregnado com fibras merece destaque, face à praticidade e agilidade nos aspectos clínico e laboratorial. A técnica é simples e conservadora, e exige menos sessões para sua conclusão. Porém, somente estudos longitudinais poderão comprovar a durabilidade estrutural e a estabilidade de cor, para que o sucesso clínico dessa nova alternativa seja completo.

Ellakwa; Shortall; Marquis (2002) realizaram um trabalho para determinar se o tipo da fibra bem como o agente de impregnação influenciam nas propriedades flexurais de um compósito indireto. Foram utilizadas as fibras de polietileno de ultra-alto peso molecular (Connect, Kerr, USA), de aramida (FiberFlex, Biocomp, USA) e de vidro (Stick Teck, Stick Teck Ltd, Finlândia), para reforçar o compósito indireto Artglass (Heraeus-Kulzer, Alemanha). As fibras foram impregnadas com uma resina fluida sem carga (Artglass liquid, Heraeus-Kulzer, Alemanha) e com carga (Kolor Plus, Kerr, Reino Unido). As fibras foram posicionadas na base dos espécimes, correspondendo ao lado submetido à tração. Os espécimes reforçados com resina fluida sem carga foram armazenados em água por 24 h. Aqueles reforçados com resina fluida com carga foram armazenados por 24 h e por 6 meses. Os resultados mostraram um melhor desempenho das fibras

unidirecionais de vidro e de aramida, quando comparado ao das fibras de polietileno em forma de trança. As fibras de vidro apresentaram uma diferença significativa sobre as fibras orgânicas de aramida e polietileno quando impregnadas com o agente adesivo que contém silano. Já a armazenagem por 6 meses reduziu significativamente a resistência flexural dos compósitos reforçados com fibras de vidro e polietileno.

Magne et al. (2002) estudaram a influência do material restaurador e do *design* do preparo tipo inlay na distribuição de tensões em próteses parciais fixas. Para tal, foi utilizado um modelo não destrutivo através da análise por elemento finito. Os resultados mostraram que os materiais isotrópicos, como o ouro/paládio (Olympia, N.Y.), a alumina (InCeram Alumina, Vita, Alemanha), a zircônia (InCeram Zirconia, Vita, Alemanha), e a cerâmica vítrea (IPS Empress II, Vivadent), apresentaram concentrações de tensões significativamente maiores na interface adesiva que os materiais resinosos (Targis, Vivadent) e resinosos fibroreforçados (Targis/Vectris, Ivoclar). Baseado nesses resultados parciais, os autores seguiram testando as próteses fibroreforçadas em três modalidades de configuração cavitária: caixas proximais tipo *slot* adjacentes ao pântico, preparos ocluso-proximais OD_MO e MOD_MOD. Os diferentes preparos não influenciaram na distribuição de tensão de uma forma otimizada. Concluíram ainda que o binômio resistência/resiliência confere às próteses parciais fixas fibroreforçadas a certificação necessária para figurarem como alternativa bastante viável às próteses fixas convencionais. A resiliência previne o desenvolvimento de tensões nocivas na interface adesiva, e o reforço estrutural promove a habilidade para resistir às elevadas cargas funcionais, *in vitro*.

Song et al. (2003) investigaram o efeito da forma do preparo e da dimensão méso-distal do pântico na resistência à fratura e na deflexão experimentada por próteses parciais fixas fibroreforçadas. Para isso, foram utilizados 40 molares e 40 pré-molares, os quais foram alocados em 4 grupos. A simulação da perda de um pré-molar foi feita com uma distância de pântico de 7 mm e aquela relativa ao molar com 11 mm.

Foram testados 2 *designs* de preparo: preparo ocluso-proximal com caixa proximal e preparo ocluso-proximal sem caixa (com a parede pulpar no mesmo plano da parede gengival). Os resultados mostraram uma resistência à fratura diretamente proporcional à diminuição da distância entre os apoios e também ao acréscimo da caixa proximal. Paradoxalmente, a deflexão em milímetros aumentou juntamente com a resistência à fratura, o que foi contra os princípios gerais da mecânica e, de certa forma, desconcertante às expectativas dos autores. Foi especulado sobre a possibilidade dessa discrepância ter sido causada pela depressibilidade inerente à simulação do ligamento periodontal, ou ainda pelo fato da fratura da porção resinosa do pântico acontecer antes da completa deflexão do reforço de fibra sob carga.

O tratamento reabilitador protético necessita, invariavelmente, de uma fase provisória, na qual possíveis modificações podem ser realizadas, tais como: o restabelecimento da dimensão vertical de oclusão, tratamentos de distúrbios temporomandibulares, bem como alterações no posicionamento dentário. Tais restaurações provisórias precisam oferecer estabilidade e segurança, principalmente nos espaços protéticos amplos e nas áreas de alta concentração de tensões oclusais. Pfeiffer e Grube (2003) estudaram a resistência flexural de diferentes materiais através da construção de próteses parciais fixas com dois pilares, com vãos de 12 mm, 19 mm e 30 mm, simulando próteses de 3, 4 e 5 elementos, respectivamente. Os seguintes materiais foram testados: 1) um polímero termoplástico (Promysan Star, Pedrazzini Dentaltechnologie, Germany); 2) Promysan Star em combinação com um compósito laboratorial (Vita Zeta, Vita Zahnfarik, Germany); 3) uma fibra de polietileno não impregnada (Ribbond, Seattle) com uma resina laboratorial (Sinfony, Espe, Germany); 4) um sistema de compósito reforçado com fibra pré-impregnada (Targis/Vectris, Ivoclar, Germany) e 5) uma resina de polimetil metacrilato como controle (Biodent K+B, Dentsply, Germany). Os resultados mostraram que as próteses parciais fixas provisórias, nas diferentes distâncias, confeccionadas com fibras pré-impregnadas (Targis/Vectris) apresentaram maior resistência à fratura (média de 626 a 658 N) quando comparadas às

restaurações com reforço de polietileno (Ribbond/Sinfony, de 252 a 429 N), às de polímero termoplástico (de 125 a 284 N) e à convencional resina polimetil metacrilato (Biodent K+B, de 197 a 247 N). A resistência à fratura do sistema Targis/Vectris não foi afetada pelo espaço protético (12, 19, 30 mm).

Dyer et al. (2004) compararam o efeito de diversas posições, orientações e geometrias das fibras de vidro (unidirecionais e em malha) e polietileno no reforço de compósitos para utilização laboratorial sob carga de fratura inicial e final. Os primeiros danos ao espécime foram classificados como falha inicial (IF) e sua confirmação foi identificada através de pelo menos dois dos seguintes eventos: 1) um declínio substancial na carga/curva de deslocamento; 2) sinais visíveis de fratura e 3) emissões audíveis causadas pela geração de ondas elásticas com a progressão ou formação de fraturas. Já a falha final (FF) foi atribuída aos espécimes quando uma das seguintes condições foi observada: 1) obtenção de uma condição de instabilidade definida por uma inclinação nula ou negativa da curva tensão/deformação; 2) a carga máxima ou deslocamento antes que a carga declinar 50% e 3) ruptura catastrófica aparente. Os espécimes foram cuidadosamente fabricados com o auxílio de um molde metálico, com as dimensões e tolerâncias de 2,0 mm ($\pm 0,1$ mm) x 2,0 mm ($\pm 0,1$ mm) x 25,0 mm ($\pm 0,1$ mm). O volume e peso percentual de fibra foram determinados. Os espécimes foram armazenados em água destilada a 37°C durante uma semana. Ao fim deste tempo, foi realizado um teste flexural de três pontos, de acordo com a norma ISO 10477 (distância dos apoios: 20 mm; velocidade de travessa: 1,0 mm/min.; edentador: 2 mm de diâmetro). A média de carga para deflagrar falha inicial (IF) nos espécimes reforçados com fibra de polietileno variou de 22,6 a 108,0 N e 33,1 a 108,0 N para a falha final (FF). A média de carga inicial (IF) para os espécimes reforçados com fibra de vidro foi de 22,4 a 166,7 N e para FF de 24,6 a 166,7 N. As fibras de vidro unidirecionais apresentaram os maiores valores de carga inicial e final de fratura (172,1 e 184,0 N, respectivamente). O posicionamento e a distribuição das fibras também influenciaram de forma significativa os valores de carga e de deflexão. A deflexão média dos espécimes em IF, com reforços

de fibra de vidro no lado de compressão, resultou no menor dos valores, não ultrapassando os 0,322 mm.

2.2 MEDIÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO ENTRE MATRIZ-FIBRA POR ARRANCAMENTO (TESTE *PULL-OUT*)

A determinação da resistência de aderência é feita através da medição da força necessária para arrancar uma barra de aço de um bloco de concreto endurecido. A barra é solicitada com uma força F até destacá-la do bloco. Chamando u o perímetro da barra, é lícito descrever a tensão de cisalhamento, através de um ensaio, pelo valor médio τ_a , definido pela seguinte expressão:

$$\tau_a = F / \ell \cdot u$$

onde: $\ell \cdot u$ é a área de contato entre os dois materiais. Para efeitos práticos, geralmente o valor τ_a já é suficiente, entretanto ele não indica a distribuição das tensões de cisalhamento. Considerando-se a barra da FIG. 4a de $x = 0$ até $x = \ell$, tanto as tensões de tração no aço como as de compressão no concreto devem variar, já que a força aplicada F vai sendo transferida do aço para o concreto de forma progressiva. Assim, em $x = 0$, o aço experimenta a tensão: $\tau_f = F/S_f$, sendo S_f a área da secção transversal da barra. A partir da extremidade, no sentido crescente de x , quinhões da força F vão sendo transferidos ao concreto, graças à aderência. A tensão de tração na barra cresce, a contar de um valor inicial, passa por um máximo e depois diminui até ser anulada por completo num determinado ponto (ARANTES, 1960?) (FIG. 4b).

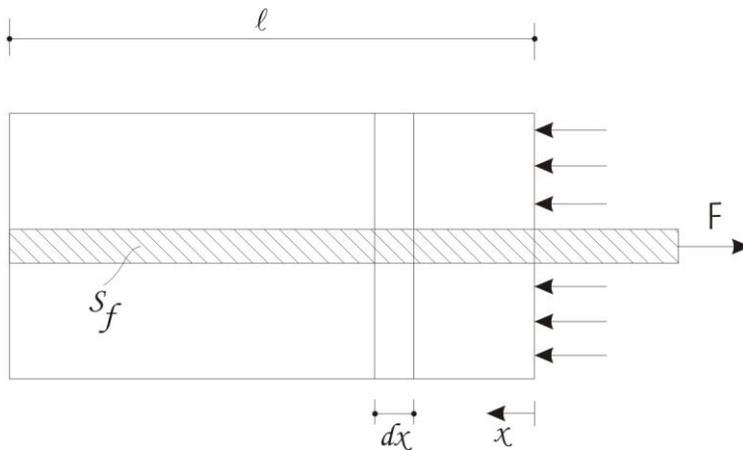


Figura 4a – Ensaio de *pull-out* de uma barra metálica de um bloco de concreto.
 Fonte: Adaptado de Arantes, 1960?

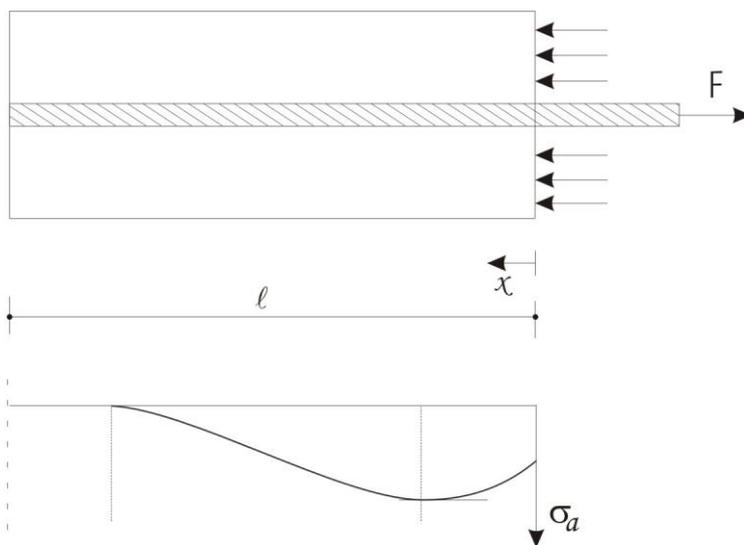


Figura 4b – Distribuição da tensão de cisalhamento.
 Fonte: Adaptado de Arantes, 1960?

Hampe et al. (1995) descreveram o traçado originado pela força/deslocamento que pode ser dividido em 4 partes entre os pontos A e D (GRAF. 2).

1) Entre os pontos A e B, o aumento da força ocorre em função da porção de fibra livre. A interface ainda está intacta e conforme a lei de *Hooke*, somente deformações elásticas são encontradas neste segmento. Com o aumento da carga e do deslocamento, os aumentos de tensão na interface fibra-matriz atingem um valor crítico.

- 2) Entre os pontos B e C a falha aumenta ao longo da superfície da fibra. Para os três comprimentos de fibra embebida, a falha inicial aparece no mesmo valor de deslocamento, correspondendo ao ponto B. Usualmente, o ponto C aponta a força máxima do teste pull-out e o final do processo de falha adesiva. Entretanto, o gráfico mostra que a fibra ainda não está totalmente sem aderência neste ponto.
- 3) Entre os pontos C e D a propagação da falha adesiva é acelerada.
- 4) No ponto D a fibra está completamente sem aderência à matriz e a transferência de tensão entre a fibra e a matriz se dá unicamente por fricção.

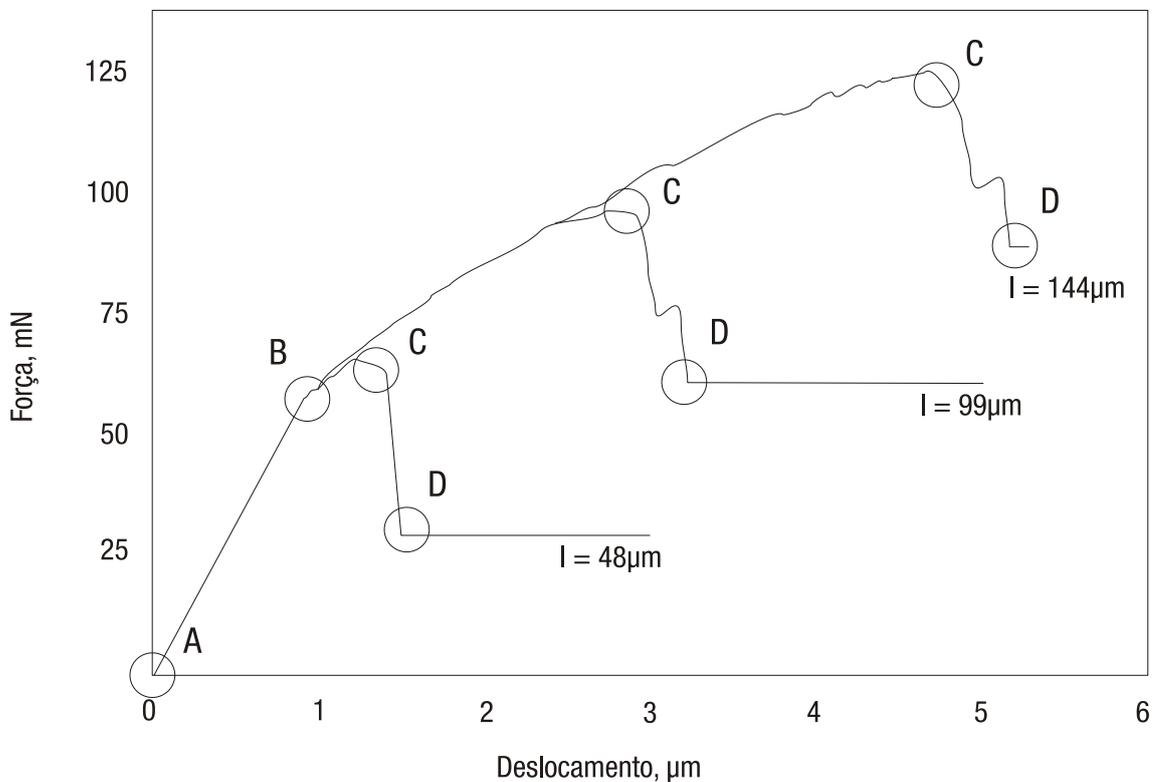


Gráfico 2 – Simulação de força em função do deslocamento em testes pull-out com fibra única embebida em três diferentes comprimentos

Fonte - Adaptado de Hampe et al., 1995

Herrera-Franco e Valadez-Gonzalez (2005) descreveram o teste *pull-out* (FIG. 5) como um método direto para a caracterização da adesão interfacial entre matriz-fibra. O método consiste em puxar a fibra da matriz, que pode estar sob a forma de um bloco de resina, de um disco ou de uma gota. As fibras são inicialmente alinhadas e então

imersas na matriz resinosa que posteriormente é polimerizada. A carga e os deslocamentos são continuamente monitorados. A carga (P) é registrada no momento da falha adesiva e convertida em resistência ao cisalhamento interfacial (τ) através da seguinte fórmula:

$$\tau = P/\pi dL$$

onde:

- d é o diâmetro da fibra
- L é o comprimento da fibra embebido pela matriz resinosa.

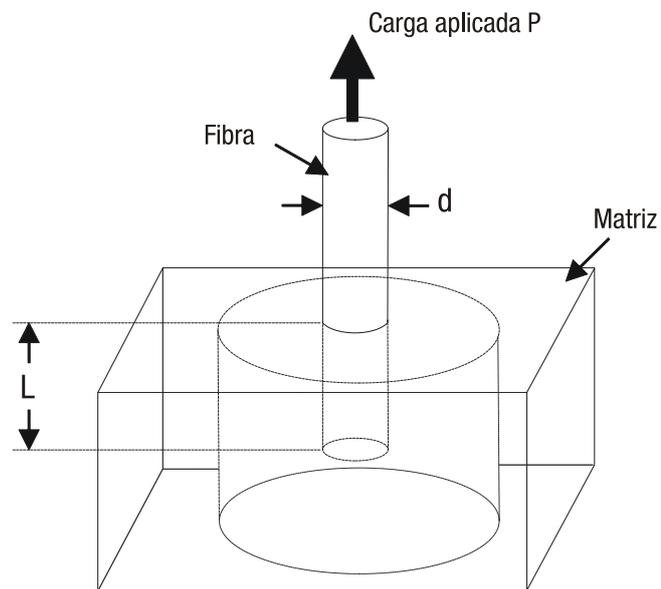


Figura 5 – Teste *pull-out*

Fonte - Adaptado de Herrera-Franco e Valadez-Gonzalez, 2005

2.3 ANALOGIA DAS RESINAS REFORÇADAS COM FIBRA AO CONCRETO ARMADO

Ruschel (1974) afirmou que: "O concreto simples resiste bem às tensões de compressão, e mal às de tração, na proporção aproximada de 10 para 1. Para sanar tal inconveniente colocam-se peças de aço (armaduras) no seu interior, seguindo a direção das forças internas de tração, resultando o concreto armado [...] "

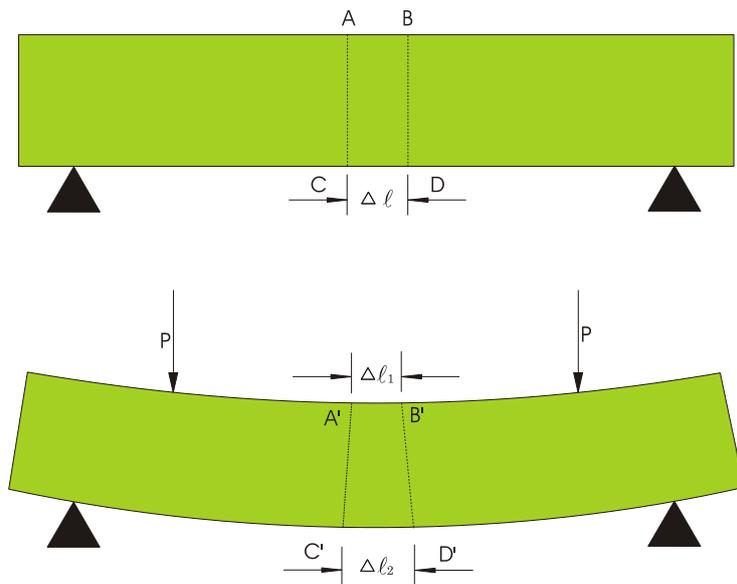


Figura 6 - Consideremos duas seções AC e BD de uma viga, afastadas entre si de ℓ . Ao atuarem as cargas P, a viga vai deformar-se sob a solicitação de flexão e as posições AC e BD passam para as posições A'C' e B'D'. Na borda superior houve um encurtamento (presso-flexão ou tensão de compressão). Na borda inferior houve um alongamento (tenso-flexão ou tensão de tração).

Figura 6 – Comportamento flexural de uma viga com 2 apoios livres

Fonte - Adaptado de Ruschel, 1974

De acordo com Rüsçh (1980), as matérias-primas para a fabricação do concreto são basicamente: o cimento (aglomerante), os agregados (areia, cascalho, brita) e a água de amassamento.

O concreto armado é um material de construção composto. Isto significa que os materiais aço e concreto agem conjuntamente quando a secção transversal está submetida a solicitações externas, principalmente à flexão. A base para o efeito composto, e assim para a construção com concreto armado, é dado pelas seguintes características dos dois materiais: 1. A elevada resistência à compressão do concreto, unida à elevada resistência à tração do aço. 2. A ação conjunta do concreto e do aço, assegurada pelas propriedades de aderência destes materiais. 3. Os coeficientes de dilatação térmica, aproximadamente iguais, do concreto e do aço. 4. A proteção contra a corrosão do aço, através do concreto que o envolve. (RÜSCH, 1980).

Segundo Felipe et al. (2001), as fibras de reforço atuam nas resinas de maneira análoga à ferragem no concreto. O concreto pode ser comparado a uma resina híbrida,

por apresentar partículas grandes e pequenas (brita e areia) aglutinadas por um agente de união (o cimento e a água). Continuando a comparação, tanto o concreto como a resina possuem elevada resistência à compressão, porém baixíssima resistência às tensões de tração. Para sanar tal deficiência, no caso do concreto, na construção de estruturas volumosas e extensas adiciona-se, no seu interior, um reforço estratégico em ferro armado que resistirá bem às tensões de tração. O dimensionamento da ferragem leva em conta cálculos específicos em relação à força a qual a estrutura será submetida, as dimensões da estrutura, bem como a quantidade e a disposição ideal do reforço metálico. Da mesma forma, uma estrutura em resina irá se comportar de maneira similar a uma estrutura em concreto, e dependerá de um reforço estratégico, seja em metal ou com materiais mais modernos como as fibras.

2.4 PROTENSÃO

A Estática compreende a parte da Física que estuda o comportamento das forças exteriores e interiores de uma estrutura, permitindo a determinação de suas dimensões ótimas, assegurando estabilidade e segurança de construção. Saliger (1939) denominou de estrutura todos os componentes de uma obra, que em virtude de sua própria resistência lhe conferem estabilidade. As cargas de uma estrutura compreendem as forças aplicadas, resultantes do próprio peso e dependem do fim ao qual a estrutura se destina, e são, ao mesmo tempo, permanentes e variáveis. As cargas permanentes são decorrentes do próprio peso estrutural. As variáveis, também chamadas de sobrecargas, resultam da utilização e do serviço ao longo da vida útil da estrutura.

Baud (1970) explicou o princípio no qual se baseia o concreto protendido: uma determinada estrutura é comprimida previamente em suas extremidades por forças externas. Se esta peça é submetida a uma flexão, determinadas fibras sofrerão

compressão, enquanto outras, tração. Este novo esforço combinará com o esforço prévio de compressão. O resultado será a supercompressão de determinadas fibras, enquanto outras serão aliviadas do esforço previamente aplicado. (FIG. 7).

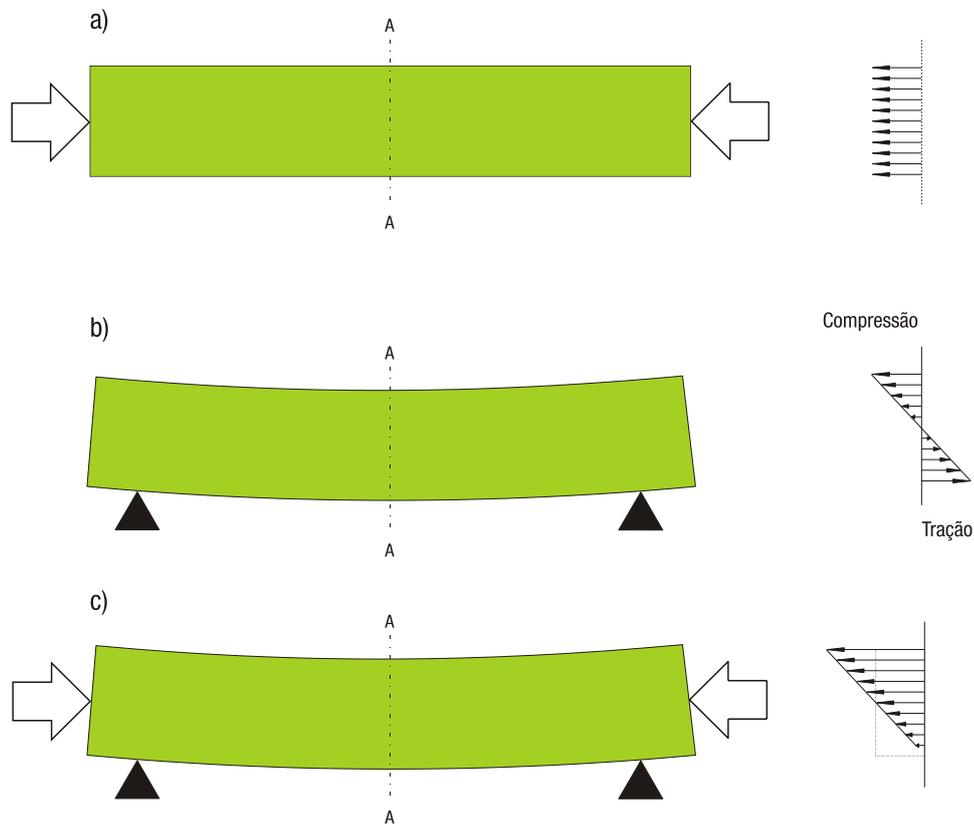


Figura 7 -

a) Um esforço compressivo nas extremidades de uma peça irá gerar tensões de compressão em uma secção qualquer AA.

b) Ao ser flexionada, parte da secção AA da peça será comprimida enquanto o restante sofrerá esforços de tração.

c) Ao combinar os efeitos provocados pela compressão (previamente aplicada) com os esforços típicos da flexão, observa-se que as tensões de compressão se somam, enquanto a tração das fibras pretensionadas produz uma redução dos esforços resultantes.

Fonte: Adaptado de Baud, 1970

Se a compressão prévia for deslocada para a base da peça, o resultado será a distribuição de tensões prévias de compressão de forma desigual sobre a secção AA. Isso é particularmente favorável, pois ao se combinar com os esforços do diagrama de flexão, os esforços de compressão tendem a se igualar, obtendo-se uma distribuição mais uniforme dos esforços de compressão nas secções da peça. (FIG. 8).

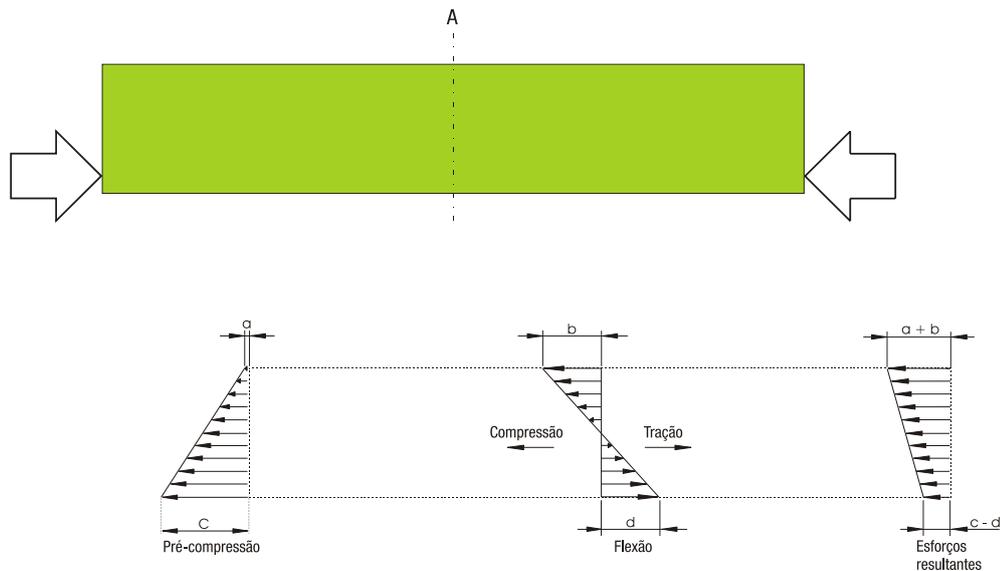


Figura 8 – Pré-compressão descentralizada
 Fonte: Adaptado de Baud, 1970

Pfeil (1991) definiu “protensão” como o artifício de introduzir numa estrutura, um estado prévio de tensões, de modo a melhorar sua resistência ou seu comportamento, sob ação de diversas solicitações. O artifício da protensão desloca a faixa de trabalho do concreto para o âmbito das compressões, onde o material é mais eficiente. Com a protensão, aplicam-se tensões de compressão nas partes da secção tracionadas pelas solicitações dos carregamentos. Desse modo, pela manipulação das tensões internas, pode-se obter a contribuição da área total da secção da viga para a inércia da mesma, criando-se um “reservatório tensional”. Uma das vantagens mais importantes do concreto protendido é a possibilidade de se vencer vãos maiores que o concreto armado convencional. Como exemplo: pontes com vigas retas de concreto armado têm seu vão livre limitado a 30 m ou 40 m, enquanto as pontes com vigas protendidas já atingiram vãos de 250 m. Já para estruturas com o mesmo vão, permite a redução da altura necessária da viga.

Shahawy e Beitelman (1996b) estudaram a praticabilidade da utilização de tendões ARAPREE® (ARAmid PREstressing Element, Akzo Co., Germany) de fibra de aramida na protensão de vigas de concreto. Os autores argumentaram que o

envelhecimento precoce das estruturas chega a ser considerado um dos mais importantes problemas nacionais nos Estados Unidos da América. A corrosão do reforço em aço é o grande causador deste problema. Uma opção viável a este problema é a utilização de materiais resistentes à corrosão e que ao mesmo tempo reproduzam as propriedades mecânicas do aço. Os avançados materiais compósitos oferecem muitas vantagens, tais como altíssima resistência, leveza e considerável resistência à corrosão, já comprovados anteriormente nas aplicações aeroespaciais e militares. O principal objetivo do trabalho foi estudar o comportamento flexural sob serviço, fadiga e cargas destrutivas. Foram confeccionadas peças com 10,1 m de comprimento com uma secção em forma de duplo "T". Os tendões de aramida foram tracionados a 40% da sua capacidade máxima de 124,3 KN. Os resultados mostraram que os tendões ARAPREE® podem ser utilizados com sucesso na protensão de estruturas de concreto, muito embora quando comparados ao modelo similar reforçado com cabos de aço, mostrou valores de deflexão maiores após a falha do concreto. Este aumento na deflexão foi justificado devido ao módulo de elasticidade dos tendões de aramida ser menor que aquele apresentado pelo aço. As perdas de protensão imediatamente após a liberação da carga foram de aproximadamente 11%.

Glanz (1997) compilou uma série de estudos que comprovam que as forças mecânicas atuantes nas células podem influenciar em tudo, quer no caminho que as proteínas se unem ao DNA, quer no desenvolvimento de uma célula maligna em um tumor de fato. As células devem sua forma e várias de suas propriedades à "integridade tensional", design descrito primeiramente por Fuller. As estruturas ganham forma e resistência pela combinação de elementos que resistam à compressão, associados a outros elementos sob tração, originando um sistema pretensionado. O esqueleto celular compartilha elementos estruturais resistentes à compressão, chamados de microtúbulos, com outras estruturas resistentes à tração como, por exemplo, os microfilamentos de actina e os filamentos intermediários. Através da micromanipulação, videomicroscopia e adesivos moleculares altamente específicos, a equipe do Harvard Medical School and

Children's Hospital mostrou que a manipulação em receptores na superfície de uma célula viva dispara rearranjos instantâneos no núcleo. Isso coloca o citoesqueleto como um mecanismo transductor de sinais através de comunicação mecânica e não somente como uma estrutura de suporte.

O Composipost (Recherches Techniques Dentaires [RTD], Meylan, France), também chamado de C-Post (EUA), é um sistema de pino endodôntico e núcleo baseado no princípio de reforço com fibras de carbono. Desde que foi lançado, em 1990, tem sido utilizado, principalmente, por dentistas europeus e canadenses. O Composipost é feito de fibras de carbono estiradas e alinhadas, imersas em uma matriz de resina epóxica. A tensão uniforme das fibras de carbono confere uma alta resistência aos pinos. Sua forma cilíndrica é intercalada por dois estágios de assentamento em forma cônica, para proporcionar estabilidade e distribuição do estresse. De acordo com o fabricante, a força de tensão do pino Composipost é de 1600 MPa, superior aos pinos metálicos que podem variar de 114 a 654 MPa. O módulo médio de elasticidade é de 21 GPa, segundo o fabricante. Fredriksson et al. (1998) acompanharam 236 pacientes que tiveram seus dentes restaurados com pinos de resina epóxica reforçada com fibra de carbono. A duração do estudo variou de 27 a 41 meses. Nesse tempo, os dentes receberam provisórios, para somente ao fim do estudo serem confeccionadas as restaurações definitivas: metalocerâmicas (80%), coroas cerâmicas (10%) e remanescente restaurado com resina (10%). O resultado foi considerado como sucesso, se pino e núcleo estivessem, *in situ*, sem sinais clínicos e radiográficos de fracassos técnicos, perda de retenção e fratura da raiz ou do pino. Do total de 236 dentes restaurados, 5 dentes foram extraídos durante o estudo por problemas periodontais severos e fraturas radiculares. Dessa forma, esses fracassos - 2% - foram considerados como dentes perdidos. Os 98% remanescentes obtiveram sucesso.

Segundo Garden e Hollaway (1998), na protensão com o sistema de pós-tracionamento, cabos de alta resistência são tracionados contra a estrutura a ser

reforçada, proporcionando ganhos notáveis no comportamento elástico, na capacidade máxima e no comportamento das fraturas. Ainda como vantagens, citaram uma redução no peso estrutural e maior resistência à fadiga. Entretanto, o tempo de serviço pode expor alguns problemas associados a este método. Existe a necessidade de manutenção da estabilidade dos dispositivos de ancoragem e a necessidade de proteção dos cabos contra a corrosão. Por sua vez, a protensão externa pode ser aplicada tanto em estruturas novas como antigas. Sendo de uso relativamente recente, a protensão externa tornou possível a reabilitação de estruturas de concreto através da utilização de materiais compósitos. Os autores reforçaram vigas de concreto preexistentes, através da colagem de placas de fibra de carbono/resina epóxica (58% e 42% em peso, respectivamente) na base das vigas. O estudo teve como objetivo comparar o modo de falha das vigas reforçadas com e sem protensão. Os níveis de pré-tracionamento variaram de 25% a 50% da resistência à tração das placas. As vigas não protendidas falharam pela separação do reforço fibroresinoso da base das vigas, na qual ficou aderido uma fina camada de concreto, enquanto a maioria das vigas reforçadas com a fibra pré-tracionada falharam pela fratura do reforço. Neste último grupo, a protensão do compósito deslocou o modo de falha para longe da zona de tração relativamente fraca do concreto.

Segundo Toutanji e Saafi (1999), as primeiras investigações sobre a possibilidade da utilização de polímeros reforçados com fibras (FRP) no reforço de estruturas de concreto remontam aos anos 50. FRP têm sido utilizados exaustivamente na indústria aeroespacial como um material de alta resistência, dureza e uma alternativa bastante leve ao alumínio e ao titânio. Entretanto, devido aos altos custos, técnicas de processamento não familiares e insuficiente exposição tecnológica, estes materiais avançados somente recentemente começaram a figurar na construção civil. Como vantagens, os FRP para reforço de concreto incluem: alta resistência específica, alta dureza específica, alta resistência ao impacto, e fundamentalmente, alta resistência à corrosão que influencia diretamente na redução das manutenções de rotina e nos custos de reconstrução.

Das 583000 pontes nos Estados Unidos, 235000 foram construídas com concreto armado e 108000 com concreto protendido. Segundo Stoll; Saliba; Casper (2000), a corrosão é o maior problema para as construções que empregam concreto/aço. Recentemente, tendões de polímeros reforçados com fibra (FRP) vêm sendo desenvolvidos para utilização com concreto. Os FRPs proporcionam um incremento na resistência à fadiga e à corrosão quando comparados ao aço. Além disso, permitem o reforço pretensionado de pontes de concreto, aumentando grandemente a vida útil em ambientes corrosivos. O estudo consistiu na confecção de duas vigas de 12,19 m de comprimento por 91,4 cm de altura. Cada uma das vigas recebeu o reforço de 8 cabos pretensionados, distribuídos nos primeiros 15 cm a partir da base. O cálculo da tensão prévia aplicada nos cabos levou em consideração as propriedades mecânicas dos cabos e a resistência à compressão de 69 Mpa do concreto. Os 5 tendões de fibra de carbono, utilizados na primeira viga (1), foram tracionados cada um à 142 KN, correspondendo a 77% da resistência máxima à tração e totalizando uma força de tração de 712 KN. Já os 8 tendões de fibra de vidro, utilizados para o reforço da segunda viga (2), foram carregados com 84,5 KN cada, correspondendo a 45% de sua resistência e somando uma força de tração de 676 KN. Quando a resistência à compressão do concreto ultrapassou 60% dos 69 Mpa nominais, os tendões foram cortados, havendo a transferência de carga para o concreto. As vigas foram submetidas a um teste flexural destrutivo de quatro pontos. Os valores máximos de carga suportados foram 434 e 554 KN para as vigas 1 e 2, respectivamente. A curva carga/deflexão para ambas as vigas foi similar até aproximadamente os 311 KN. Rachaduras audíveis na viga 2 foram notadas a cerca de 182 KN de carga. A carga da primeira rachadura na viga 1 não foi flagrada. As primeiras rachaduras em ambas as vigas ocorreram com cerca de 178 KN. Este valor é cerca de 13% menor que o previsto para as vigas 1 (209 KN) e 2 (196 KN). Tal discrepância pode ser explicada pelas perdas de protensão dos cabos devido ao escoamento e contração do concreto.

Segundo Callister Jr (2002), o concreto é um compósito comum, constituído por partículas grandes, onde as fases matriz e dispersa são compostas por materiais cerâmicos. E como a maioria das cerâmicas, o concreto de cimento portland é relativamente fraco e bastante frágil. A sua resistência à tração é aproximadamente de 10 a 15 vezes menor que a sua resistência à compressão. Entretanto, essa resistência pode ser aumentada com o uso de vergalhões, arames, barras, ou malhas de aço no interior do concreto fresco e não curado. Assim sendo, após o reforço, a estrutura já endurecida é capaz de resistir a maiores tensões de tração, compressão e cisalhamento. O reforço pode ser feito também pela mistura de fibras de materiais com alto módulo, como o vidro, o aço, o náilon e o polietileno. Uma outra modalidade de reforço para aumentar a resistência do concreto, consiste na introdução de tensões residuais de compressão na estrutura, originando o concreto protendido.

Muitos circuitos eletrônicos necessitam de condutores elétricos que precisam tolerar grandes tensões mecânicas sem, entretanto, interromper a condutividade. Condutores construídos sob forma de filmes metálicos começam a fissurar, quando tão somente 1% de estiramento é aplicado. Lacour et al. (2003) desenvolveram condutores através da pulverização de ouro sobre um substrato elastomérico de polidimetil siloxano pretensionado. No transcorrer do estudo, os autores descobriram que o ouro depositado sobre este substrato borrachóide foi capaz de manter a condutividade elétrica até um alongamento linear próximo dos 22%.

Grandini et al. (2005) testaram diferentes tipos de pinos de fibra. Os pinos Easypost (Krug, Milano, Italy), Para Post Fiber White (Coltène/Whaledent, Mawhaw, USA), FibreKor (Jeneric/Pentron, Wallingsford, USA), Ghimas White (Ghimas, Bologna, Italy), DT Light-Post radiopaque (RTD, Grenoble, France), FRC Postec (Ivoclar-Vivadent, Schaan, Liechtenstein), Luscent Anchors (Dentatus, New York, USA) e Snowpost (Carbotech, Ganges, France) foram submetidos a um teste de resistência à fadiga. A máquina de testes foi programada para realizar 2000000 de ciclos, simulando uma

atividade oclusal e mastigatória de aproximadamente 4 anos. A maior resistência à ciclagem flexural foi apresentada pelo grupo dos pinos DT Light-Post seguido pelo grupo FRC Postec. Nenhum dos espécimes do DT Light-Post fraturaram, enquanto no grupo FRC Postec houve somente uma falha. Os grupos EasyPost, Luscent Anchors e Ghimas White suportaram, em média, 931.000, 807.242 e 440.952 ciclos, respectivamente. Os grupos Para Post Fiber White, FibreKor e Snowpost apresentaram valores bastante baixos, entre 6000 e 84000 ciclos. Os autores tentaram correlacionar o desempenho dos pinos no teste de resistência à fadiga às características estruturais, como diâmetro dos filamentos da fibra e número de fibras por mm^2 . O coeficiente de correlação de Pearson revelou uma pequena correlação entre essas duas variáveis. Ainda foi citado o processo produtivo dos pinos RTD ressaltando o pré-tracionamento das fibras de vidro antes da cura da resina epóxica. A conseqüente compressão da matriz resinosa favorece a absorção dos esforços de tração durante os esforços flexurais.

Suh (2006) descreveu e ressaltou o processo produtivo dos pinos de fibra (RTD, France), onde as fibras são estiradas ao mesmo tempo em que são imersas em resina epóxica. Ao final da cura da resina, a tensão nas fibras é liberada, resultando em compressão da matriz resinosa. Durante a flexão, as prováveis tensões de tração serão antagonizadas pelas tensões de compressão previamente induzidas.

Proposição

3 PROPOSIÇÃO

O propósito deste estudo foi avaliar o comportamento flexural de duas resinas compostas (uma de uso direto – Quixfil e outra de uso indireto – Adoro), quando reforçadas com fibra de vidro pré-tracionada, sendo para isso necessário:

- a) analisar a influência da protensão na resistência flexural e módulo flexural nos materiais supracitados;
- b) analisar a influência da protensão no modo de falha inicial da matriz resinosa.

Material e Métodos

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

MATERIAL	FABRICANTE	LOTE	PAÍS
Adesivo SuperBonder Gel	Loctite-Henkel	JUN07EB	Brasil
Discos Sof-Lex 1982C	3M	-	EUA
Fibra de vidro tipo S	Angelus	-	Brasil
Lenços Kiss folha tripla	Santher	-	Brasil
Lâmina de bisturi n.15	Feather	-	Japão
Lixa d'água 1200	Carborundum	-	Brasil
Luva de latex	Supermax	-	Malásia
Resina composta Adoro C2	Ívoclar Vivadent	H12232	Liechtenstein
Resina composta Filtek Z350 Flow B2	3M ESPE	5AG	EUA
Resina composta QuiXFil U	Dentsply	0504000166	Alemanha
Resina composta Vectris Glue	Ívoclar Vivadent	H21993	Liechtenstein
Silano	Angelus	3663	Brasil
Tira de poliéster K-Dent	Quimidrol	026	Brasil

Quadro 2 - Materiais utilizados, fabricantes e países de origem

4.2 DISPOSITIVOS, EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS

Os dispositivos, equipamentos, instrumentos, fabricantes e países de origem estão apresentados no QUADRO 3.

DISPOSITIVOS, INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS	FABRICANTE	PAÍS
Alfinete de tapeçaria	Particular	Brasil
Anilhas de ferro fundido (5 Kg, 4 Kg, 3 Kg, 2 Kg, 1 Kg)	Neofit	Brasil
Balança analítica eletrônica mod. FA - 2104N	Bioprecisa	Brasil
Balança eletrônica mod. EGI - 15	Gural	Brasil
Disco diamantado	Komet	Alemanha
Dispositivo de protensão	Particular	Brasil
Estereoscópio	Carl Zeiss JENA	Alemanha
Estufa à vácuo mod. 5831	Napco	EUA
Espátula Suprafill Cyann #1	SSWhite Duflex	Brasil
Espátula Suprafill Cyann #2	SSWhite Duflex	Brasil
Fita métrica	*	Brasil
Fotopolimerizador Optilux 501	Kerr	EUA
Garra de aço inoxidável	Particular	Brasil
Lâminas de vidro para exames laboratoriais	Bioslide	Brasil
Máquina de testes universal EMIC	EMIC	Brasil
Máquina de testes universal Instron modelo 4444	Instron	EUA
Matriz de Teflon® para teste <i>pull-out</i>	Particular	Brasil
Microscópio eletrônico de varredura Philips XL	Philips Electric Corp.	Holanda
Máquina fotográfica Nikon D 70 / lente 17 - 80mm	Nikon	Japão
Óculos de proteção mod. Ultra-spec 2000/ SCT Orange	UVEX	EUA
Paquímetro	MAUb	Polônia
Pistola aplicadora QuiXfil	Dentsply	Alemanha
Placa de Petri	Anumbra	República Tcheca
Prendedor de papel tipo grampomol	*	*
Régua milimetrada	*	*
Suporte plástico Trilux Ruthinium	Ruthibras	Brasil
Secador de cabelo Britânia SP 2000	Britânia	Brasil
Termo-higrômetro HT-210	Instrutherm	Brasil
Tesoura 15 cm	Mundial	Brasil
Tripé fotográfico Tiffen	Davis & Sanford	EUA
Ultra-som Ultrasonic Cleaner 1440 D	Odontobras	Brasil
Unidade polimerizadora Targis Power Upgrade	Ivoclar Vivadent	Liechtenstein

Quadro 3 - Dispositivos, equipamentos, instrumentos, fabricantes e países de origem. (*) Não disponível

4.3 MÉTODO

A metodologia será apresentada em duas partes principais. Inicialmente, uma série de testes preliminares foi realizada a fim de obter informações e subsídios necessários para então realizar a segunda etapa, relativa à construção dos espécimes.

Na primeira etapa, os materiais utilizados para a confecção dos espécimes foram primeiramente testados isoladamente, como na determinação das propriedades físicas da fibra de vidro (medição e contagem de filamentos, pesagem e teste de tração) e da resistência à compressão e módulo de elasticidade das resinas de uso direto e indireto. Em seguida, ainda na primeira etapa, o teste *pull-out* permitiu determinar a tensão de cisalhamento entre fibra de vidro e resina composta (QUADRO 4).

Teste/Mensurações	Utilizado para:
Diâmetro médio do filamento	Obtenção da área e volume do filamento
Número de filamentos	Obtenção da área e volume do feixe
Densidade linear/TEX	Cálculo do % em peso no espécime
Resistência à tração da fibra de vidro	Cálculo da carga de pré-tracionamento
Módulo de elasticidade da fibra de vidro	Comparação com o módulo da resina
Determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade dos compósitos	Cálculo da carga de pré-tracionamento
Teste de arrancamento (<i>pull-out</i>)	Determinação da adesão interfacial entre matriz e fibra

Quadro 4 – Síntese dos testes preliminares realizados

Por fim, os itens de 4.3.5 a 4.3.8, descritos na segunda etapa, abrangem a confecção dos espécimes e o teste flexural. O teste flexural foi precedido pela realização

de um teste piloto, cujos resultados estão apresentados nas TAB. 11 a 14, Apêndices L e M .

4.3.1 Determinação das propriedades físicas da fibra de vidro

Neste trabalho foi utilizada a fibra de vidro tipo S (FIG. 9 e 10), cujas especificações estão apresentadas no QUADRO 5. Todos os valores ali registrados foram obtidos através da metodologia descrita nos próximos itens.



Figura 9 – Roving³ de fibra de vidro

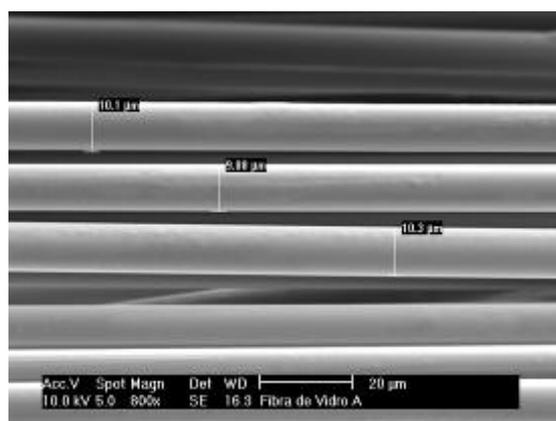


Figura 10 – Filamentos em microscopia eletrônica de varredura

³ Roving – Fibra de vidro sob a forma de fios contínuos enrolados em bobinas

Características	
Tipo de fibra	Vidro S
*Diâmetro médio do filamento	9,6 μm
*Número de filamentos	3468
*Densidade linear (TEX)	684 g/Km
*Resistência à tração	1344 MPa
*Módulo de elasticidade (E)	38,5 GPa

Quadro 5 - Especificações da fibra de vidro utilizada. (*) Valores determinados por metodologia descrita nos próximos itens

4.3.1.1 Diâmetro médio do filamento

O conhecimento do diâmetro médio do filamento foi necessário para a determinação da área da secção do filamento. O diâmetro médio do filamento da fibra de vidro foi aferido através de microscopia eletrônica de varredura (Philips XL, Philips Electric Corp., Holanda), sendo realizadas 10 medições em diferentes monofilamentos (FIG. 11, TAB. 3, APÊNDICE A).

4.3.1.2 Número de filamentos

Ao multiplicar-se a área da secção do monofilamento, descrita no item anterior, pelo número de filamentos presentes no feixe, obtém-se a área da secção do feixe da fibra de vidro utilizado. Por sua vez, a área da secção do feixe é fundamental para o cálculo da resistência à tração, descrita a seguir no item 4.3.1.4, bem como para a determinação do percentual volumétrico do reforço de fibra existente em cada espécime confeccionado (APÊNDICES O, P, R e S).

A quantidade de filamentos no feixe foi determinada através da contagem individual dos monofilamentos. O feixe foi cortado com uma tesoura (Mundial, Brasil) em um comprimento de aproximadamente 5 mm. Em seguida, o feixe com 5mm de comprimento foi fracionado em 20 partes e montado em 2 *stubs* (porta-amostras) com cola de cianocrilato (Superbonder gel, Loctite, Brasil). Foram colados 10 feixes na face lateral de cada *stub*. Os *stubs* foram levados ao ultra-som (Ultrasonic Cleaner 1440 D, Odontobras, Brasil) em recipientes contendo água destilada durante 5 min a fim de remover o resíduo de corte. Então, os feixes foram secos com papel absorvente e conduzidos a uma estufa durante 1 h a 80 °C. As amostras foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura (Philips XL, Philips Electric Corp., Holanda) onde as micrografias foram realizadas com uma abordagem de topo, a fim de facilitar a visualização de cada filamento. As micrografias foram exportadas para o programa Corel Draw® para a contagem dos filamentos (FIG. 12, APÊNDICE B).

Opcionalmente, uma outra forma de se obter o número de filamentos seria aplicar a seguinte fórmula (SAINT-GOBAIN VETROTEX, 2006b):

$$\text{Número de filamentos} = \frac{4000 * \text{Tex}}{3,14 * D^2 * 2,6}$$

onde:

Tex	gramas em 1000 metros
d	diâmetro do filamento em μm
2,6	densidade do vidro em g/cm^3

O cálculo demonstrativo está apresentado no APÊNDICE C.

4.3.1.3 Densidade linear/TEX

A densidade linear, também denominada TEX, corresponde à massa em gramas por quilômetro linear. O conhecimento do TEX permite a determinação do percentual em peso da fibra de vidro em cada espécime, conforme demonstrado nos APÊNDICES O, P, R e S.

Para a determinação do TEX, foram cortadas 5 amostras do feixe de fibra de vidro com 10 cm de comprimento, aferido por um paquímetro com 0,1 mm de precisão (Maub, Polônia). Os feixes foram dispostos lado a lado em uma placa de Petri (Anumbra, República Tcheca) previamente limpa. As amostras foram inicialmente pesadas em uma balança de precisão de 0,1 mg (Mod. FA-2104N Bioprecisa, Brasil). Então, foram colocadas em uma estufa à vácuo (Mod. 5831, Napco, EUA) para a secagem. A temperatura foi mantida em 80 °C durante 3 h sob vácuo de 30 cm/Hg. Em seguida, foi realizada uma segunda pesagem (FIG. 13 a 15). A média da segunda pesagem foi considerada a massa em gramas relativa a 10cm lineares de fibra de vidro. A multiplicação deste valor por 10.000 resulta no TEX. (TAB 4, APÊNDICE D).

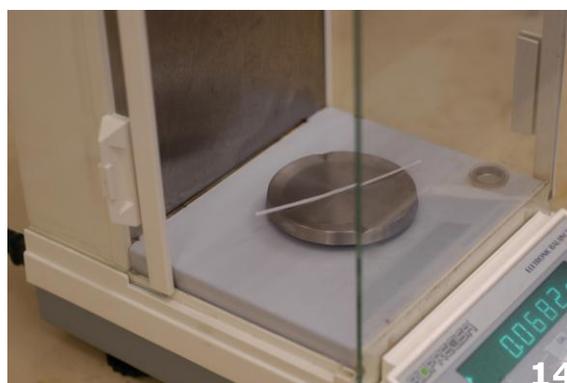




Figura 13 – Feixes de fibra de vidro dispostos em uma placa de Petri

Figura 14 – Pesagem dos feixes em balança de precisão

Figura 15 – Secagem da fibra de vidro em estufa à vácuo

4.3.1.4 Resistência à tração da fibra de vidro utilizada

A fibra de fibra de vidro utilizada foi submetida a um teste de resistência à tração. Foi confeccionada uma garra em aço inoxidável (adaptação do modelo 2715 Series Capston Grips, Instron, EUA) para a fixação da fibra de vidro. Em forma de carretel bipartido, o próprio enrolamento do espécime fixa o mordente móvel contra o fixo, e duas voltas são suficientes para uma fixação segura. Os mordentes aproveitam a carga como elemento de aperto e fixação. O formato circular e a superfície lisa, com a saída em tangência e ângulo de 75° da fenda, não oferecem qualquer risco de corte ou fratura ao encordoamento, além de permitirem uma distribuição uniforme da carga. Uma fixação inadequada poderia danificar os filamentos. (FIG. 16 a 18, APÊNDICE E).



Figura 16 – Garra em aço inoxidável



Figura 17 – Vista explodida em CAD

A garra foi montada em uma máquina de testes universal (Instron modelo 4444, Instron, EUA) (FIG. 19). A fibra de vidro foi enrolada nos carretéis, fazendo duas voltas para evitar possíveis deslizamentos.



Figura 19 – Fibra de vidro em teste de tração

O cálculo da resistência à tração foi obtido pela seguinte fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

onde:

F é a força máxima aplicada em newtons;

A é a área em m^2 .

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2$$

Por exemplo:

O espécime 1 resistiu a uma carga de 0,3223 KN.

O feixe de fibra tem 3468 filamentos com 9,6 μm de diâmetro.

Área de 1 filamento = 72,38 μm^2

Área do feixe = 72,38 * 3468 = 251013 μm^2 = 0,2510 mm^2 = 0,0000002510 m^2

322/0,0000002510 = 1284063745 N/m^2 = 1284 MPa

Os resultados com as mensurações de cada espécime e representação gráfica estão apresentados na TAB. 5 e GRAF. 3, respectivamente, APÊNDICE F.

4.3.1.5 Módulo de elasticidade da fibra de vidro utilizada

O módulo de elasticidade é o coeficiente angular da porção elástica ou linear da curva tensão-deformação. Atendendo ao enunciado da lei de Hooke, o módulo de elasticidade E , também chamado de *módulo de Young*, ou ainda de constante de proporcionalidade, nada mais é que a variação da tensão $\Delta\sigma$ dividida pela variação correspondente na deformação $\Delta\epsilon$ (CALLISTER JR, 2002).

$$\epsilon = \frac{l_i - l_o}{l_o}$$

onde:

l_o é o comprimento original antes de qualquer carga ser aplicada;

l_i é o comprimento instantâneo.

O resultado está apresentado na TAB. 6, APÊNDICE F. O comportamento carga-deslocamento da fibra de vidro está representado graficamente no mesmo apêndice.

4.3.2 Determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade dos compósitos

A resistência à compressão do compósito precisa ser suficiente para resistir aos esforços compressivos, a partir do momento em que houver transferência de carga da fibra previamente tracionada para a matriz resinosa (STOLL; SALIBA; CASPER, 2000). Ou seja, a força de compressão induzida pela recuperação dimensional da fibra (calculada no item 4.3.4) não pode ser maior que a resistência à compressão da matriz resinosa. Caso contrário, a matriz resinosa poderia ser comprimida acima de seu limite e vir a falhar. Uma resina subpolimerizada também poderia causar problemas, como perdas de protensão, devido ao possível escoamento resultante de um módulo de elasticidade muito baixo.

Os compósitos Quixfil U (Dentsply, Alemanha), de uso direto, e Adoro (Ivoclar Vivadent, Liechtenstein), de uso laboratorial, foram submetidos a um teste de resistência à compressão. O protocolo de fabricação dos espécimes e teste propriamente dito baseou-se na especificação n. 27 ADA. (FIG. 20 a 23).



Figura 20 – Cômputo de Quixfil e pistola aplicadora



Figura 21 – Resina de uso laboratorial Adoro



Figura 22 – Espécimes de Quixfil e matriz de aço inoxidável



Figura 23 – Espécimes de Adoro

Considerando que a transferência de carga da fibra de vidro para a resina composta será realizada poucos minutos após o término de sua polimerização, o teste de resistência à compressão também foi conduzido num prazo de até 1 h após a confecção do espécime. A resina Quixfil foi polimerizada com duas aplicações de 30 s (uma da cada lado). A resina de uso indireto Adoro foi polimerizada de duas formas distintas. Na primeira, foi polimerizada da mesma forma que a Quixfil. Como os resultados sugeriram uma polimerização incompleta (TAB. 7, APÊNDICE G), num segundo grupo os espécimes foram fotoativados com o fotopolimerizador (Optilux 501, Kerr, EUA) sob uma temperatura de 78 °C, proveniente de ar quente (Secador de cabelo Modelo SP2000, Britânia, Brasil), durante o tempo de 25 min, a fim de simular a condição de fabricação na unidade Targis Power Upgrade (Ivoclar, Liechtenstein). Esta forma de polimerização levou em consideração a condição de fabricação dos espécimes reforçados com fibra pré-tracionada, já que seria impossível a polimerização adicional na unidade Targis Power Upgrade (Ivoclar, Liechtenstein) juntamente com o dispositivo de protensão.

Como referência, outros dois grupos foram testados conforme a norma, com 24 h de armazenagem. Neste caso, o grupo controle da resina composta Adoro foi polimerizado inicialmente com o fotopolimerizador e em seguida, concluída a cura na unidade Targis Power Upgrade (Ivoclar, Liechtenstein).(QUADRO 6).

Material	Grupo	Polimerização	Armazenagem	N. amostras
Quixfil	Experimental	Fotopolimerizador (60s)	Até 1 h	5
	Controle	Fotopolimerizador (60 s)	24 h	5
Adoro	Experimental	Fotopolimerizador (60 s)	Até 1 h	5
	Experimental	Fotopolimerizador + calor durante 25 min.	Até 1 h	5
	Controle	Fotopolimerizador (60 s) + Unidade Targis Power Upgrade	24 h	5

Quadro 6 - Distribuição dos grupos para o teste de compressão

Os resultados estão apresentados na TAB. 7, APÊNDICE G.

4.3.3 Determinação da tensão de cisalhamento entre matriz-fibra por ensaio de arrancamento (*pull-out*)

A aderência interfacial entre fibra e matriz resinosa é necessária para garantir a transferência de carga sem perdas de protensão significativas. Devido a diferença do módulo de elasticidade entre as fases fibra e matriz, a força de cisalhamento se concentrará na interface (HAMPE et al., 1995). A determinação desta adesão foi realizada através do teste de *pull-out*. O método consiste, basicamente, em puxar a fibra da matriz resinosa.

Os filamentos do feixe de fibra de vidro foram alinhados e estabilizados com uma etiqueta adesiva. Os feixes foram cortados com uma tesoura nova e afiada (Mundial, Brasil) a fim de se obter um corte preciso e uniforme (FIG. 24 e 25). Cada feixe foi silanizado de acordo com o item 4.3.6.1, posteriormente descrito. A seguir, foi demarcado com grafite um comprimento de 0,3 mm, o qual foi impregnado com a resina de baixa viscosidade (FIG. 26 a 28).

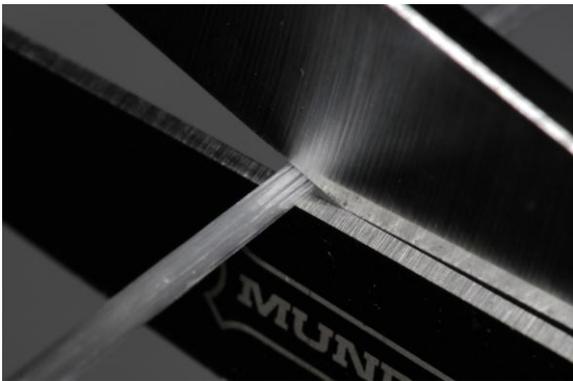


Figura 24 – Corte da fibra de vidro com tesoura

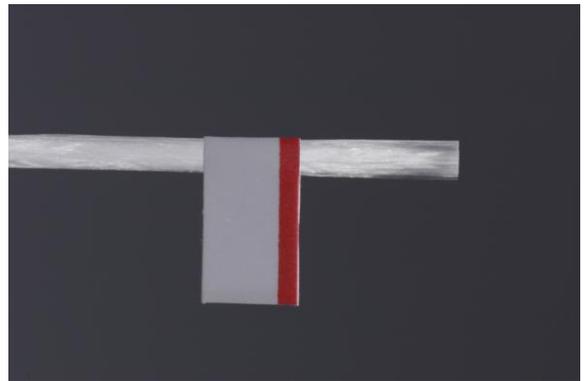


Figura 25 – Fibra cortada com filamentos estabilizados com uma etiqueta adesiva



Figura 26 – Demarcação do feixe com o auxílio de um estereoscópio (25X de aumento)

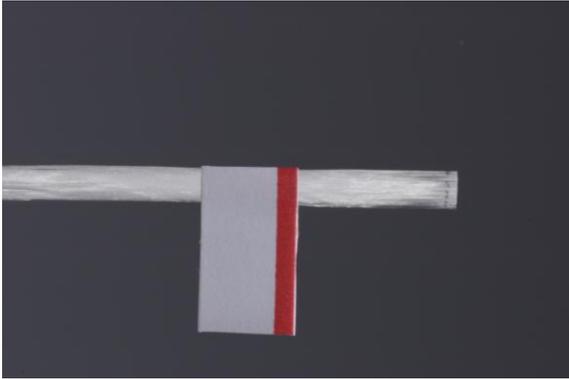


Figura 27 – Delimitação do segmento a ser embebido

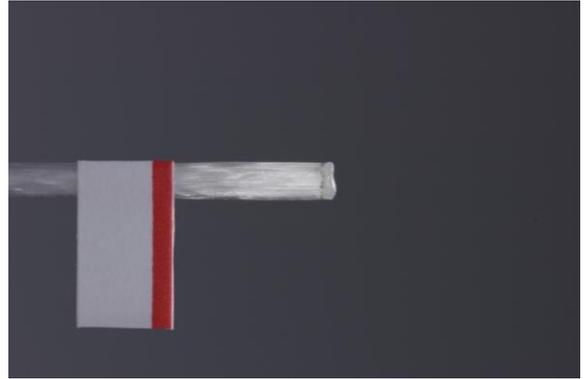


Figura 28 – Impregnação com resina composta de baixa viscosidade

Foi confeccionada uma matriz de Teflon⁴ para a obtenção dos discos de resina. A matriz foi preenchida com resina composta, e o nivelamento foi feito com uma espátula (FIG. 29 a 32)



Figura 29 – Matriz em Teflon®



Figura 30 – Preenchimento da matriz com resina composta

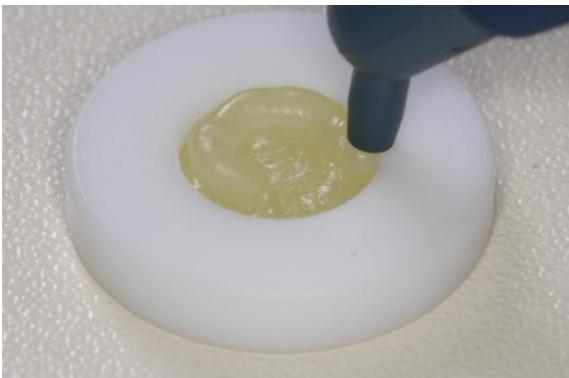


Figura 31 – Preenchimento da matriz com resina composta



Figura 32 – Acomodação da resina com espátula

⁴ Teflon® – marca registrada da Dupont para politetrafluoretileno

A seguir, o feixe foi inserido na resina observando-se o comprimento delimitado de 0,3 mm e o conjunto foi fotoativado com 3 aplicações de 30 s. Duas, no lado superior, e por fim, uma na base, após deslocar o disco da mesa de trabalho (FIG. 33 a 35).

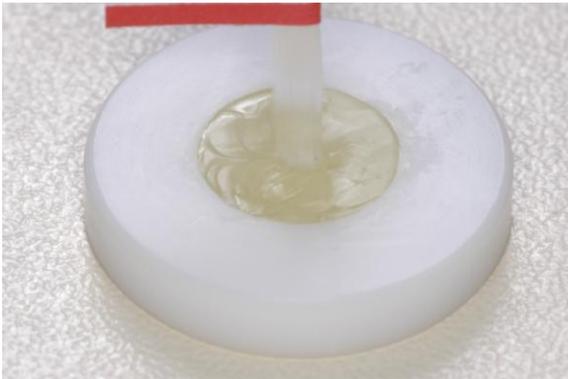


Figura 33 – Fibra inserida na resina composta



Figura 34 – Fotoativação



Figura 35 – Fotoativação final

Vinte espécimes foram confeccionados de acordo com o protocolo estabelecido no QUADRO 7. Imediatamente após a fotoativação, cada espécime foi removido da matriz de Teflon® e levado à máquina de testes universal para a realização do teste de *pull-out*. (FIG. 36 e 37). Para a ancoragem do disco de resina, necessária para o teste, foi utilizado um dispositivo especialmente confeccionado para tal (FIG. 38).



Figura 36 - Espécime pronto

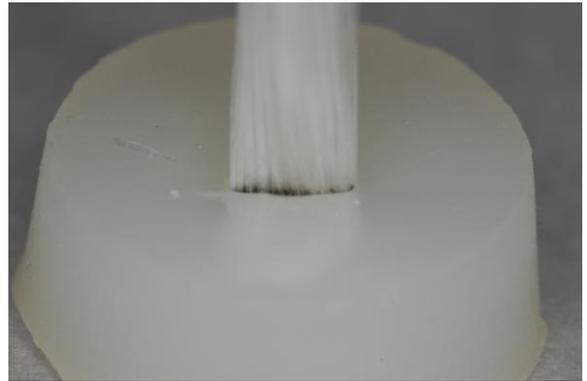


Figura 37 - Espécime pronto em detalhe



Figura 38 - Dispositivo retentor afixado na base da máquina de testes universal

Os espécimes foram confeccionados conforme o QUADRO 7:

Material	Impregnação (0,5mm)	Fotoativação total (s)	N. amostras
Quixfil	Filtek Z350 Flow	90	10
Adoro	Vectis Glue	90	10

Quadro 7 - Distribuição dos grupos para o teste de *pull-out*

Uma vez posicionado o disco, a fibra foi enrolada na garra conforme já descrito anteriormente no item 4.3.1.4., observando-se, neste caso, um comprimento de fibra livre de aproximadamente 10 cm. A velocidade de travessa foi de 1 mm/min. A máquina foi conectada a um computador pela interface IEEE 488 ⁵ e controlada pelo programa Instron Series IX (Fig. 39 e 40). Os gráficos foram gerados em sincronismo com a execução do teste. O tempo entre a finalização da fotoativação do espécime e o início do teste *pull-out* oscilou entre 8 e 12 min.



Figura 39 – Teste de *pull-out*



Figura 40 – Espécime após teste

O cálculo do teste de *pull-out* foi obtido pela seguinte fórmula:

$$\tau = \frac{P}{\pi dL}$$

onde:

⁵ Institute of Electrical and Electronic Engineers – Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation

- P é a força máxima aplicada em newtons;
- d é o diâmetro da fibra em milímetros
- L é o comprimento da fibra embebido pela matriz resinosa em milímetros

Os resultados estão apresentados nas TAB. 8 e 9 e GRAF. 4 e 5, dos APÊNDICES H e I.

4.3.4 Determinação da força de tração dos feixes de fibra de vidro

Considerando que a carga suportada pelo feixe de fibra de vidro utilizado⁶ atingiu 0,3375 KN, a construção dos espécimes com um reforço de dois feixes possibilitaria a tração máxima de 0,675 KN (68,91 Kg). Entretanto, os dois feixes foram pré-tracionados a uma carga total de 0,496 KN (50,65 Kg), ou 73,5% da resistência à tração máxima (STOLL; SALIBA; CASPER, 2000).

A resistência à compressão da resina direta Quixfil, no momento da transferência de carga foi 266 MPa. A resistência à compressão da resina de uso laboratorial Adoro, atingiu 353,46 MPa no momento da transferência de carga.

O pré-tracionamento dos cabos a 0,496KN, no momento da transferência de carga para a resina composta, induziu uma compressão nominal de 141 MPa, valor este notoriamente inferior àqueles apresentados nos ensaios compressivos.

⁶ Ver item 4.3.1.4 e Apêndice F: Tabela 5 – Mensurações, média da carga e resistência à tração do feixe de fibra de vidro

Cálculo da compressão induzida:

$$0,25 * 2 = 0,50 \text{ mm}^2 \text{ (área da secção de dois feixes da fibra de vidro)}$$

$$4 \text{ mm}^2 - 0,50 \text{ mm}^2 = 3,50 \text{ mm}^2 \text{ de secção de resina} = 0,0000035 \text{ m}^2$$

$$50,65 \text{ Kg} = 496 \text{ N}$$

$$\text{Compressão} = F/a$$

$$\text{Compressão} = 496 \text{ N} / 0,0000035 \text{ m}^2 = 141 \text{ MPa}$$

4.3.5 Determinação do alongamento do feixe de fibra de vidro

A determinação do alongamento do feixe de fibra, sob a força da tração de 0,248 KN (73,5% da resistência à tração máxima, foi realizada na máquina de testes universal (Instron modelo 4444, Instron, EUA). O feixe foi enrolado nos carretéis conforme já descrito no item 4.3.1.4. Sob uma tração mínima, suficiente para uma retificação, com o auxílio de um paquímetro, o feixe foi demarcado com grafite em dois pontos distantes entre si 10 cm (FIG. 41). A máquina foi acionada no sentido tração até a força de 0,248 KN, momento em que foi acionado o botão de parada e a distância entre as marcas de grafite foi novamente anotada (FIG. 42). Foi descartada a possibilidade da utilização do próprio extensômetro da máquina de testes pela dificuldade em se dissociar o deslizamento inicial do feixe no carretel da extensão real da fibra sob a carga proposta.

Em cada 10 cm lineares, foi registrado aproximadamente 1,2 mm de alongamento. Isso representa um percentual de alongamento de 1,2% sob uma carga de 0,248 KN.



Figura 41 - Demarcação com grafite



Figura 42 - Medição do alongamento com paquímetro

4.3.6 Construção dos espécimes para os testes flexurais

4.3.6.1 Silanização e impregnação da fibra de vidro

Os feixes de fibra de vidro foram cortados em um comprimento de 105 cm com o auxílio de uma fita métrica, e dispostos lado a lado sobre uma mesa. A impregnação foi realizada somente num segmento de aproximadamente 6 cm. Para isso, o feixe foi previamente demarcado com grafite. A seguir, os feixes foram silanizados (Silano, Angelus, Brasil) por gotejamento. Após 1 min de saturação, o excesso foi removido com um lenço absorvente (Kiss, Santher, Brasil). A secagem foi realizada com ar aquecido (Secador de cabelo Modelo SP2000, Britânia, Brasil), a 78 °C durante 30 min, para a evaporação dos solventes do agente silano. A temperatura foi monitorada com um sensor térmico (Termo-higrômetro HT-210, Instrutherm, Brasil). (FIG. 43 a 47) (KARACAER et al., 2003).

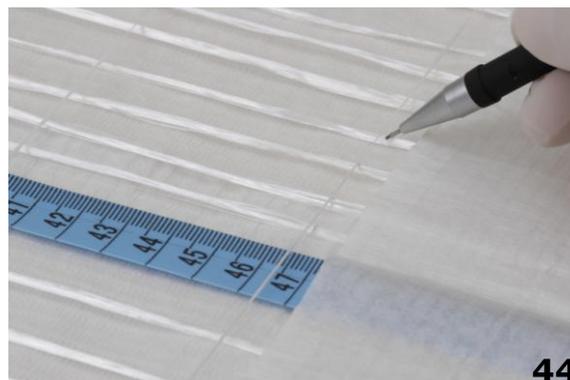
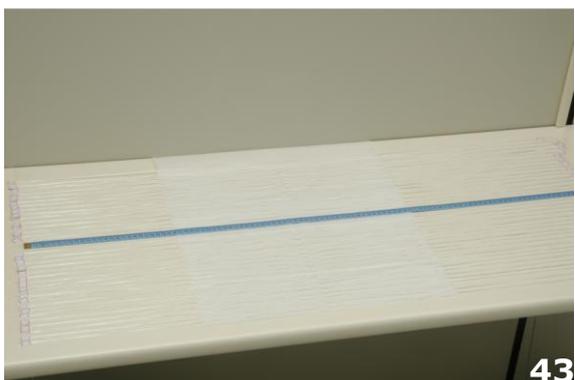


Figura 43 – Fibras dispostas sobre uma mesa

Figura 44 – Delimitação do segmento útil

Figura 45 – Silanização por gotejamento

Figura 46 – Remoção dos excessos de silano com papel absorvente

Figura 47 – Secagem das fibras com ar aquecido

Uma vez secos, os feixes de fibra de vidro foram impregnados com resina composta de baixa viscosidade durante 24 h (LASTUMAKI; LASSILA; VALLITTU, 2003). Nos grupos confeccionados com a resina composta Quixfil, a fibra de vidro foi impregnada com a resina de baixa viscosidade Filtek Z 350 (3M ESPE, EUA) e naqueles feitos com a resina laboratorial Adoro, com a resina Vectris Glue (Ivoclar Vivadent,

Liechtenstein), especialmente desenvolvida para utilização laboratorial com o sistema Adoro.

As resinas de baixa viscosidade foram dispensadas em um recipiente plástico (Trilux Ruthinium, Ruthibras, Brasil) (FIG. 48 e 49). Este recipiente, originalmente utilizado como suporte para dentes de estoque, foi devidamente limpo com água fervente e álcool até a ausência completa de qualquer vestígio de cera utilidade. Os feixes foram imersos um a um na resina com o auxílio de uma espátula (Suprafill Cyann #2, SSWhite Duflex, Brasil) (FIG. 50) até completar 10 feixes por recipiente (FIG. 51). O conjunto permaneceu coberto por uma caixa escura até o momento da utilização.



Figura 48 e 49 – Recipiente para impregnação da fibra por imersão

Figura 50 – Acondicionamento da fibra com auxílio de uma espátula

Figura 51 – Feixes impregnados

4.3.6.2 Confeção dos espécimes reforçados com fibra pré-tracionada

Foi desenvolvido um dispositivo para a construção dos espécimes reforçados com fibra pré-tracionada (FIG. 52). Uma garra de aço inoxidável (a mesma descrita no item 4.3.1.4) foi montada na parede da plataforma em forma de "L", confeccionada em madeira de cabriúna. Na outra extremidade, foi afixada uma roldana. No centro da plataforma um cavalete, com possibilidade de ajuste fino de alinhamento, suporta duas lâminas de vidro e uma matriz de aço inoxidável, composta por duas placas com 2 mm de espessura e separadas por 2 mm. A planta detalhada do dispositivo está apresentada na FIG. 53, APÊNDICE J.

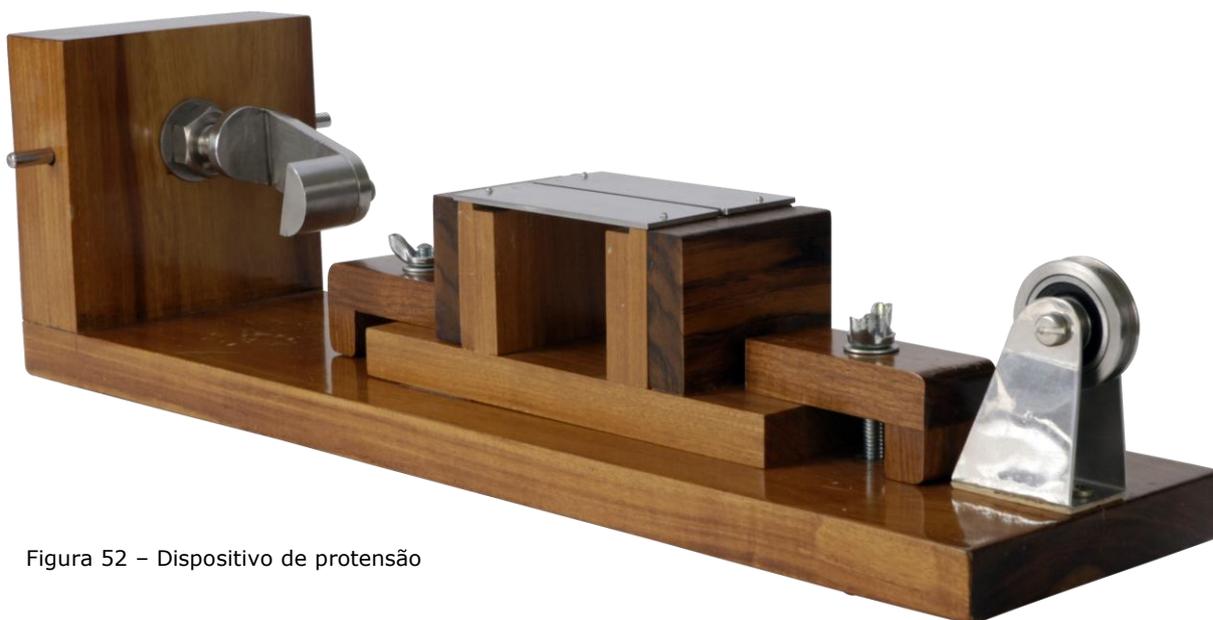


Figura 52 – Dispositivo de protensão

Uma vez impregnados, os feixes de fibra foram inicialmente dispostos sobre uma lâmina de vidro antes de serem montados no dispositivo de pré-tracionamento (FIG. 54). A leve pressão de uma espátula contra o feixe possibilitou a remoção de parte do excesso de resina de baixa viscosidade.

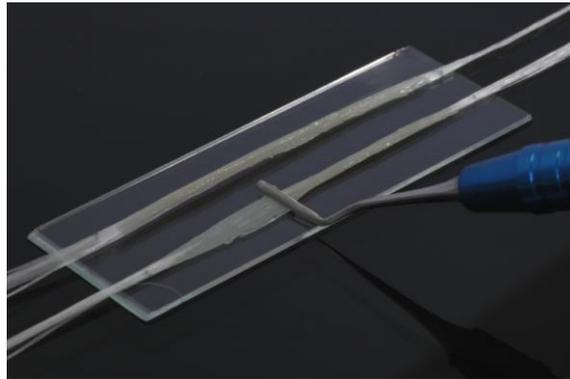
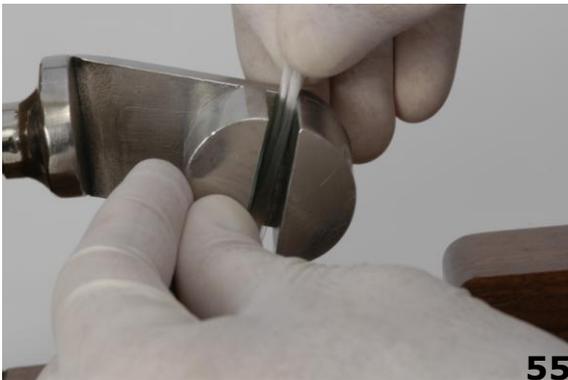


Figura 54 – Remoção de excessos

Dois feixes de fibra de vidro foram afixados ao dispositivo por suas extremidades através da garra. O feixe é passado da parte externa em direção a região axial da garra (FIG. 55). O mordente livre então pressiona os feixes contra o mordente fixo e inicia-se o enrolamento até completar duas voltas (FIG. 56 e 57). É recomendado o manuseio das fibras com luvas de látex, para proteger as mãos dos microfilamentos, bem como a utilização de máscara facial.



55



56



57

Figura 55 – Inserção dos feixes

Figura 56 – Enrolamento nos carretéis

Figura 57 – Feixes de fibra aprisionados pela garra

O dispositivo foi construído com base no aproveitamento da força da gravidade como elemento de tração. Os feixes de fibra seguiram até a extremidade do dispositivo onde foram conduzidos por uma roldana até a segunda garra de fixação, adaptada a um suporte para anilhas de ferro (Neofit, Brasil). A colocação de anilhas, previamente aferidas, permitiu o controle da tração desejada. (FIG. 58 e 59).



Figura 58 – Detalhe do feixe de fibra de vidro sobre a roldana

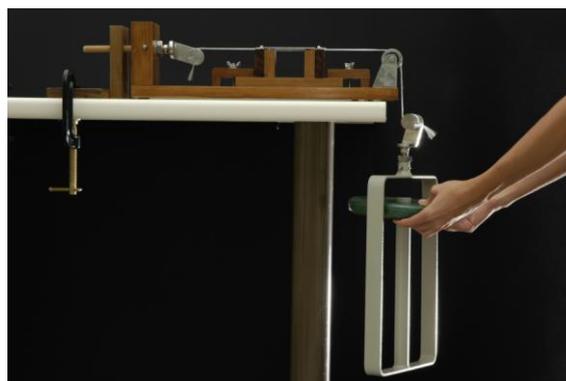


Figura 59 – Colocação de anilhas de ferro empilhadas em suporte (tracionamento da fibra de vidro)

Dois alfinetes (particular, Brasil) promoveram uma separação vertical de 1 mm entre os feixes, de modo que a localização do reforço de fibra de vidro ficasse simetricamente na base e no topo dos espécimes. Uma tira de poliéster (Quimidrol, Brasil) foi posicionada entre a lâmina de vidro e o feixe inferior para evitar aderências indesejáveis. Foi obtido um espaçamento de aproximadamente 0,1 mm abaixo do feixe inferior através de dois calços nas cabeceiras do cavalete, obtidos com tiras de poliéster dobradas. (FIG. 60 e 61).



Figura 60 – Feixes montados no dispositivo



Figura 61 – Detalhe da separação de 1mm promovida pelo alfinete

Os feixes foram tracionados inicialmente com uma carga de aproximadamente 7 Kg. Sob esta força de tração, foi removido o excedente de resina composta de baixa viscosidade com o auxílio de uma espátula (Suprafill Cyann #2, SSWhite Duflex, Brasil) (FIG. 62).



Figura 62 – Remoção do excedente de resina composta de baixa viscosidade

No passo seguinte, as placas da matriz de aço inox foram alinhadas aos feixes já tensionados. Uma vez obtido o paralelismo entre a matriz e os feixes, o cavalete foi afixado com o aperto manual das porcas borboleta (FIG. 63 a 65).

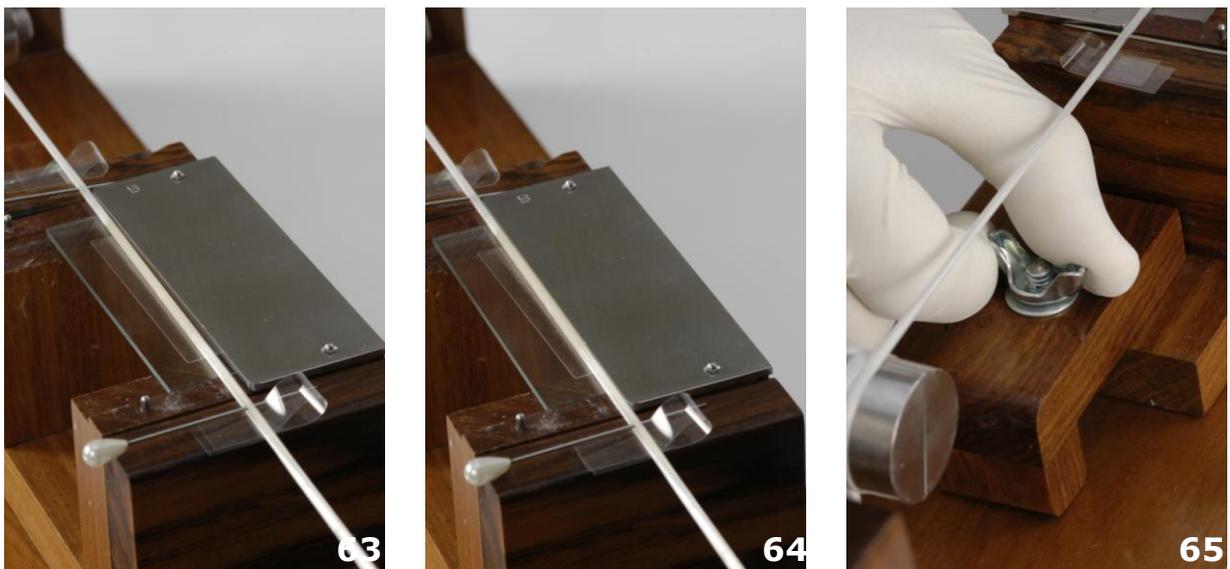


Figura 63 – Feixes desalinhados

Figura 64 – Alinhamento dos feixes

Figura 65 – Fixação do cavalete com porca borboleta

4.3.6.3 Inserção da resina composta e fotoativação

A resina composta foi pré-aquecida a uma temperatura de 50 °C, com o objetivo único de diminuir a viscosidade, tornando mais fácil a inserção e a acomodação aos feixes de fibra. As matrizes de aço inox foram removidas e a inserção feita lateralmente com o preenchimento do espaço entre os feixes. Nos grupos em que foi utilizado a resina direta Quixfil, a aplicação foi executada com o próprio cômputo, montado em uma pistola, e em seguida complementada com uma espátula. Nos grupos feitos com a resina laboratorial Adoro, a inserção e acomodação do compósito foi realizada somente com espátula (FIG. 66 e 67).



Figura 66 – Inserção da resina Quixfil

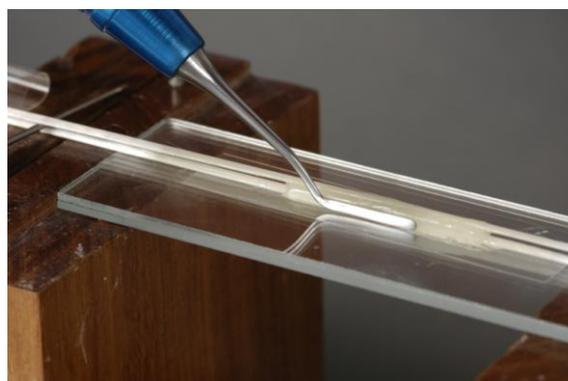


Figura 67 – Adaptação da resina aos feixes

As matrizes de aço inox foram então novamente posicionadas, fazendo o excesso de resina escoar pela fenda. Com a carga de tração elevada para aproximadamente 22 Kg - 4 anilhas de 5 Kg - a resina foi pressionada com uma espátula sobre os feixes de fibra de vidro a fim de minimizar a formação de bolhas de ar (FIG. 68). Com esta carga, os feixes ficam mais "permeáveis" ao escoamento da resina composta durante a manobra de acomodação. Em seguida, os feixes foram tracionados com 496N (50,65

Kg). O tracionamento foi realizado de forma gradual, através do carregamento do suporte com as anilhas uma a uma, até atingir o peso de 50,65 Kg (FIG. 69).

A pesagem das anilhas está apresentada na TAB. 10, APÊNDICE K.

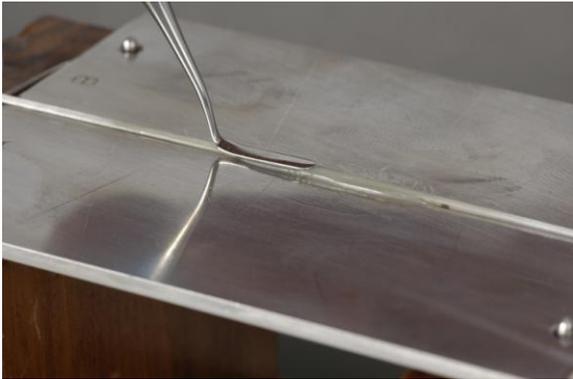


Figura 68 – Acomodação da resina com espátula



Figura 69 – Pré-tracionamento da fibra com carga de 50,65 Kg

Na seqüência, uma tira de poliéster foi posicionada e sobre ela foi pressionada uma lâmina de vidro para o completo escoamento da resina. A lâmina de vidro foi estabilizada bilateralmente com prendedores para papel. A centralização dos feixes em relação à fenda foi conferida. Qualquer desalinhamento foi prontamente corrigido com mínimos movimentos do cavalete e reaperto das porcas borboleta (FIG. 70 a 72).



Figura 70 – Tira de poliéster sobre a resina em nítido excesso



Figura 71 – Colocação de uma lâmina de vidro

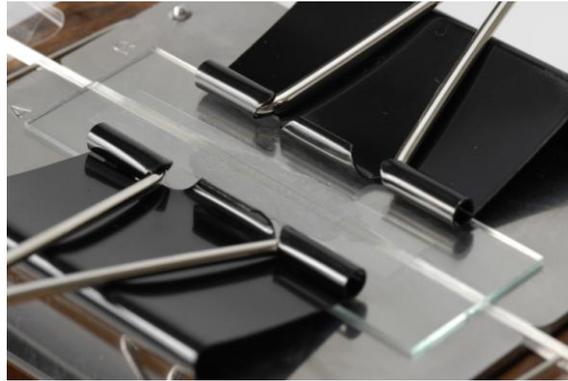


Figura 72 – Fixação da lâmina com prendedores de papel

A fotopolimerização foi realizada com um aparelho de luz halógena (Optilux 501, Kerr, EUA). Uma fotoativação inicial de poucos segundos permitiu a remoção dos prendedores e da lâmina de vidro. Em seguida, foi realizada a fotoativação de forma plena, com aplicações de 30 s alternadas entre o lado superior e inferior das placas. A cada aplicação, a ponteira, com 10 mm de diâmetro, foi movimentada 5 mm, com auxílio de uma régua milimetrada, até completar o comprimento total da resina escoada. Tal procedimento garante uma exposição uniforme à luz emitida. A intensidade de luz foi constantemente aferida no radiômetro do próprio aparelho. A leitura da potência emitida oscilou entre 550 e 650 mw/cm^2 (FIG. 73 a 76).



Figura 73 – Fotopolimerizador Optilux 501



Figura 74 – Fotoativação inicial



Figura 75 – Fotoativação em intervalos de 5mm



Figura 76 – Fotoativação reversa

Para os grupos Adoro, além do protocolo citado no parágrafo anterior, na seqüência foi realizada uma polimerização adicional combinando-se luz halógena e calor, pelo tempo de 25 min. A luz foi aplicada sob constante aquecimento proveniente de ar aquecido a 78 °C (Secador de cabelo Modelo SP2000, Britânia, Brasil). No teste piloto, relatado nas TAB. 11 e 12, Apêndice L, a resina Adoro foi polimerizada somente com luz halógena, descumprindo as recomendações do fabricante. Houve uma evidente perda de protensão pela polimerização insuficiente da resina de uso indireto.

4.3.6.4 Transferência de carga à resina

Finalizada a fotoativação, foi esperado 10 min para iniciar a transferência de carga da fibra para a resina composta (LEUNG; FAN; JOHNSTON, 1983; STANSBURY, 2000; UCTASLI et al., 2005). As anilhas foram retiradas uma de cada vez (FIG. 77 e 78), e por fim, o suporte foi liberado dos feixes. A força compressiva, resultante da recuperação dimensional da fibra, foi facilmente percebida pelo deslocamento do espécime em relação à matriz e pelo enrugamento dos excedentes de resina sobre as placas. Além disso, duas marcas feitas com grafite na superfície do espécime permitiram medir com um paquímetro a variação linear, em 25 mm, após a manobra de protensão (FIG. 79 e 80).

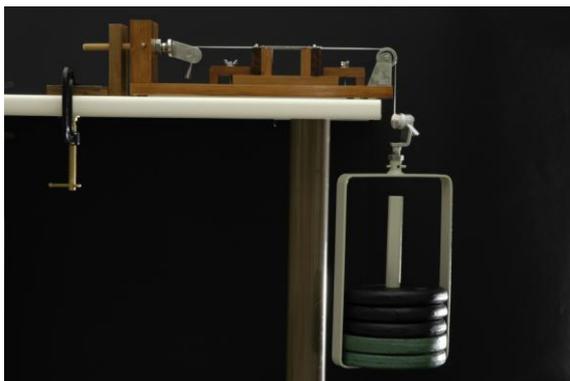


Figura 77 – Protensão do espécime: remoção das anilhas

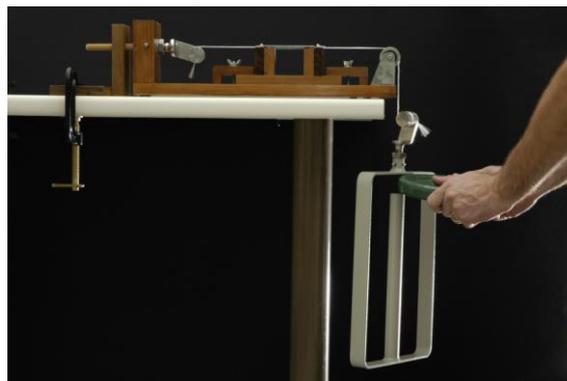


Figura 78 – Protensão do espécime: remoção da última anilha



Figura 79 – Marcas no espécime antes da transferência da carga



Figura 80 – Espécime protendido

Os feixes de fibra foram cortados com uma tesoura e os espécimes foram cuidadosamente liberados das matrizes de inox (FIG. 81). Cada espécime foi etiquetado com dados relativos ao grupo pertencente, data/hora, temperatura e umidade relativa do ar no momento da confecção.



Figura 81 – Espécime removido do dispositivo

Em seguida, os espécimes confeccionados em Quixfil foram submetidos aos procedimentos de acabamento (descritos no item 4.3.6.7). Já aqueles confeccionados com a resina laboratorial Adoro, antes do acabamento, sofreram uma segunda polimerização em unidade especial Targis Power Upgrade. Foi utilizado o programa "1", onde a temperatura atinge 95 °C na maior parte dos 25 min do ciclo (FIG. 82 e 83).



Figura 82 – Unidade Targis Power Upgrade

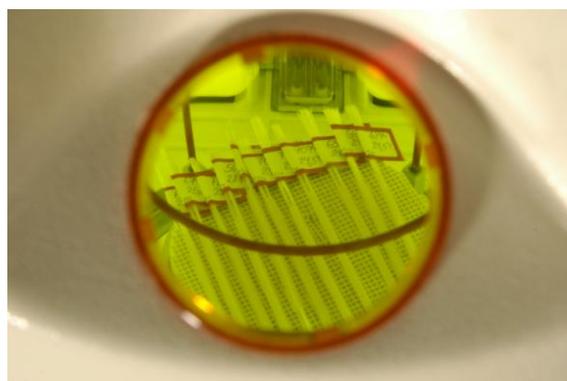


Figura 83 – Vista da polimerização dos espécimes através da escotilha

4.3.6.5 Confeção dos espécimes dos grupos controle

a) sem reforço com fibra

Os grupos controle "Adoro sem fibra" e "Quixfil sem fibra", foram confeccionados aproveitando-se o dispositivo de protensão, seguindo-se o mesmo protocolo de inserção da resina, conformação, polimerização e acabamento.

b) reforçados com fibra não tracionada

Os grupos "Adoro convencional" e "Quixfil convencional" foram reforçados com fibra, porém sem pré-tracionamento. Os feixes foram tracionados inicialmente com uma carga de aproximadamente 22 Kg, com o objetivo de manter o mesmo posicionamento dos feixes pré-tracionados dos grupos experimentais. Uma vez alinhados e com a resina

composta já inserida e conformada com a lâmina de vidro, a carga de tração foi completamente removida. Em seguida, foram realizados a fotoativação e os demais procedimentos conforme o protocolo anteriormente descrito, incluindo a segunda polimerização nos espécimes confeccionados com a resina Adoro.

4.3.6.6 Distribuição dos grupos

Os espécimes foram distribuídos da seguinte forma: (QUADRO 8).

Grupo	Resina	Impregnação	Reforço	N. de espécimes
Adoro (G1)	Adoro	-	-	10
Adoro convencional (G2)	Adoro	Vectris Glue	Fibra de vidro	10
Adoro protendido (G3)	Adoro	Vectris Glue	Fibra de vidro pré-tracionada	10
Quixfil (G4)	Quixfil U	-	-	10
Quixfil convencional (G5)	Quixfil U	Filtek Z 350 flow	Fibra de vidro	10
Quixfil protendido (G6)	Quixfil U	Filtek Z 350 flow	Fibra de vidro pré-tracionada	10

Quadro 8 - Distribuição dos grupos para os testes flexurais

4.3.6.7 Procedimentos de acabamento dos espécimes

A fibra de vidro não recoberta com resina composta foi cortada com um disco diamantado (Komet, Alemanha) (FIG. 84). Em seguida, o topo dos espécimes foi desbastado com um disco flexível (Sof-Lex 1982C 3M, EUA) até o espécime atingir um comprimento de cerca de 26 mm (FIG. 85).

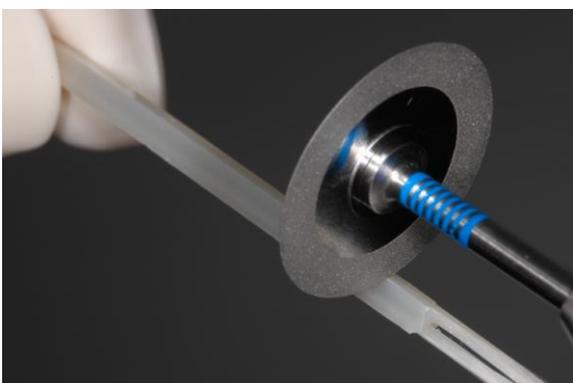


Figura 84 – Corte com disco diamantado ultrafino

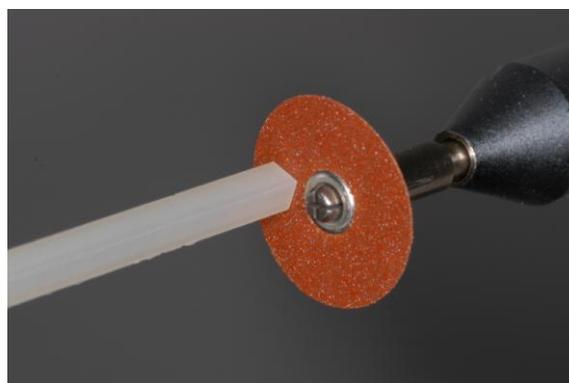


Figura 85 – Desbaste com disco flexível Sof-Lex

Em seguida, os espécimes foram retificados sobre uma lixa de granulação 1200 (Carborundum, Brasil). As rebarbas, resultantes da conformação, foram removidas e as duas dimensões da secção foram conferidas com paquímetro em 3 pontos do espécime (FIG. 86 a 89).

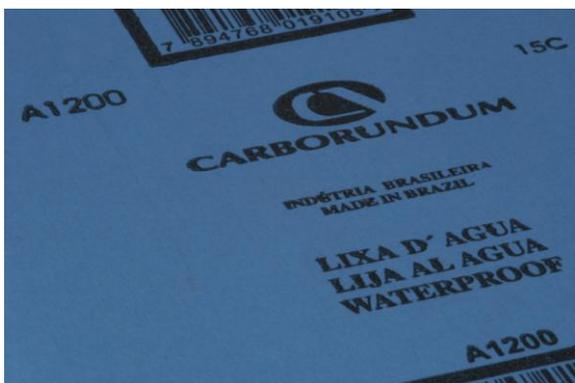


Figura 86 – Lixa d'água 1200

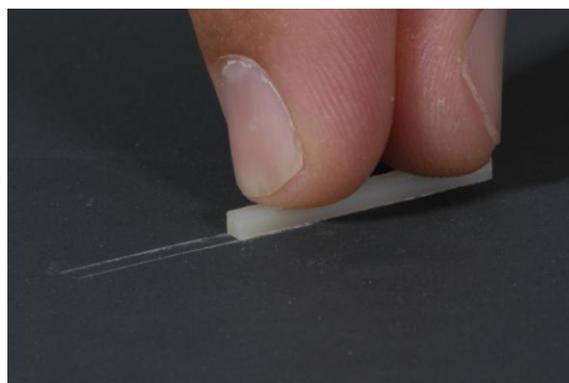


Figura 87 – Remoção das rebarbas



Figura 88 – Medição com paquímetro



Figura 89 – Medição em detalhe

O comprimento de 25 mm foi obtido por retificação com lixa 1200. O espécime foi deslizado a 90 graus, em relação à lixa, com a ajuda de um taco posicionador de madeira (FIG. 90 e 91). Os espécimes finalizados são mostrados nas FIG. 92 e 93.



Figura 90 – Dispositivo para lixar o topo do espécime



Figura 91 – Acabamento com lixa 1200

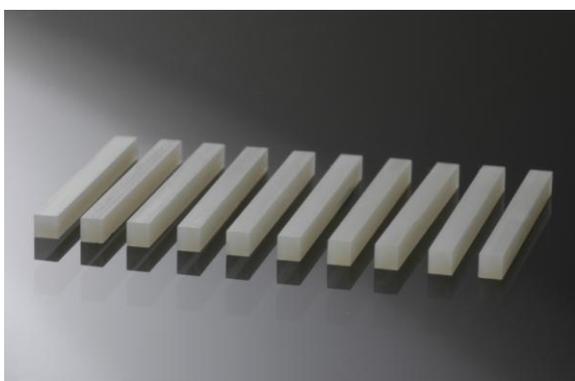


Figura 92 – Espécimes após acabamento

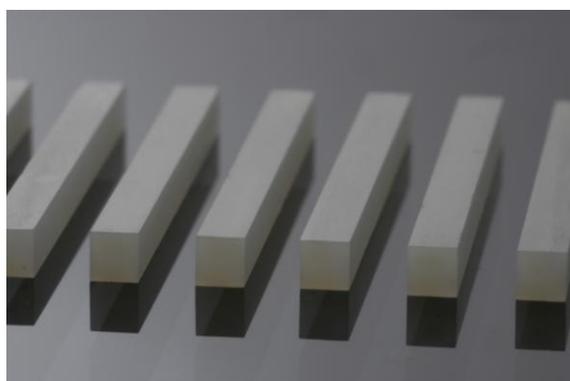


Figura 93 – Vista em detalhe dos espécimes

Atendendo às especificações da norma ISO 10477, ao final do acabamento os espécimes deveriam respeitar as dimensões mostradas abaixo (FIG. 94). Um resumo das propriedades de cada uma das fases constituintes do espécime está apresentado nas caixas de texto.

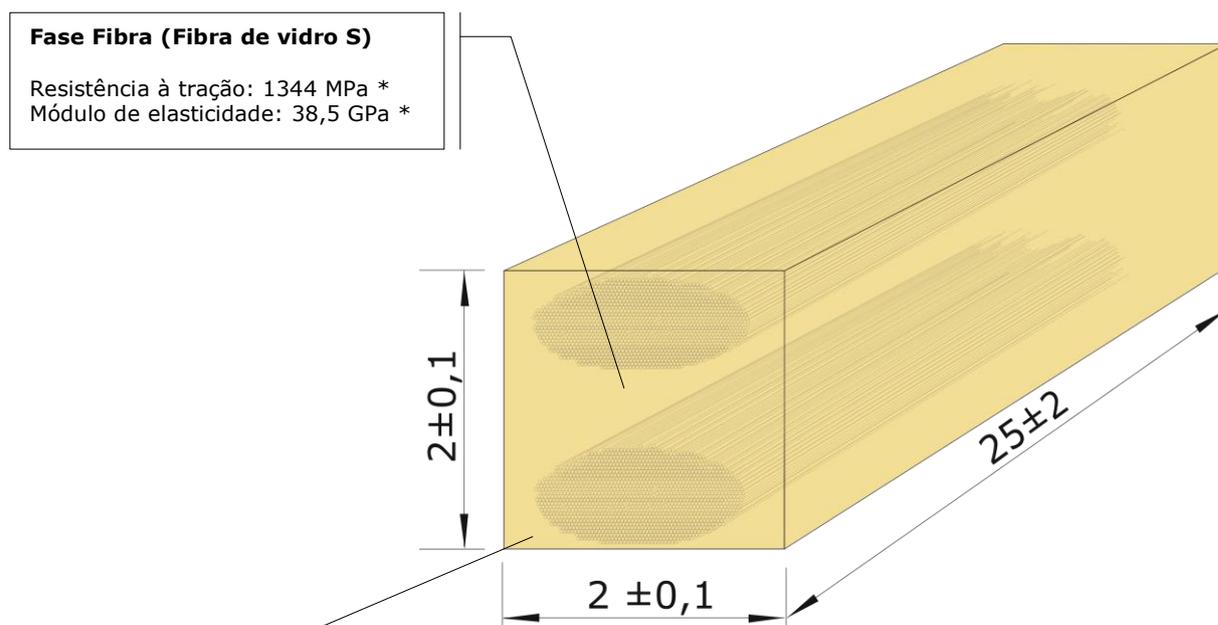


Figura 94 – Dimensões em milímetros

* Valores obtidos no presente estudo

** Valores divulgados pelo fabricante

4.3.7 Pesagem dos espécimes

Os espécimes foram pesados em uma balança de precisão. Com estes valores, foi possível estabelecer o percentual em peso de fibra de vidro para cada espécime.

4.3.8 Teste flexural

Após 24 h de armazenagem em água destilada a 37 ± 1 °C, os espécimes foram submetidos a um teste flexural de 3 pontos. Uma máquina de testes universal com célula de carga de 2 KN (Instron 4444, Instron, EUA) foi utilizada para a realização dos testes flexurais (FIG. 95 e 96). A velocidade de travessa foi de 0,7 mm/min (ISO 10477, 1992).



Figura 95 – Máquina de testes universal Instron 4444



Figura 96 – Detalhe da célula de carga – capacidade de 2 KN

O teste flexural permitiu a determinação do módulo flexural, do momento da falha inicial da fase resina composta e da resistência flexural (FIG. 97). A máquina foi controlada pelo programa *Series IX* (Instron, EUA) através da interface IEEE 488. Foram gerados arquivos no formato CSV ⁷, compatíveis com o programa Microsoft Excel, os quais contém todas as coordenadas relativas a carga e deslocamento de cada espécime.

Os valores de deslocamento, doravante chamado de “deflexão” foram tidos como nominais, uma vez que a posição inicial da travessa não coincidirá, necessariamente, com o toque no espécime. Essa discrepância foi subtraída dos valores lidos originando a deflexão real, que foi utilizada no cálculo do módulo flexural e na determinação do momento de falha inicial.

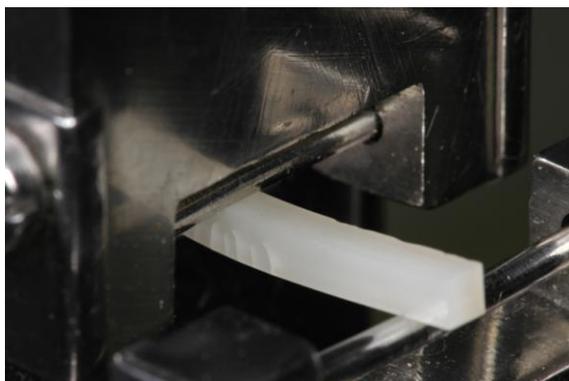


Figura 97 – Teste flexural

⁷.CSV – *Comma Separated Values* (Arquivo com valores separados por vírgulas)

O módulo flexural E , em megapascals, foi determinado no intervalo não destrutivo, através da seguinte equação (ISO 10477, 1992):

$$E = \frac{l^3 \times F_1}{4fbh^3}$$

onde:

- F_1 é a força, em newtons, num determinado ponto da curva força/deformação dentro do intervalo de proporcionalidade;
- f é a deflexão do espécime, em milímetros, na carga F_1 .
- l é a distância entre os apoios, em milímetros, neste caso, 20 mm;
- b é a largura do espécime em milímetros;
- h é a altura do espécime em milímetros.

O momento de falha inicial da resina foi flagrado com o som de “click”, visualmente (pela percepção do surgimento de uma trinca a partir da base do espécime), ou ambos (FIG. 98) (DYER et al., 2004). No instante da falha, foi realizada a fotografia do painel da máquina de testes, registrando os valores força, em kilonewtons, e a correspondente deflexão, em milímetros (FIG. 99 e 100)



Figura 98 – Falha inicial confirmada pela trinca



Figura 99 – Fotografia do painel da máquina de testes

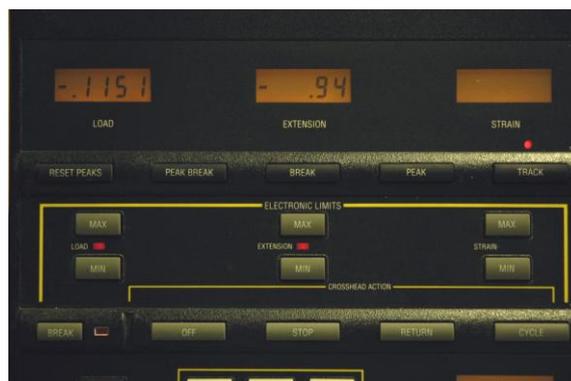


Figura 100 – Valores "Força" e "Deflexão"

O cálculo da resistência flexural, σ , em megapascals, exigiu a destruição completa do espécime e foi obtido pela seguinte equação (ISO 10477, 1992):

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bh^2}$$

onde:

F é a força máxima aplicada em newtons;

l, b e h estão definidos acima.

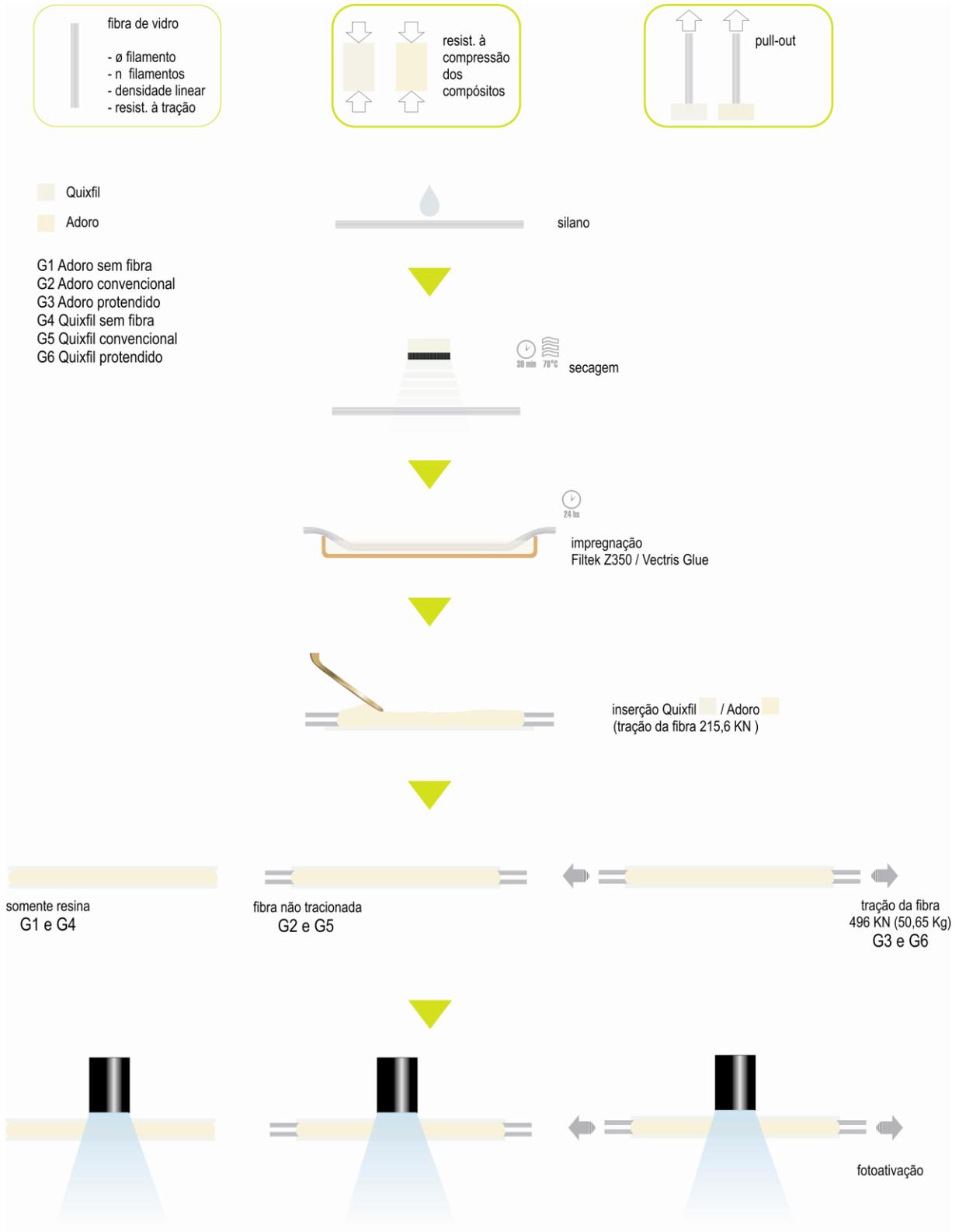
4.3.9 Análise estatística dos dados do teste flexural

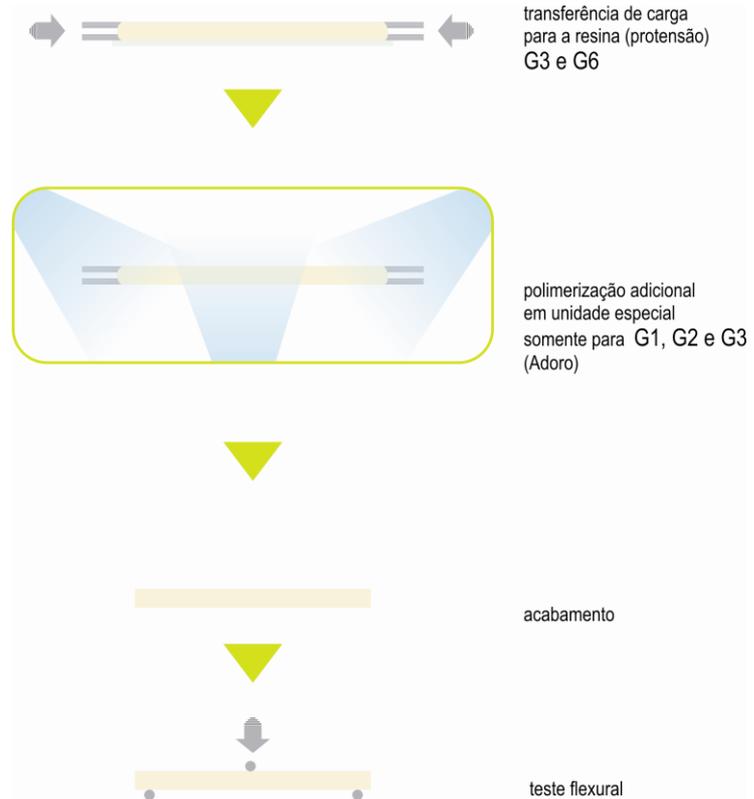
Os dados referentes ao módulo flexural, momento de falha inicial e resistência flexural foram submetidos à análise estatística pelo teste de análise de variância (ANOVA) e, nos casos de rejeição da hipótese de igualdade entre os grupos, foram realizados os testes *post hoc* de comparações múltiplas de Tukey HSD, em nível de

significância de 95%. O pacote estatístico utilizado foi o Statistica 6.0 (StatSoft, Tulsa, OK, EUA).

Dentro de cada resina composta, em seus grupos experimentais, foi realizado uma análise estatística de correlação entre Módulo flexural, resistência flexural e momento de falha inicial. O teste estatístico executado foi o de coeficiente de correlação de Pearson, sendo também calculado o coeficiente de determinação. O pacote estatístico utilizado foi o Statistica 6.0 (StatSoft, Tulsa, OK, EUA).

4.3.10 Síntese do experimento





Resultados

5 RESULTADOS

Os resultados serão apresentados separadamente para os grupos confeccionados com a resina de uso laboratorial Adoro e a de uso direto Quixfil, uma vez que a comparação entre os grupos Adoro e Quixfil não faz parte dos objetivos deste trabalho, mas sim o efeito da protensão sobre as propriedades flexurais destas resinas.

5.1 PARA A RESINA DE USO LABORATORIAL ADORO

Os resultados com dados completos de todos os espécimes podem ser encontrados nas TAB. 15 a 17, APÊNDICES N a P. As respectivas representações gráficas (carga/deflexão) estão apresentadas nos GRAF. 6 a 8, APÊNDICES T e U.

5.1.1 Módulo Flexural

A TAB. 18 apresenta a estatística descritiva do módulo flexural (MPa) do grupo Adoro em seus 3 diferentes grupos experimentais.

Tabela 18 – Estatística descritiva do módulo flexural (MPa) para a resina Adoro

Grupo	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão	-95%	95%
Adoro sem fibra	10	3819,35	115,86	36,64	3736,47	3902,23
Adoro convencional	10	10089,20	379,63	120,05	9817,63	10360,78
Adoro protendida	10	10735,21	267,87	84,71	10543,58	10926,83

O teste estatístico de análise de variância (ANOVA) rejeitou a hipótese de igualdade entre os grupos com $p=0,00$. O teste *post hoc* de Tukey HSD indicou os valores de p , na comparação grupo a grupo, conforme demonstra a TAB. 19.

Tabela 19 – Teste *post hoc* de Tukey HSD. Valores de $p < 0,05$ denotam diferença estatisticamente significativa entre os grupos.

Grupo	Adoro sem fibra	Adoro convencional	Adoro protendida
Adoro sem fibra	-	0,000127	0,000127
Adoro convencional	0,000127	-	0,000167
Adoro protendida	0,000127	0,000167	-

Uma representação gráfica do módulo flexural da resina Adoro em seus diferentes grupos experimentais é apresentada no GRAF. 9.

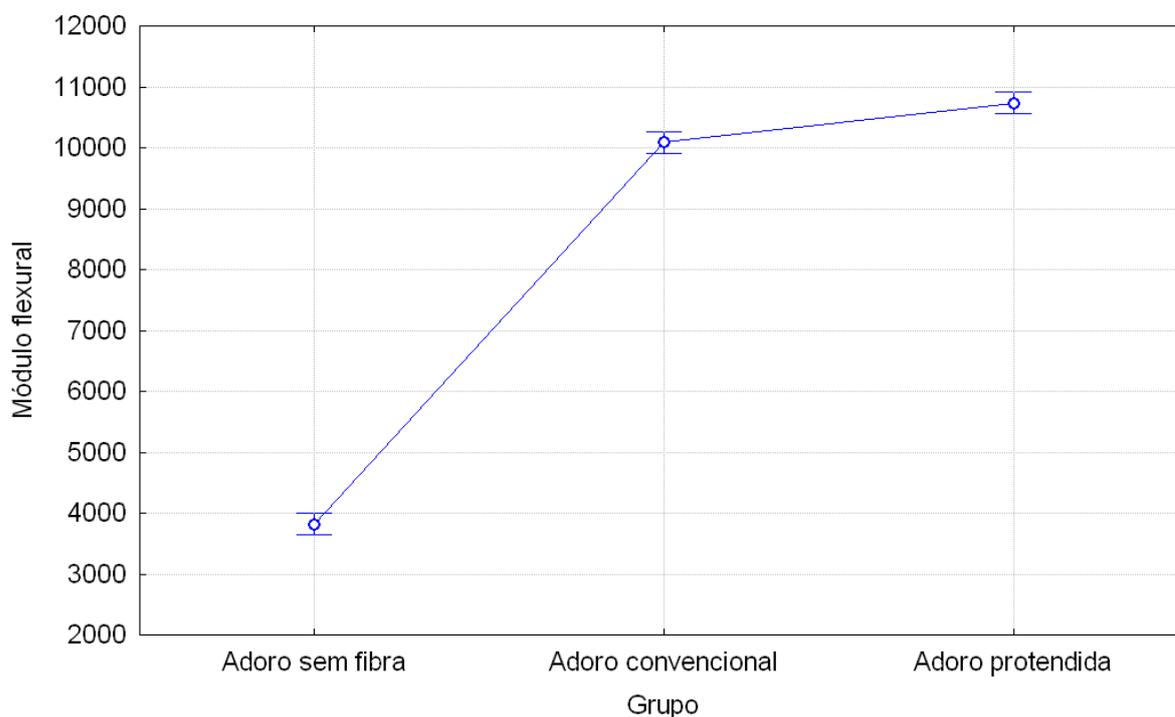


Gráfico 9 – Representação do módulo flexural da resina Adoro em seus diferentes grupos experimentais. Os valores estão apresentados em Mpa. As barras verticais denotam o intervalo de confiança de 95%.

5.1.2 Falha inicial

A TAB. 20 apresenta a estatística descritiva da falha inicial (mm) da resina Adoro em seus três diferentes grupos experimentais.

Tabela 20 – Estatística descritiva da falha inicial (mm) para a resina Adoro

Grupo	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão	-95%	95%
Adoro sem fibra	10	0,745100	0,096032	0,030368	0,676403	0,813797
Adoro convencional	10	0,853870	0,132718	0,041969	0,758929	0,948811
Adoro protendida	10	1,358540	0,134158	0,042425	1,262569	1,454511

O teste estatístico de análise de variância (ANOVA) rejeitou a hipótese de igualdade entre os grupos com $p=0,00$. O teste *post hoc* de Tukey HSD indicou os valores de p , na comparação grupo a grupo, conforme demonstra a TAB. 21.

Tabela 21 – Teste *post hoc* de Tukey HSD. Valores de $p < 0,05$ denotam diferença estatisticamente significativa entre os grupos

Grupo	Adoro sem fibra	Adoro convencional	Adoro protendida
Adoro sem fibra	-	0,134245	0,000127
Adoro convencional	0,134245	-	0,000127
Adoro protendida	0,000127	0,000127	-

Uma representação gráfica da falha inicial da resina Adoro em seus diferentes grupos experimentais é apresentada no GRAF. 10.

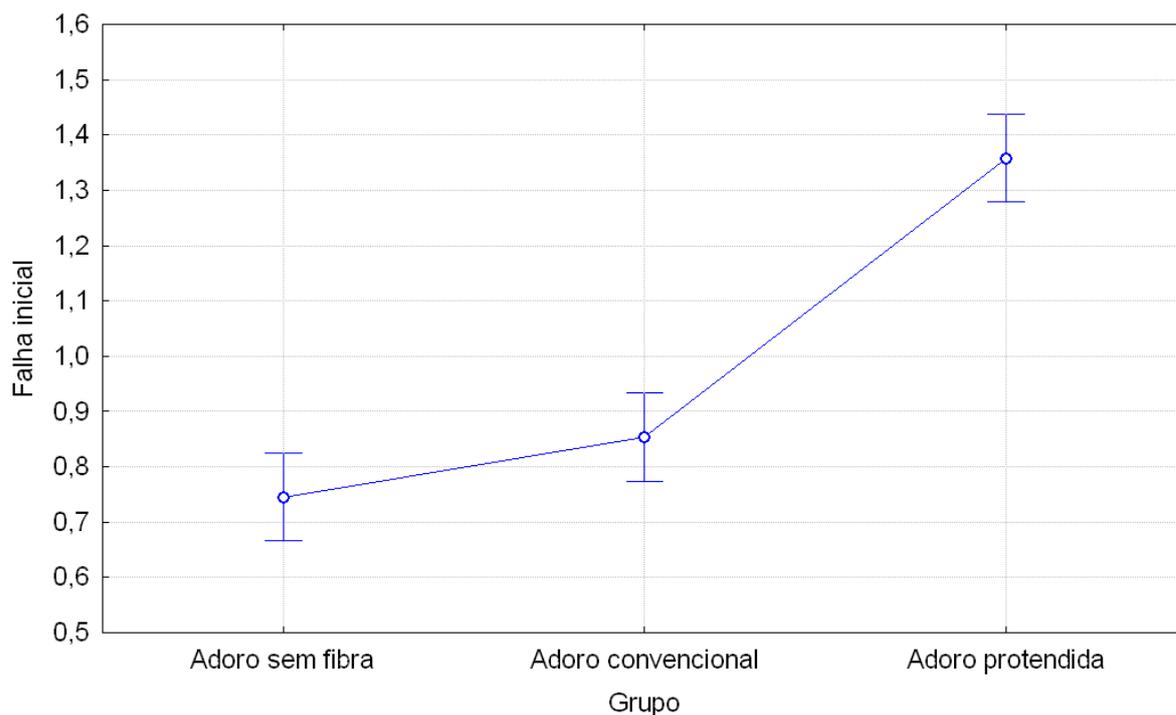


Gráfico 10 – Representação da falha inicial da resina Adoro em seus diferentes grupos experimentais. Os valores estão apresentados em mm. As barras verticais denotam o intervalo de confiança de 95%.

5.1.3 Resistência Flexural

A TAB. 22 apresenta a estatística descritiva da resistência flexural (MPa) da resina Adoro em seus 3 diferentes grupos experimentais.

Tabela 22 – Estatística descritiva da resistência flexural (MPa) para a resina Adoro

Grupo	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão	-95%	95%
Adoro sem fibra	10	81,2151	8,7499	2,76696	74,9558	87,4744
Adoro convencional	10	443,4658	36,7256	11,61364	417,1939	469,7377
Adoro protendida	10	569,1590	39,6307	12,53233	540,8089	597,5091

O teste estatístico de análise de variância (ANOVA) rejeitou a hipótese de igualdade entre os grupos com $p=0,00$. O teste post hoc de Tukey HSD indicou os valores de p , na comparação grupo a grupo, conforme demonstra a TAB. 23.

Tabela 23 – Teste *post hoc* de Tukey HSD. Valores de $p < 0,05$ denotam diferença estatisticamente significativa entre os grupos.

Grupo	Adoro sem fibra	Adoro convencional	Adoro protendida
Adoro sem fibra	-	0,000127	0,000127
Adoro convencional	0,000127	-	0,000127
Adoro protendida	0,000127	0,000127	-

Uma representação gráfica da resistência flexural da resina Adoro em seus diferentes grupos experimentais é apresentada no GRAF. 11.

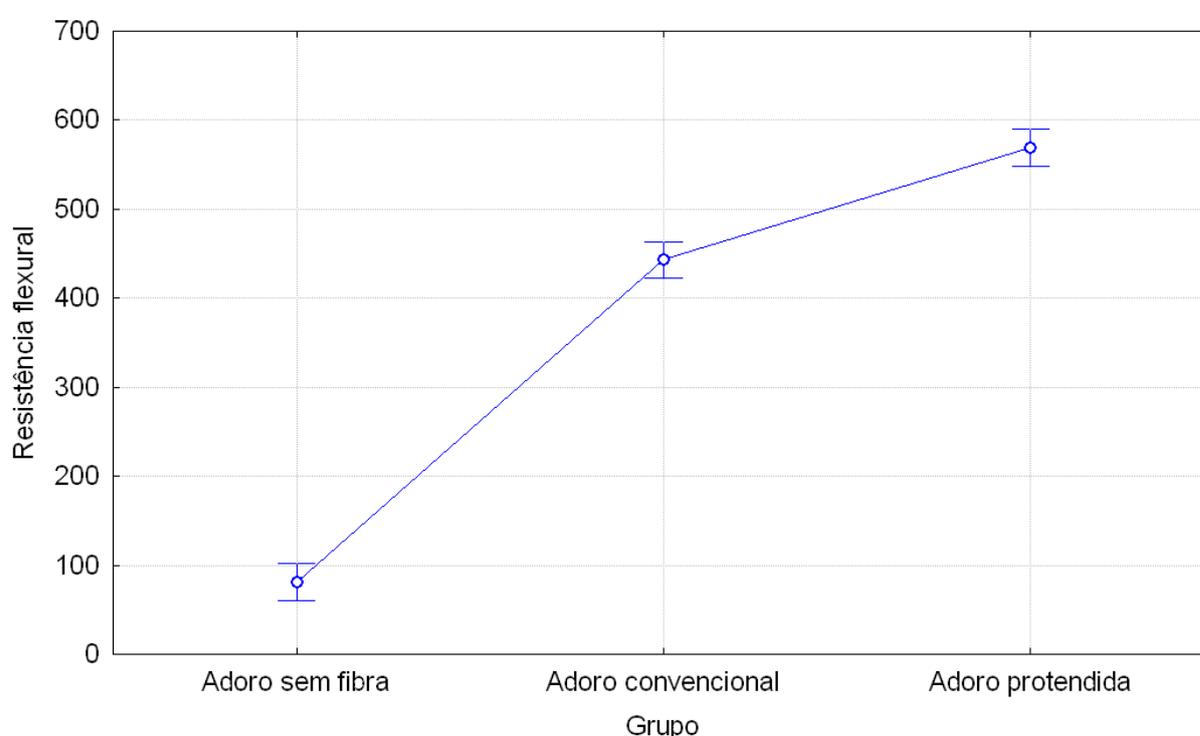


Gráfico 11 – Representação da resistência flexural da resina Adoro em seus diferentes grupos experimentais. Os valores estão apresentados em Mpa. As barras verticais denotam o intervalo de confiança de 95%.

5.1.4 Interações entre as propriedades flexurais observadas

A TAB. 24 apresenta os valores do coeficiente de correlação de Pearson. Todos os valores de correlação foram significativos com $p < 0,05$. O coeficiente de correlação de Pearson mede o grau de associação da relação linear entre duas variáveis. A representação gráfica está apresentada nos GRAF. 12 a 14.

Tabela 24 - Coeficiente de correlação de Pearson (r)

	Resistência flexural	Módulo flexural	Falha inicial
Resistência flexural		0,9719	0,7670
Módulo flexural	0,9719		0,6414
Falha inicial	0,7670	0,6414	

A partir dos valores da TAB. 24 foram calculados os coeficientes de determinação, que são apresentados abaixo, na TAB. 25.

Tabela 25 - Coeficiente de determinação (r^2)

	Resistência flexural	Módulo flexural	Falha inicial
Resistência flexural		0,9446	0,5883
Módulo flexural	0,9446		0,4114
Falha inicial	0,5883	0,4114	

O quadrado do coeficiente de correlação de Pearson é chamado de coeficiente de determinação ou simplesmente r^2 . É uma medida da proporção da variabilidade em uma variável que é explicada pela variabilidade da outra

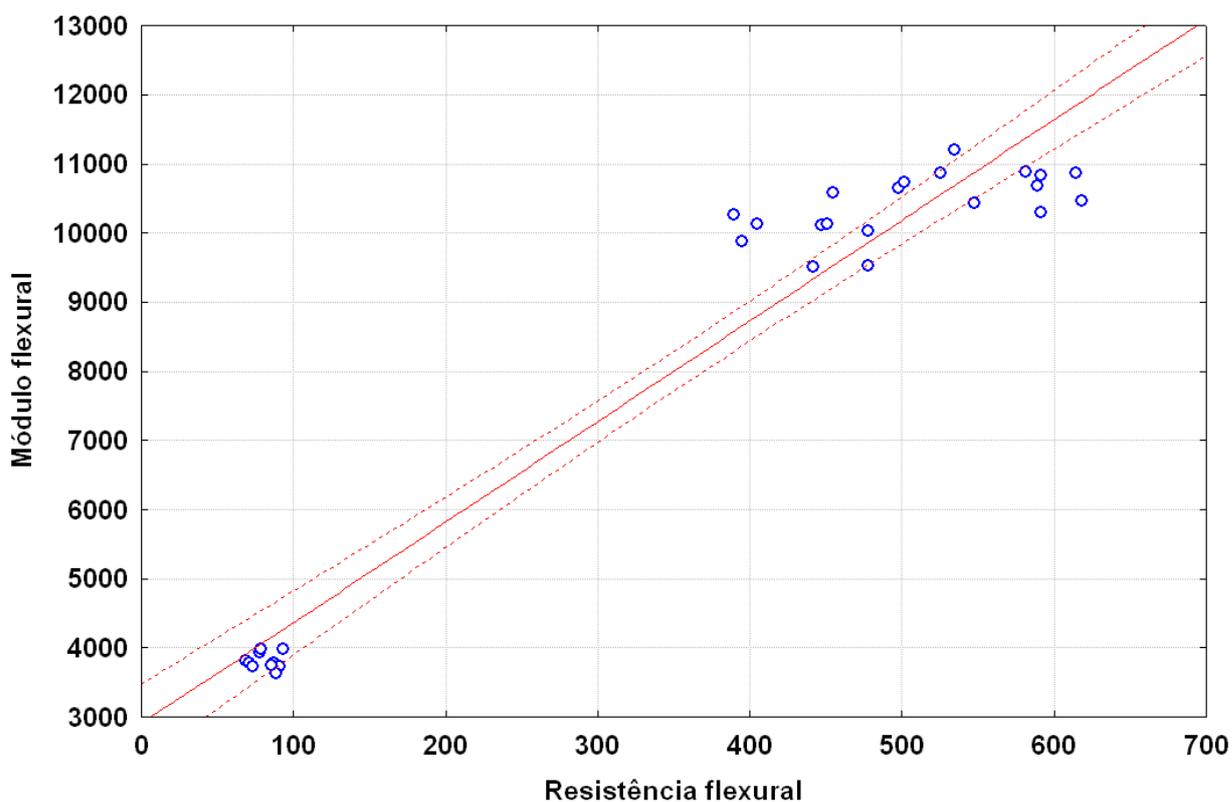


Gráfico 12 - A representação gráfica acima apresenta uma linha de regressão da correlação entre módulo flexural e resistência flexural da resina Adoro, em seus três grupos experimentais. O coeficiente de correlação de Pearson para este gráfico foi de 0,9719.

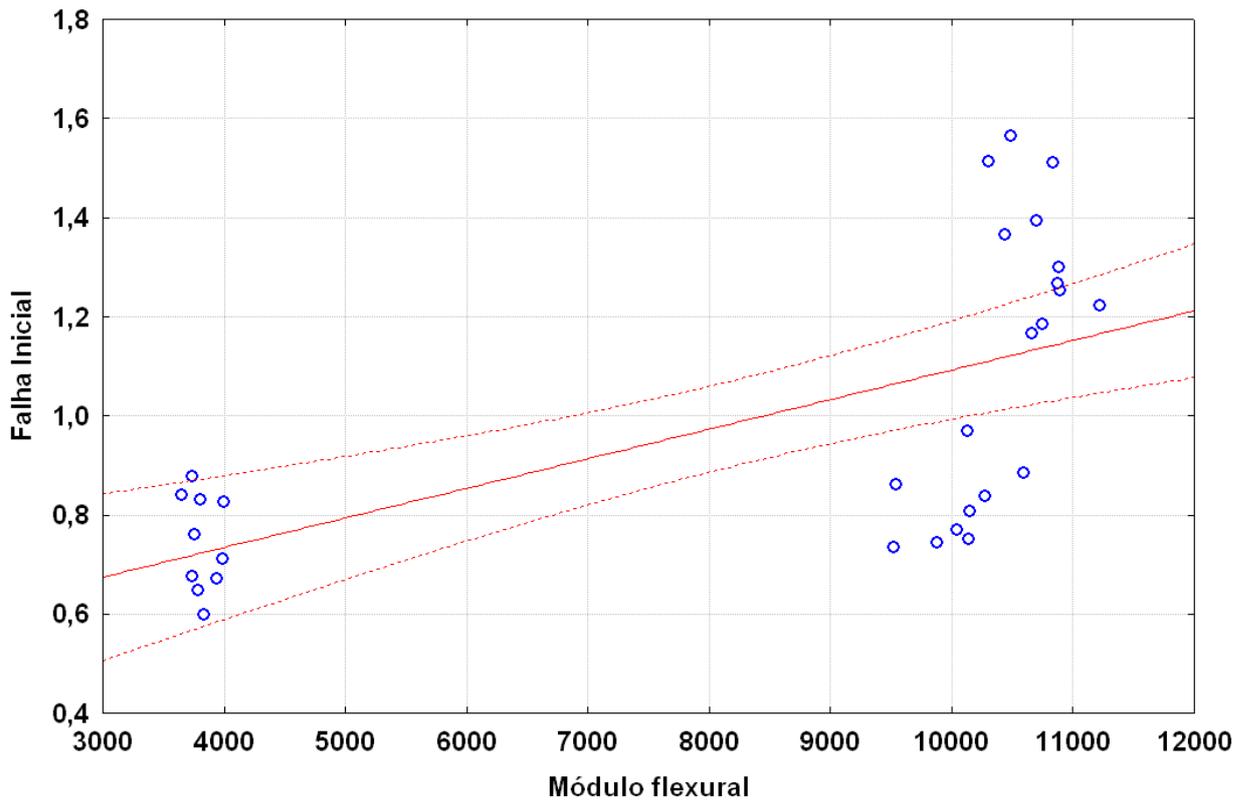


Gráfico 13 - A representação gráfica acima apresenta uma linha de regressão da correlação entre módulo flexural e falha inicial da resina Adoro, em seus três grupos experimentais. O coeficiente de correlação de Pearson para este gráfico foi de 0,6414.

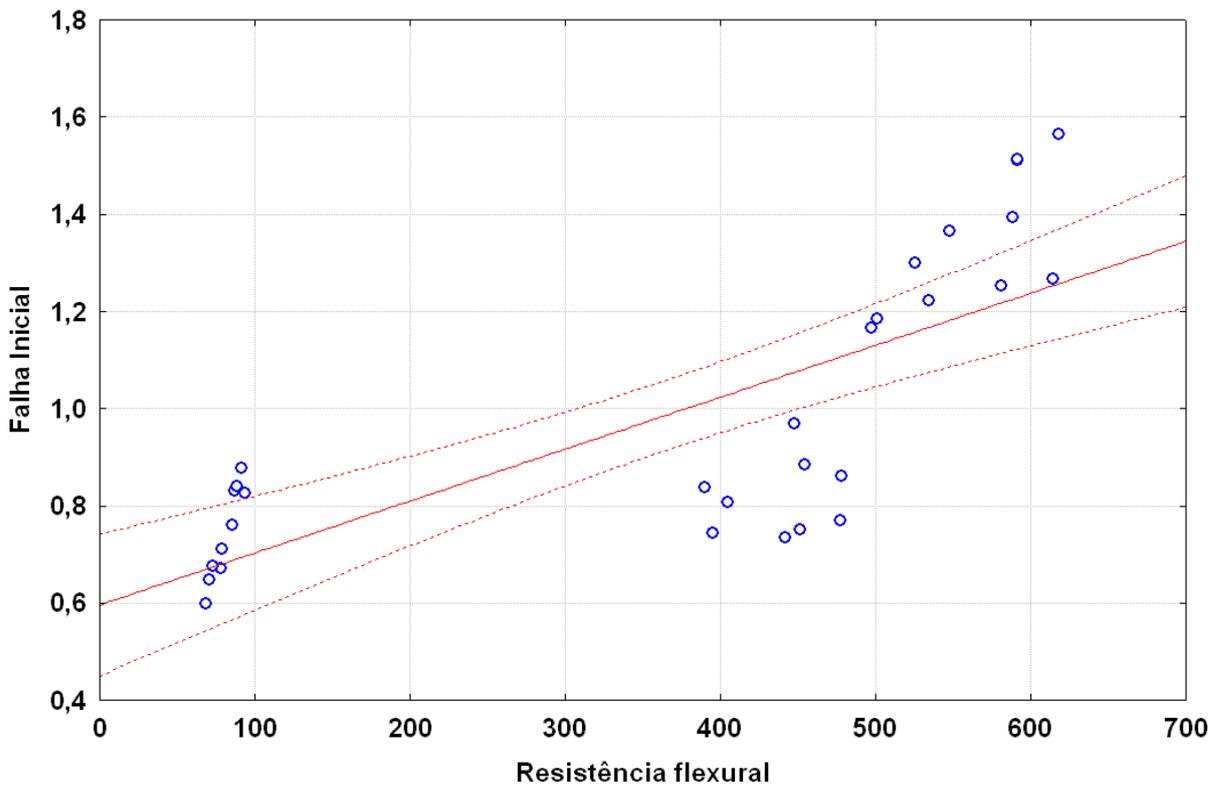


Gráfico 14 - A representação gráfica acima apresenta uma linha de regressão da correlação entre resistência flexural e falha inicial da resina Adoro, em seus três grupos experimentais. O coeficiente de correlação de Pearson para este gráfico foi de 0,7670.

5.2 PARA A RESINA DE USO DIRETO QUIXFIL

Os resultados com dados completos de todos os espécimes podem ser encontrados nas TAB. 26 a 28, APÊNDICES Q a S. As respectivas representações gráficas (carga/deflexão) estão apresentados GRAF. 15 a 17, APÊNDICES V e X.

5.2.1 Módulo Flexural

A TAB. 29 apresenta a estatística descritiva do módulo flexural (MPa) da resina Quixfil em seus três diferentes grupos experimentais.

Tabela 29 – Estatística descritiva do módulo flexural (MPa) para a resina Quixfil

Grupo	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão	-95%	95%
Quixfil sem fibra	10	9479,18	471,279	149,0314	9142,05	9816,32
Quixfil convencional	10	11584,80	290,781	91,9531	11376,78	11792,81
Quixfil protendida	10	11292,37	494,203	156,2808	10938,84	11645,90

O teste estatístico de análise de variância (ANOVA) rejeitou a hipótese de igualdade entre os grupos com $p=0,00$. O teste *post hoc* de Tukey HSD indicou os valores de p , na comparação grupo a grupo, conforme demonstra a TAB. 30.

Tabela 30 – Teste *post hoc* de Tukey HSD. Valores de $p < 0,05$ denotam diferença estatisticamente significativa entre os grupos.

Grupo	Quixfil sem fibra	Quixfil convencional	Quixfil protendida
Quixfil sem fibra	-	0,000127	0,000127
Quixfil convencional	0,000127	-	0,295073
Quixfil protendida	0,000127	0,295073	-

Uma representação gráfica do módulo flexural da resina Quixfil em seus diferentes grupos experimentais é apresentada no GRAF. 18.

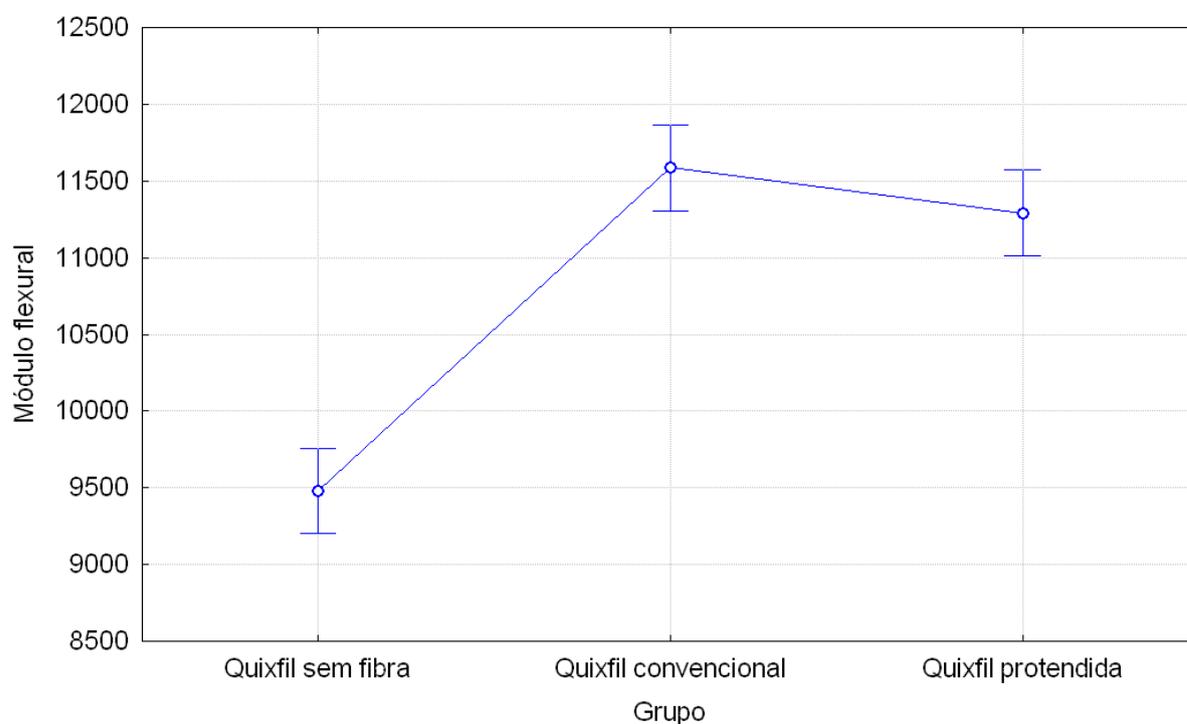


Gráfico 18 – Representação do módulo flexural da resina Quixfil em seus diferentes grupos experimentais. Os valores estão apresentados em Mpa. As barras verticais denotam o intervalo de confiança de 95%.

5.2.2 Falha inicial

A TAB. 31 apresenta a estatística descritiva da falha inicial (mm) da resina Quixfil em seus 3 diferentes grupos experimentais.

Tabela 31 – Estatística descritiva da falha inicial (mm) para a resina Quixfil

Grupo	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão	-95%	95%
Quixfil sem fibra	10	0,45778	0,058938	0,018638	0,415619	0,499941
Quixfil convencional	10	0,66549	0,112310	0,035516	0,585148	0,745832
Quixfil protendida	10	0,90272	0,082850	0,026199	0,843453	0,961987

O teste estatístico de análise de variância (ANOVA) rejeitou a hipótese de igualdade entre os grupos com $p=0,00$. O teste *post hoc* de Tukey HSD indicou os valores de p , na comparação grupo a grupo, conforme demonstra a TAB. 32.

Tabela 32 – Teste *post hoc* de Tukey HSD. Valores de $p < 0,05$ denotam diferença estatisticamente significativa entre os grupos.

Grupo	Quixfil sem fibra	Quixfil convencional	Quixfil protendida
Quixfil sem fibra	-	0,000158	0,000127
Quixfil convencional	0,000158	-	0,000130
Quixfil protendida	0,000127	0,000130	-

Uma representação gráfica da falha inicial da resina Quixfil em seus diferentes grupos experimentais é apresentada no GRAF. 19.

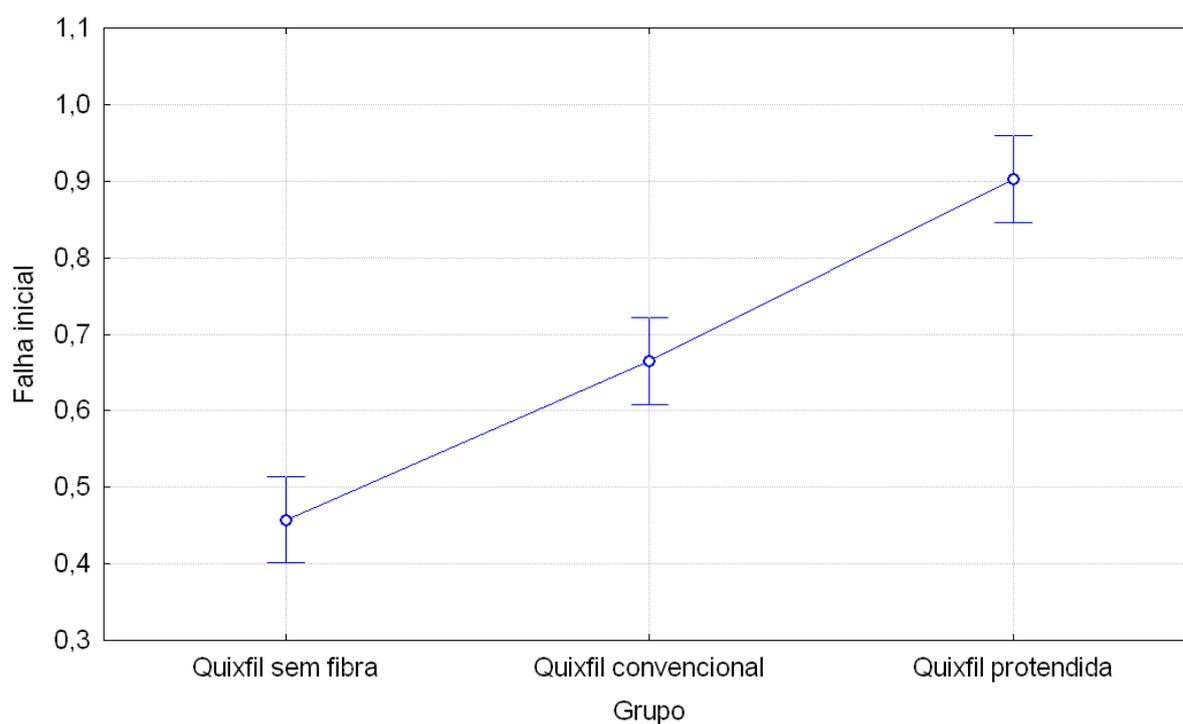


Gráfico 19 – Representação da falha inicial da resina Quixfil em seus diferentes grupos experimentais. Os valores estão apresentados em mm. As barras verticais denotam o intervalo de confiança de 95%.

5.2.3 Resistência Flexural

A TAB. 33 apresenta a estatística descritiva da resistência flexural (MPa) da resina Quixfil em seus 3 diferentes grupos experimentais.

Tabela 33 – Estatística descritiva da resistência flexural (MPa) para a resina Quixfil

Grupo	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão	-95%	95%
Quixfil sem fibra	1 0	131,833 3	16,9427	5,35775	119,713 2	143,953 3
Quixfil convencional	1 0	425,473 7	31,6358	10,00411	402,842 8	448,104 6
Quixfil protendida	1 0	568,003 2	42,5992	13,47107	537,529 5	598,476 9

O teste estatístico de análise de variância (ANOVA) rejeitou a hipótese de igualdade entre os grupos com $p=0,00$. O teste *post hoc* de Tukey HSD indicou os valores de p , na comparação grupo a grupo, conforme demonstra a TAB. 34.

Tabela 34 – Teste *post hoc* de Tukey HSD. Valores de $p < 0,05$ denotam diferença estatisticamente significativa entre os grupos.

Grupo	Quixfil sem fibra	Quixfil convencional	Quixfil protendida
Quixfil sem fibra	-	0,000127	0,000127
Quixfil convencional	0,000127	-	0,000127
Quixfil protendida	0,000127	0,000127	-

Uma representação gráfica da resistência flexural da resina Quixfil em seus diferentes grupos experimentais é apresentada no GRAF. 20.

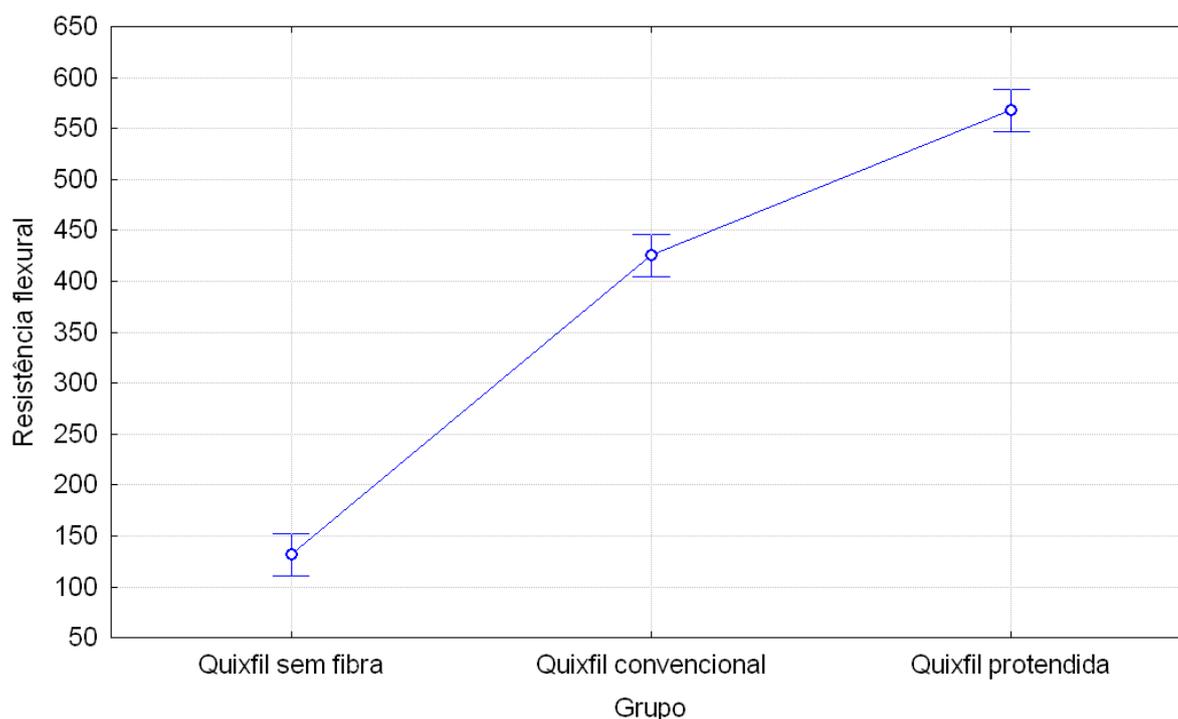


Gráfico 20 – Representação da resistência flexural da resina Quixfil em seus diferentes grupos experimentais. Os valores estão apresentados em Mpa. As barras verticais denotam o intervalo de confiança de 95%.

5.2.4 Interações entre as propriedades flexurais observadas

A TAB. 35 apresenta os valores do coeficiente de correlação de Pearson. Todos os valores de correlação foram significativos com $p < 0,05$. A representação gráfica está apresentada nos GRAF. 21 a 23.

Tabela 35 - Coeficiente de correlação de Pearson (r)

	Resistência flexural	Módulo flexural	Falha inicial
Resistência flexural	-	0,8106	0,9111
Módulo flexural	0,8106	-	0,6535
Falha inicial	0,9111	0,6535	-

A partir dos valores da TAB. 35 foram calculados os coeficientes de determinação, que são apresentados abaixo, na TAB. 36.

Tabela 36 - Coeficiente de determinação (r^2)

	Resistência flexural	Módulo flexural	Falha inicial
Resistência flexural	-	0,6571	0,8301
Módulo flexural	0,6571	-	0,4271
Falha inicial	0,8301	0,4271	-

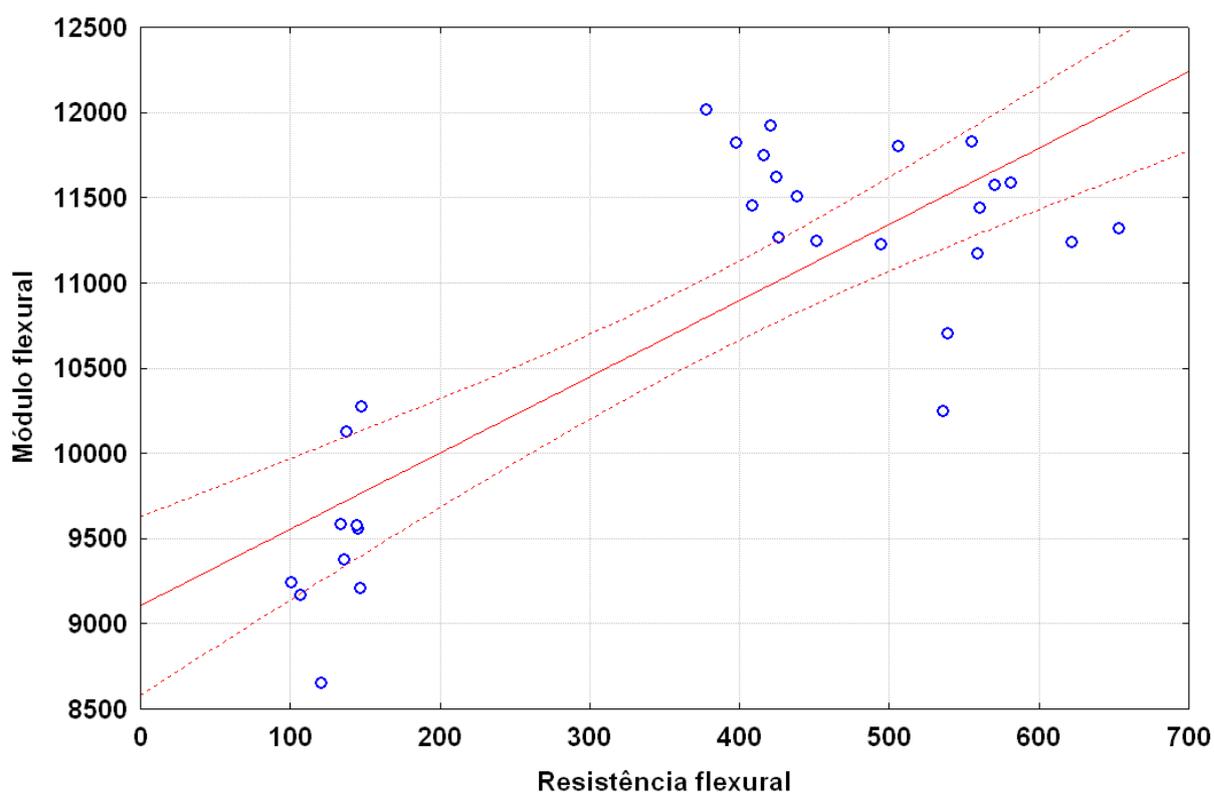


Gráfico 21 - A representação gráfica acima apresenta uma linha de regressão da correlação entre resistência flexural e módulo flexural da resina Quixfil, em seus três grupos experimentais. O coeficiente de correlação de Pearson para este gráfico foi de 0,8106.

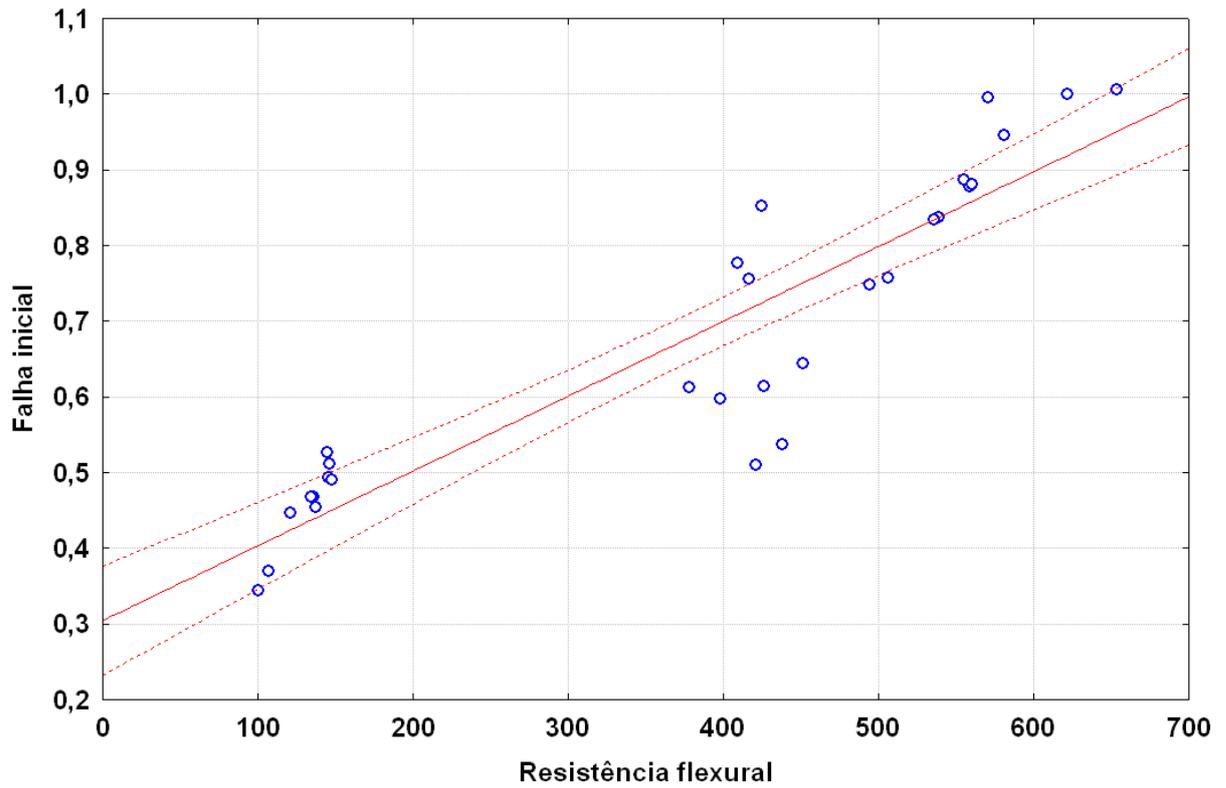


Gráfico 22 - A representação gráfica acima apresenta uma linha de regressão da correlação entre resistência flexural e falha inicial da resina Quixfil, em seus três grupos experimentais. O coeficiente de correlação de Pearson para este gráfico foi de 0,9111.

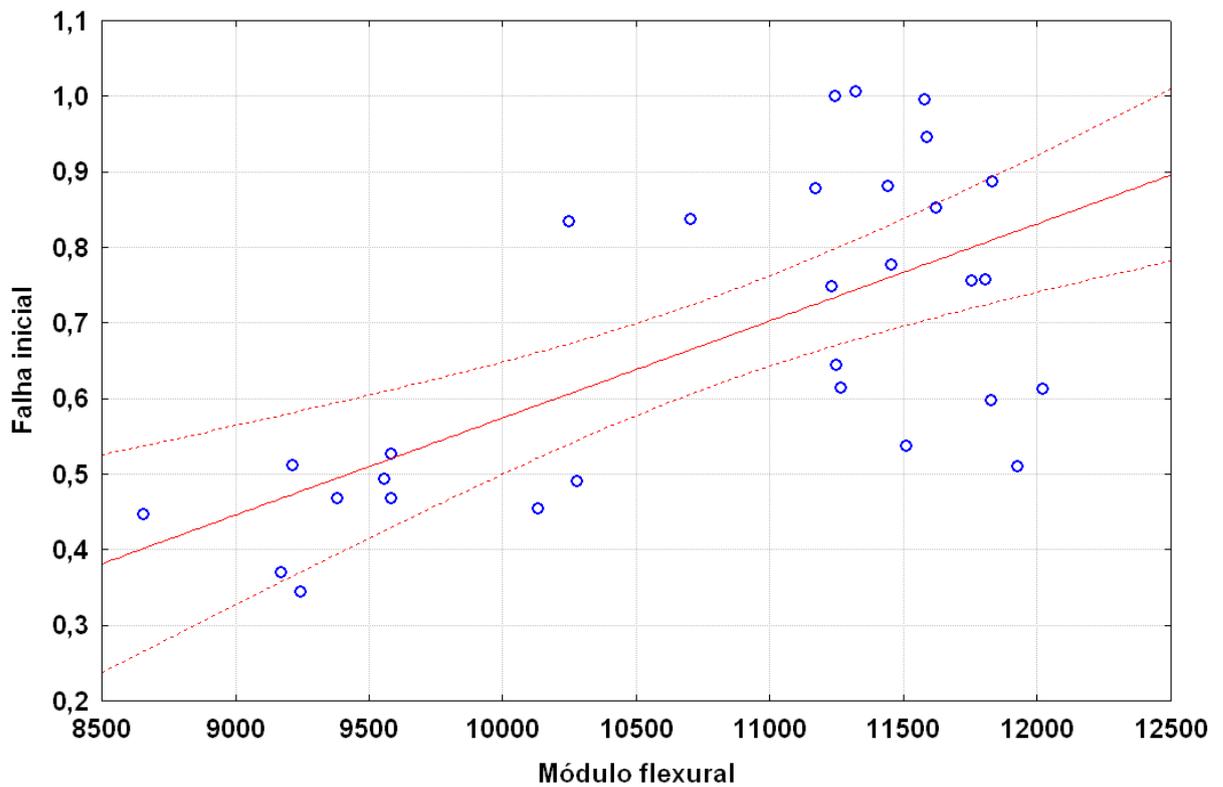


Gráfico 23 - A representação gráfica acima apresenta uma linha de regressão da correlação entre módulo flexural e falha inicial da resina Quixfil, em seus três grupos experimentais. O coeficiente de correlação de Pearson para este gráfico foi de 0,6535.

5.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS

5.3.1 Síntese dos resultados descritivos

As médias e desvios-padrão relativas a módulo flexural, falha inicial e resistência flexural estão demonstrados nas TAB. 37 e 38 a seguir.

Tabela 37 – Médias (Desvios-padrão) para o grupo Adoro

Grupo	E - Módulo Flexural MPa (DP)	Falha inicial Deflexão em mm (DP)	σ - Resistência flexural em MPa (DP)
Adoro sem fibra	3819,35 (115,86)	0,75 (0,09)	81,22 (8,75)
Adoro convencional	10089,20 (379,63)	0,85 (0,13)	443,47 (36,73)
Adoro protendida	10735,21 (267,87)	1,36 (0,13)	569,16 (39,63)

Tabela 38 – Médias (Desvios-padrão) para o grupo Quixfil

Grupo	E - Módulo Flexural em MPa (DP)	Falha inicial Deflexão em mm (DP)	σ - Resistência flexural em MPa (DP)
Quixfil sem fibra	9479,18 (447,09)	0,46 (0,06)	131,83 (16,07)
Quixfil convencional	11584,80 (290,78)	0,67 (0,11)	425,47 (31,64)
Quixfil protendida	11292,37 (508,35)	0,90 (0,08)	568,00 (33,46)

5.3.2 Síntese dos resultados da análise estatística

	Adoro	Quixfil
Módulo Flexural	G1, G2 e G3 diferentes entre si	G5 e G6 semelhantes entre si e diferentes de G4
Falha Inicial	G1 e G2 semelhantes entre si e diferentes de G3	G4, G5 e G6 diferentes entre si

Resistência Flexural	G1, G2 e G3 diferentes entre si	G4, G5 e G6 diferentes entre si

G1 - Adoro sem fibra

G2 - Adoro convencional

G3 - Adoro protendida

G4 - Quixfil sem fibra

G5 - Quixfil convencional

G6 - Quixfil protendida

Discussão

6 DISCUSSÃO

A protensão de estruturas, introduzida no Brasil no final dos anos 40, é um procedimento que permite a execução de obras surpreendentes. A mais recente delas, inaugurada no dia 15/12/2006, presenteia Brasília com a finalização do projeto original de Oscar Niemeyer e Lúcio Costa, traçado há 46 anos. O Conjunto Cultural da República, composto pela Biblioteca e Museu Nacional, é um autêntico exemplar onde colunas são substituídas por imensos vãos e retas dão lugar a curvas. A cúpula com 80 m de diâmetro e a rampa com 30 m em balanço desafiaram o engenheiro calculista José Carlos Sussekind.

Os resultados do presente estudo dão certeza que as vantagens comprovadas da protensão em superestruturas (BAUD, 1970; PFEIL, 1991; CALLISTER JR, 2002) são reproduzíveis em peças diminutas o bastante para serem utilizadas na área odontológica. Duas resinas compostas, uma de uso laboratorial (Adoro) e outra de uso direto (Quixfil), foram protendidas com fibra de vidro pré-tracionada.

Se o reforço de polímeros com fibras de forma convencional já requer uma adesão ótima entre as fibras e a matriz resinosa (SIMONETTI, 1997; VALLITTU, 1998; FREILICH et al., 2000; ELLAKWA; SHORTALL; MARQUIS, 2002; MAGNE et al., 2002; SONG et al., 2003; KARACAER et al., 2003; PFEIFFER; GRUBE, 2003; GRANDINI et al., 2005), em protensão essa aderência passa a ser fundamental, já que ela será responsável pela transferência de carga da fibra para a matriz, comprimindo-a (RÜSCH, 1980; CALLISTER JR, 2000; STOLL; SALIBA; CASPER, 2000). Uma aderência insuficiente poderia causar perdas de protensão (SHAHAWY; BEITELMAN, 1996b) pelo deslizamento da fibra na matriz resinosa (HAMPE et al., 1995; SHUMAN, 2000). Os resultados do teste de aderência interfacial – *pullout* (TAB. 8 e 9) para ambas as resinas mostraram valores bastante altos, similares ao trabalho de Hampe et al. (1995). Os valores de aderência de

72,86 MPa para a resina Adoro e 112,62 MPa para a resina Quixfil justificaram as fraturas coesivas na matriz resinosa, claramente visíveis em diversos espécimes (FIG. 40).

O princípio básico da protensão é a compressão estrutural. Ainda como teste preliminar, ensaios de resistência à compressão foram realizados com as duas resinas (TAB. 7, APÊNDICE G). Uma vez que a aderência entre a fibra e resina foi mais que suficiente, restava saber se a compressão induzida pela recuperação dimensional da fibra seria suportada pela resina. Uma resistência à compressão insuficiente poderia gerar um colapso da estrutura ou perdas de protensão por escoamento da resina (STOLL; SALIBA; CASPER, 2000).

A contração volumétrica experimentada pelas resinas durante o processo de polimerização certamente diminui a compressão induzida pela recuperação dimensional das fibras, ocasionando perdas de protensão (STOLL; SALIBA; CASPER, 2000). A escolha de uma resina de uso direto com uma contração volumétrica de polimerização relativamente baixa - 1,7% - objetivou minimizar ao máximo as perdas de protensão inerentes a este fenômeno.

Em estruturas que serão submetidas a solicitações flexurais é costumeiro a localização estratégica dos reforços justamente onde se concentrarão as tensões de tração (RUSCHEL, 1974; FELIPPE et al. 2001; DYER et al. 2004). A opção em se reforçar os espécimes com dois feixes, simetricamente posicionados, próximos da base e do topo, já utilizada por Dyer et al. (2004) em reforços não protendidos, teve como finalidade a obtenção de peças praticamente retilíneas e tenso-equilibradas. Uma pré-compressão descentralizada, com a utilização de um feixe único na base (BAUD, 1970), pré-tracionado com 0,248 KN, certamente causaria uma curvatura excessiva na peça quando da transferência de carga.

Considerando que as fibras são os principais elementos de suporte de carga, concentrações entre 40% e 70% em volume têm sido apontadas como adequadas (ALTIERI et al., 1994; SHAHAWY; BEITELMAN, 1996a; GIORDANO, 2000; STOLL; SALIBA; CASPER, 2000; FELIPPE et al., 2001). No presente estudo foi utilizada uma concentração aproximada de 12% em volume (TAB. 16, 17, 27 e 28), valor similar ao divulgado por Dyer et al. (2004), resultante do reforço dos espécimes de resina com dois feixes de fibra de vidro. Muito embora este valor pareça abaixo do recomendado pela literatura, ele representa a fração volumétrica em relação ao volume total do espécime. A concentração de fibra na região específica dos feixes certamente ultrapassa os 50% em volume. Caso optássemos por utilizar 4 feixes, elevando a concentração para cerca de 24% em volume, haveria dificuldade de acomodação dos feixes de forma simétrica e necessidade da diminuição da carga de pré-tracionamento, pois se mantivéssemos a carga de 0,248 KN por feixe, a compressão resultante na matriz resinosa seria algo em torno de 330 Mpa, um valor insuportável para a matriz resinosa em ambas as resinas (REINHART, 1998).

A carga de tração de 0,496 KN, cerca de 73,5% da resistência máxima da fibra utilizada, gerou uma deformação elástica aproximada de 1,2%. Ou seja, em 25 mm (comprimento do espécime), o alongamento da fibra de vidro foi cerca de 0,30mm. Por sua vez, a compressão induzida pela recuperação dimensional da fibra na resina Quixfil no momento da protensão, causou um encurtamento de 0,2 mm em 25 mm (0,8%). Para a resina Adoro, a recuperação dimensional da fibra foi praticamente completa com um encurtamento de 0,25 mm (1%). Ou seja, a compressão foi tal que gerou uma deformação possível de ser medida com um paquímetro. O módulo mais elevado da resina Quixfil pôde explicar a sua menor deformação compressiva (TAB. 7, APÊNDICE G).

Durante a fase da metodologia surgiu um dilema. A resina Adoro, como qualquer material resinoso de aplicação indireta, necessitaria de uma fotopolimerização associada ao calor (STANSBURY, 2000). Como seria impossível polimerizar o espécime dentro da

unidade especial (Targis Power Upgrade) juntamente com o dispositivo de protensão, foi realizado um teste piloto de resistência flexural (TAB. 11 e 12, APÊNDICE L) para verificar se a polimerização, unicamente com o fotopolimerizador, seria capaz de polimerizar a resina o bastante para suportar a transferência de carga no momento da protensão. Os resultados não mostraram diferenças entre o grupos piloto convencional e protendido, sugerindo perdas de protensão por polimerização incompleta da fase matriz. Paralelamente, ensaios compressivos demonstraram que a resina Adoro atinge valores plenos de resistência compressiva e módulo de elasticidade se uma reprodução das condições de calor e luz da unidade especial forem substituídas, como por exemplo, a utilização de uma fonte de ar aquecido associada à fotopolimerização pelo mesmo tempo de 25 min (TAB. 7, APÊNDICE G). Assim, para os grupos da resina Adoro, foi realizado a polimerização com associação de luz e calor antes da transferência de carga.

As respostas mecânicas de um compósito reforçado por fibras contínuas dependem das frações volumétricas das fases, da direção de aplicação da carga, da anisotropia das fibras alinhadas (VALLITU, 1999a; CALLISTER JR, 2002; KARACAER et al., 2003; LASSILA et al., 2004) e, de forma preponderante, dos comportamentos tensão-deformação das fases fibra e matriz (CALLISTER JR, 2002). O espécime reforçado com fibras começa a experimentar danos permanentes (falha inicial) no momento em que uma das fases começa a fraturar (DYER et al., 2004). Callister Jr (2002) complementa o raciocínio afirmando que a falha de um compósito reforçado com fibras não é catastrófica e instantânea, devido a duas razões: nem todas as fibras fraturam ao mesmo tempo e a resistência à tração e módulo de elasticidade são diferentes para as fases fibra e matriz. Testes que reportam somente a resistência máxima, ignoram o processo de fratura como um todo, que se inicia muito antes com menores cargas (CALLISTER JR, 2002; DYER et al., 2004). Seguindo uma linha semelhante, Magne et al. (2002) advogam a utilização de abordagens não destrutivas, através do método de elementos finitos, para a observação do complexo mecanismo de distribuição de tensões nas próteses e dentes pilares. O conhecimento do momento de falha inicial passa a ser

estratégico, considerando que uma das funções da fase matriz é proteger a fase fibra (RÜSCH, 1980; SHAHAWY; BEITELMAN, 1996a; CALLISTER JR, 2000). Dyer et al. (2004) advertem que danos e falhas iniciais passam a ser indicadores de maior sensibilidade que os valores de resistência máxima, uma vez que podem induzir e acelerar efeitos indesejáveis como, por exemplo, a infiltração de água com uma conseqüente redução na vida útil da estrutura. Callister Jr (2002) complementa afirmando que a formação de trincas pode levar a falhas, mesmo sob baixos níveis de tensão de tração.

No presente estudo, os espécimes sem reforço de fibra foram protagonistas de falhas catastróficas, onde o momento da falha inicial coincide com a força máxima aplicada (GRAF. 6 e 15). Já nos grupos reforçados com fibra, o processo de fratura iniciou com o surgimento de uma trinca próxima a região central e a partir da base do espécime, caracterizando o momento de falha inicial (FIG. 98) Neste ponto, as fibras ainda permanecem intactas, devido à sua maior resistência à tração. A seguir, a curva carga/deflexão continua em ascendência até atingir o momento da falha final do espécime, onde o maior valor de carga é alcançado, obtendo-se então o valor da resistência flexural (GRAF. 7 e 8). A partir deste ponto, o gráfico mostra um decréscimo vertiginoso na carga, instalando-se um padrão de instabilidade com delaminações na base do espécime e perda de pequenos fragmentos da fase resina.

Ao registrar-se o momento exato da falha inicial, é fundamental estar atento aos sinais emitidos pelo espécime (DYER et al., 2004): emissões audíveis, com um som característico de "click", surgimento de uma trinca a partir da base e uma correspondente queda momentânea na curva carga/deflexão. É importante ressaltar que o registro da falha é determinado pelo sinal que ocorrer primeiro. Em alguns espécimes, o "click" foi percebido antes da visualização da trinca. Em outros, foi ouvido somente após a instalação da trinca. Ainda é válido lembrar que a sensibilidade dos registros dependem da atenção, acuidade visual e auditiva, devendo o espécime estar bem iluminado e o laboratório de testes em relativo silêncio. A percepção visual e auditiva foi

associada ao registro fotográfico dos valores no painel da máquina universal de testes. Poderia surgir a seguinte pergunta: por que não realizar somente a análise instrumental através da leitura da queda momentânea de carga registrada no gráfico carga/deflexão? Em diversos espécimes, a falha inicial não foi elevada o bastante para gerar quedas de carga suficientemente discerníveis no traçado do gráfico. Dessa forma, o gráfico foi um elemento de confirmação para os valores obtidos de forma audível ou visual (GRAF. 17).

A protensão foi capaz de retardar o momento da falha inicial nas duas resinas testadas. Ao compararmos os grupos sem fibra (G1) e com fibra convencional (G2), a variável em questão é a presença ou não do reforço de fibra de vidro. Os valores médios de 0,74 mm e 0,85 mm, bastante próximos, não apresentaram diferenças significantes estatisticamente. Já sob o quesito protensão, observando as TAB. 16 e 17, a resina Adoro (G3) precisou em média, de uma deflexão de 1,36 mm para sofrer a falha inicial, valor aproximadamente 58% superior aos 0,85 mm do grupo Adoro convencional (G2). Indubitavelmente, a compressão prévia criou um "reservatório tensional" (PFEIL, 1991). A deflexão significativamente maior, exibida pelos espécimes protendidos, é facilmente explicada por Baud (1970): a combinação da compressão prévia em toda a secção do espécime (gerada pelas fibras pré-tracionadas) com os esforços típicos da flexão, provoca a soma das tensões de compressão na parte superior, ocasionando ali uma supercompressão, enquanto na base as tensões compressivas prévias serão inicialmente aliviadas. Ou seja, nos espécimes protendidos, os primeiros décimos de milímetros de deflexão irão descomprimir a resina da base, para então começar a tracioná-la. Essa "reserva" garante uma maior amplitude flexural à peça (GARDEN; HOLLAWAY, 1998). O mesmo é válido para a resina Quixfil que também respondeu à protensão, aumentando a deflexão média de 0,66 mm no grupo convencional (G5), para 0,90 mm no grupo protendido (G6), representando um incremento ao redor de 33% (TAB. 27 e 28).

Apesar de não estabelecermos uma correlação estatística entre as resinas Adoro e Quixfil, por se tratarem de materiais com indicações distintas, os resultados

evidenciaram que os incrementos nos valores de deflexão associada à falha inicial foram maiores para a resina Adoro. Como já discutido anteriormente, a menor rigidez da resina Adoro permitiu um maior encurtamento do espécime sob a mesma carga compressiva, refletindo diretamente na falha inicial que aconteceu com maiores amplitudes de deflexão.

Ao observarmos os resultados relativos ao módulo flexural (TAB. 16, 17, 27 e 28) percebe-se uma diferença entre os grupos sem fibra (G1 e G4) e com fibra convencional (G2 e G5). O reforço com fibras é capaz de aumentar substancialmente a rigidez estrutural da peça, estando de acordo com resultados apresentados por Vallittu (1999a) e Karacaer et al. (2003). Entretanto, considerando os efeitos da protensão, não houve grandes alterações na inclinação da curva tensão/deformação. A resina Adoro, apresentou um discreto aumento no módulo do grupo convencional (G2) para o protendido (G3). Já para a resina Quixfil, não houve diferenças estatisticamente significantes entre o grupo convencional (G5) e protendido (G6). Em outras palavras, a rigidez do material composto não foi modificada de forma significativa pelo fenômeno da protensão.

Os resultados demonstraram um considerável aumento na resistência flexural nos grupos protendidos. O grupo Adoro protendida (G3) alcançou, em média, a resistência flexural de 569,16 Mpa, aproximadamente 28,34% superior que os 443,47 MPa do grupo Adoro convencional (G2). Na resina Quixfil, o grupo protendido (G6) alcançou o valor médio de 568 MPa, cerca de 33,50% mais resistente que o convencional (G5) - 425,47 MPa. Da mesma forma que a "reserva tensional" gerada pela protensão retardou o momento de falha inicial, anteriormente comentado, ela também retardou o momento de falha final alcançando deflexões maiores (TAB 16, 17, 27 e 28). Por mais paradoxal que pareça, a protensão aumentou a resistência sem aumentar consideravelmente o módulo. Os espécimes protendidos, embora construídos com os mesmos materiais que os convencionais, ganharam mais "fôlego", suportando maiores deformações e cargas.

Ainda é importante ressaltar que as interações entre as propriedades flexurais observadas neste estudo foram determinadas através do coeficiente de correlação de Pearson. Para os grupos Adoro (G1, G2 e G3), o valor de 0,76 revela uma associação forte entre a resistência flexural e a falha inicial em detrimento de uma moderada associação entre o módulo flexural e a falha inicial (0,64). Na resina Quixfil (G4, G5 e G6), a correlação de 0,91 entre resistência flexural e falha inicial mostra uma associação muito forte entre esses parâmetros, enquanto que entre o módulo flexural e a falha inicial acontece uma associação moderada com um coeficiente de 0,65.

O desenvolvimento de materiais compostos de alto rendimento abre inúmeras possibilidades de utilização. As resinas reforçadas com fibras já fazem parte da rotina dos consultórios dentários com as próteses fixas fibro-reforçadas e há também uma forte participação dos pinos pré-fabricados reforçados por fibras. A protensão de estruturas exige um exato dimensionamento das propriedades dos materiais envolvidos bem como o conhecimento do regime de serviço ao qual a peça será submetida. Outras pesquisas são necessárias, em especial abordagens não destrutivas, para que possamos entender melhor o complexo mecanismo da interação das forças e aproveitá-las para a realização de trabalhos que ofereçam maior durabilidade, segurança e bem-estar aos nossos pacientes.

Conclusões

7 CONCLUSÕES

Dentro dos limites deste estudo, com base nos resultados encontrados, é possível concluir que a protensão aumentou a deflexão necessária para a ocorrência da falha inicial, acompanhada de um aumento na resistência flexural, porém sem variações significativas na rigidez dos espécimes. O módulo flexural sofreu um discreto aumento na resina de uso indireto Adoro e permaneceu inalterado para a resina Quixfil.

Referências

REFERÊNCIAS ⁸

ALTIERI, J. V. et al. Longitudinal clinical evaluation of fiber-reinforced composite fixed partial dentures: A pilot study. **J. Prosthet. Dent.**, St. Louis, v. 71, n. 1, p. 16-21, Jan. 1994.

ARANTES, O. **Concreto e aço empregados solidariamente**: condições e formas de associação. [s. l. : s. n.], [1960?].

BAUD, G. Hormigón armado. In:_____. **Tecnología de la Construcción**. 3 ed. Barcelona: Editorial Blume, 1970. cap. 17, p. 298 – 407.

CALLISTER JR., W. D. Compósitos. In:_____. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. cap. 17, p.358-386.

DYER, S. R. et al. Effect of fiber position and orientation on fracture load of fiber-reinforced composite. **Dent. Mater**, Washington, v.20, n.10, p. 947-955, Dec. 2004.

ELLAKWA, A. E.; SHORTALL, A. C.; MARQUIS, P. M. Influence of fiber type and wetting on the flexural properties of an indirect fiber reinforced composite. **J. Prosthet. Dent.**, St. Louis, v. 88, n. 5, p. 485-490, Nov. 2002.

FELIPPE, L. A. et al. Fibras de Reforço para Uso Odontológico – Fundamentos Básicos e Aplicações Clínicas. **Rev. APCD**, São Paulo, v. 55, n. 4, p. 245-256, jul./ago. 2001.

FREDRIKSSON, M. et al. A retrospective study of 236 pacientes with teeth restored by carbon fiber-reinforced epoxi resin posts. **J. Prosthet. Dent.**, St. Louis, v. 80, n. 2, p. 151-157, Aug. 1998.

FREILICH, M. A. et al. **Fiber-reinforced composites in clinical dentistry**. Carol Stream: Quintessence, 2000. p. 4-14.

GARDEN, H.N.; HOLLAWAY, L.C. An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates. **Composites Part B: Engineering**, v. 29,n. 4, p. 411-424, 1998.

GIORDANO, R. Fiber reinforced composite resin systems. **Gen. Dent.**, Chicago, v. 48, n. 3, p. 244-249 May-June, 2000.

GLANZ, J. Force-Carrying Web Pervades Living Cell. **Science**, Washington, v. 276, n. 5313, p. 678 – 679, May 1997.

GRANDINI, S. et al. Fatigue resistance and structural characteristics of fiber posts: three-point bending test and SEM evaluation. **Dent. Mater**, Washington, v.21, n.2, p. 75-82, Feb. 2005.

HAMPE, A. et al. An advanced equipment for single-fibre pull-out test designed to monitor the fracture process **Composites**, v. 26, n. 1, p. 40-46, Jan. 1995.

⁸ Baseada na NBR 6023/2002 da ABNT.

HERRERA-FRANCO P.J.; VALADEZ-GONZALEZ, A. A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. **Composites: Part B**, v. 36, p. 597-608, 2005.

ISO. **Dentistry – Polymer-based crown and bridge materials**. N 10477: 1992 /Amd. 1. Geneve, 1998.

KARACAER, O. et al. The effect of length and concentration of glass fibers on the mechanical properties of an injection- and a compression-molded denture base polymer. **J. Prosthet. Dent.**, St. Louis, v. 90, n. 4, p. 385-393, Oct. 2003.

LACOUR, S. P. et al. Stretchable gold conductors on elastomeric substrates. **Appl. Phys. Lett.**, v. 82, n. 15, p. 2404-2406, Apr. 2003.

LASSILA et al. Flexural properties of fiber reinforced root canal posts. **Dent. Mater**, Washington, v. 20, n. 1, p. 29-36, Jan. 2004.

LASTUMÄKI, T. M.; LASSILA, L. V. J.; VALLITTU, P. K. The semi-interpenetrating polymer network matrix of fiber-reinforced composite and its effect on the surface adhesive properties. **J Mater Sci Mater Med.**, v.9, p. 803-809, Sept. 2003.

LEUNG, R. L.; FAN, P.L.; JOHNSTON, W.M. Post-irradiation polymerization of visible light-activated composite resin. **J. Dent. Res.**, Washington, p. 363-365, Mar. 1983.

MAGNE, P. et al. Stress distribution of inlay-anchored adhesive fixed partial dentures: a finite element analysis of the influence of restorative materials and abutment preparation design. **J. Prosthet. Dent.**, St. Louis, v. 87, n. 5, p. 516-527, May 2002.

McLAREN, E. A.; RIFKIN, R.; DEVAUD, V. Considerations in the use of polymer and fiber-based indirect restorative materials. **Pract. Periodont. Aesthet. Dent.**, New York, v. 11, n. 4, p. 423-432, May 1999.

NISHIOKA, R. S. et al. Apresentação de Caso Clínico – Prótese Parcial Fixa Adesiva sem Metal com Fibras de Polietileno e Resina Solidex. **JBC**, Curitiba, v. 5, n. 25, p. 65-68, jan./fev. 2001.

O'BRIEN, W.J. **Dental Materials and Their Selection**. Quintessence Publishing, 2nd ed., 1997. Disponível em:
< http://www.lib.umich.edu/dentlib/Dental_tables/Ultcompstr.html>. Acesso em: 26 nov. 2006.

PFEIFFER, P.; GRUBE, L. In vitro resistance of reinforced interim fixed partial dentures. **J. Prosthet. Dent.**, St. Louis, v. 89, n. 2, p. 170-174, Feb. 2003.

PFEIL, W. **Concreto Protendido**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1991. v.1

REINHART, T. J. Overview of composite materials. In: PETERS, S. T. **Handbook of Composites**. 2.ed. London: Chapman & Hall, 1998. cap. 1, p. 21-33.

RUSCHEL, R. **Curso básico de concreto armado**. Porto Alegre: Globo, 1974.

RÜSCH, H. **Concreto armado e protendido: propriedades dos materiais e dimensionamento**. Rio de Janeiro: Campus, 1980, p. 45-46.

SAINT-GOBAIN/VETROTEX: **Filamentos de vidro**. <<http://www.saint-gobain-vetrotex.com.br/portugues/gstrand.html>> Acesso em: 29 jan. 2006a.

_____ : **Description and nomenclature of E glass single yarns.**
 < http://www.vetrotextiles.com/pdf/E_yarn_nomenclature.pdf.> Acesso em: 10 dez. 2006b.

SALIGER, R. Estática Aplicada – **Cálculo de estructuras aplicado a las construcciones elevadas y al hormigón armado.** Buenos Aires: Editorial Labor, 1939.

SHAHAWY M. A.; BEITELMAN T. Experimental investigation on structural repair and strengthening of damaged prestressed concrete slabs utilizing externally bonded carbon laminates. **Composites Part B: Engineering**, v. 27, n. 3-4, p. 217-224, 1996a.

_____. Static flexural response of members pretensioned with multiple layered aramid fiber tendons. **Composites Part B: Engineering**, v. 27, n. 3-4, p. 253-261, 1996b.

SHUMAN, I. E. Replacement of a tooth with a fiber-reinforced direct bonded restoration. **Gen. Dent.**, Seattle, v. 81, n. 3, p. 314-318, May/ June 2000.

SIMONETTI, E. L. Sistema Targis-Vectris: aspectos estruturais e clínicos. **Guia de Compras Dental Gaúcho**, Porto Alegre, p. 1-6, jul./dez. 1997.

SONG, H.Y. et al. Effects of two preparation designs and pontic distance on bending and fracture strength of fiber-reinforced composite inlay fixed partial dentures. **J. Prosthet. Dent.**, St. Louis, v. 90, n. 4, p. 347-353, Oct. 2003.

STANSBURY, J. W. Curing dental resins and composites by photopolymerization. **J. Esthet. Dent.**, Hamilton, v. 12, n. 6, p. 300-308, 2000.

STOLL, F.; SALIBA, J.E. ; CASPER, L.E. Experimental study of CFRP-prestressed high-strength concrete bridge beams. **Composite Structures**, v. 49, n.2, p. 191 -200, jun. 2000.

SUH, B. **Adhesion dentistry update:** new aesthetic materials and adhesion between the light-cured composites and all-in-one adhesives. < <http://www.bisco.com/rp/cabon%202001.pdf> > Acesso em 13 fev. 2006.

TOUTANJI, H.; SAAFI, M. Performance of concrete beams prestressed with aramid fiber-reinforced polymer tendons. **Composite Structures**, v. 44, n. 1, p. 63 -70, 1999.

UCTASLI, S. et al. The degree of conversion of fiber-reinforced composites polymerized using different light-curing sources. **Dent. Mater**, Washington, v.21, n.5, p. 469-475, May 2005.

VALLITTU, P. K.; NARVA, K. Impact Strength of a Modified Continuous Glass Fiber-Poly(methyl Methacrylate). **Int. J. Prosthodont.**, Lombard, v. 10, n. 2, p. 142-148, 1997.

VALLITTU, P. K. Flexural properties of acrylic resin polymers reinforced with unidirectional and woven glass fibers. **J. Prosthet. Dent.**, St. Louis, v. 81, n. 3, p. 318-325, Mar. 1999a.

_____. Prosthodontic treatment with a glass fiber-reinforced resin-bonded fixed partial denture: A clinical report. **J. Prosthet. Dent.**, St. Louis, v. 82, n. 2, p. 132-135, Aug. 1999b.

VALLITTU, P. K. The effect of glass fiber reinforcement on the fracture resistance of a provisional fixed partial denture. **J. Prosthet. Dent.**, St. Louis, v. 79, n. 2, p. 125-129, Feb. 1998.

VAUGHAN, D.J. Fiberglass reinforcement. In: PETERS, S. T. **Handbook of Composites**. 2.ed. London: Chapman & Hall, 1998. cap. 7, p. 131-137.

APÊNDICE A – Apresentação da FIG. 11 e TAB. 3.

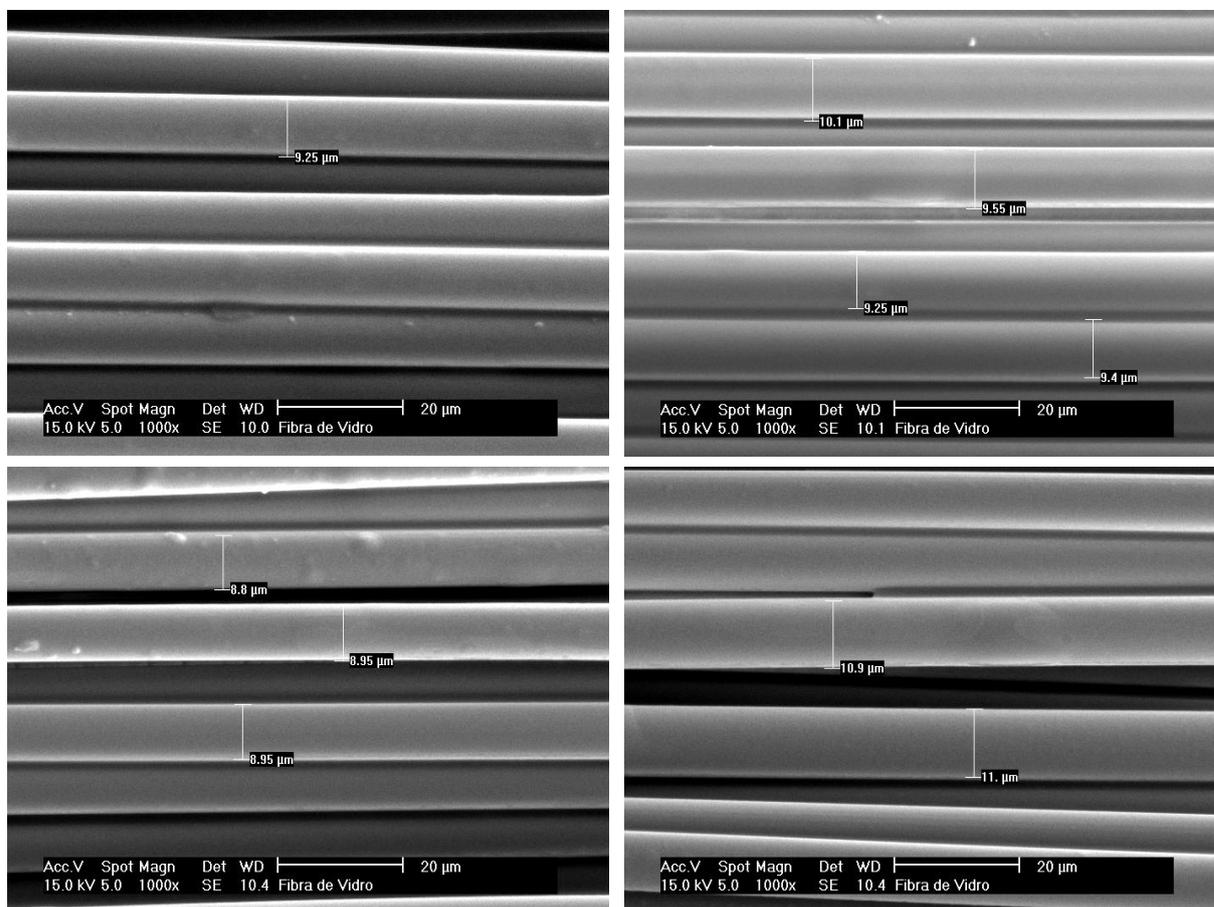


Figura 11 – Medição do diâmetro da fibra de vidro

Tabela 3 – Mensurações e média do diâmetro do filamento de fibra de vidro

Mensuração	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MÉDIA
Ø (µm)	9,25	10,1	9,55	9,25	9,40	8,8	8,95	8,95	10,9	11,0	9,61

APÊNDICE B – Apresentação da FIG. 12.

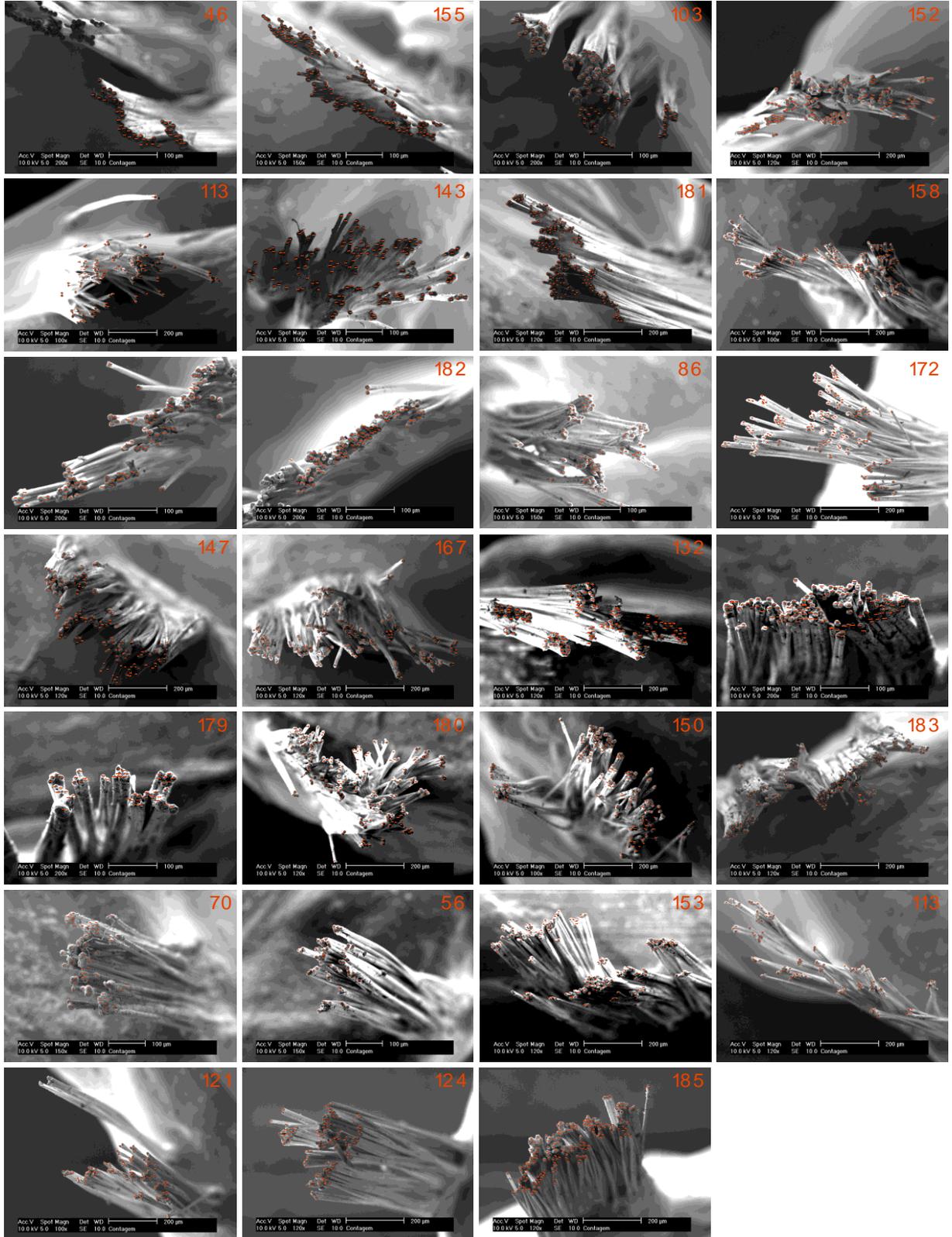


Figura 12 – Conjunto de micrografias totalizando a contagem de 3468 filamentos

APÊNDICE C – Apresentação do cálculo do número de filamentos pela fórmula.

$$\text{Número de filamentos} = \frac{4000 * \text{Tex}}{3,14 * D^2 * 2,6}$$

onde:

Tex gramas em 1000 metros

D diâmetro do filamento em μm

2,6 densidade do vidro em g/cm^3

Assim sendo:

$$\text{Número de filamentos} = \frac{4000 * 684}{3,14 * 9,6^2 * 2,6} = 3636$$

APÊNDICE D – Apresentação da TAB. 4 e cálculo da densidade linear da fibra de vidro.

Tabela 4 – Pesagem de 10 cm lineares de fibra de vidro (em g)

Amostra	Pesagem inicial	Pesagem final
1	0,0687	0,0685
2	0,0687	0,0683
3	0,0697	0,0691
4	0,0688	0,0682
5	0,0685	0,0680
Média	0,0688	0,0684

Cálculo da densidade linear (TEX):

10 cm - 0,0684 g 1Km - 684 g - TEX

APÊNDICE E – Apresentação da FIG. 18.

Figura 18 – Planta da garra para tração de fibras.

(continua)

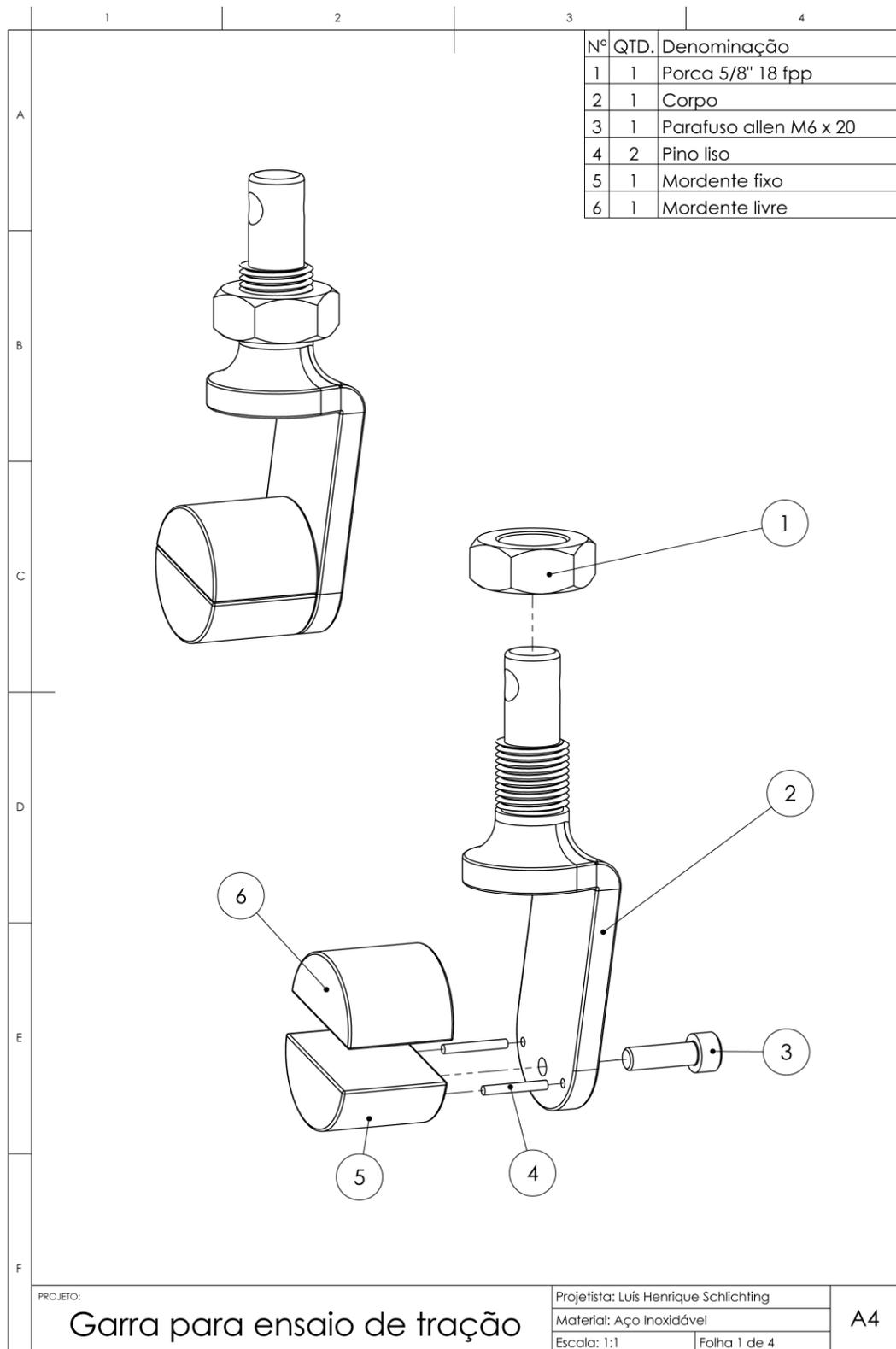


Figura 18 – Planta da garra para tração de fibras.

(continua)

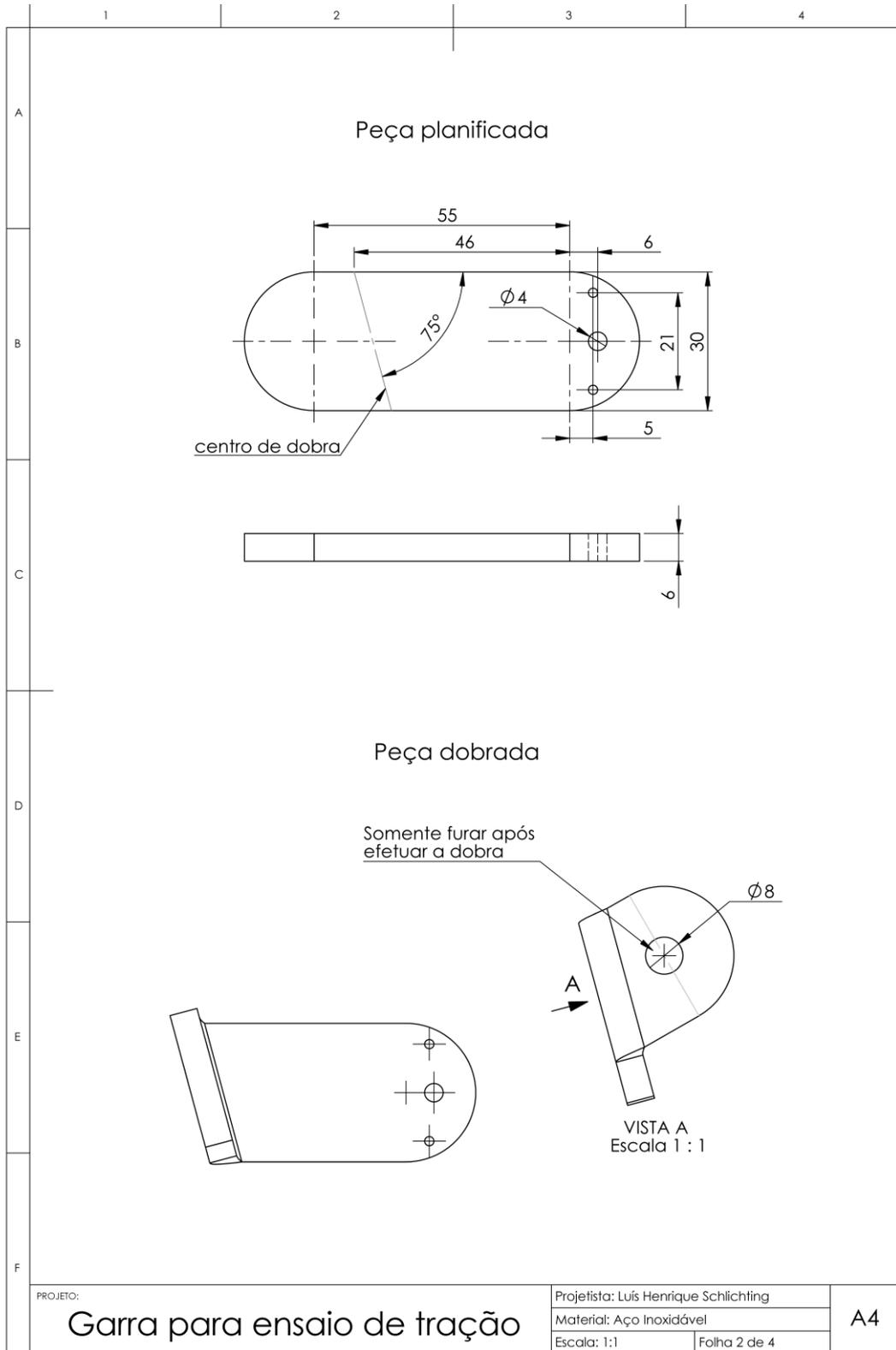


Figura 18 – Planta da garra para tração de fibras

(continua)

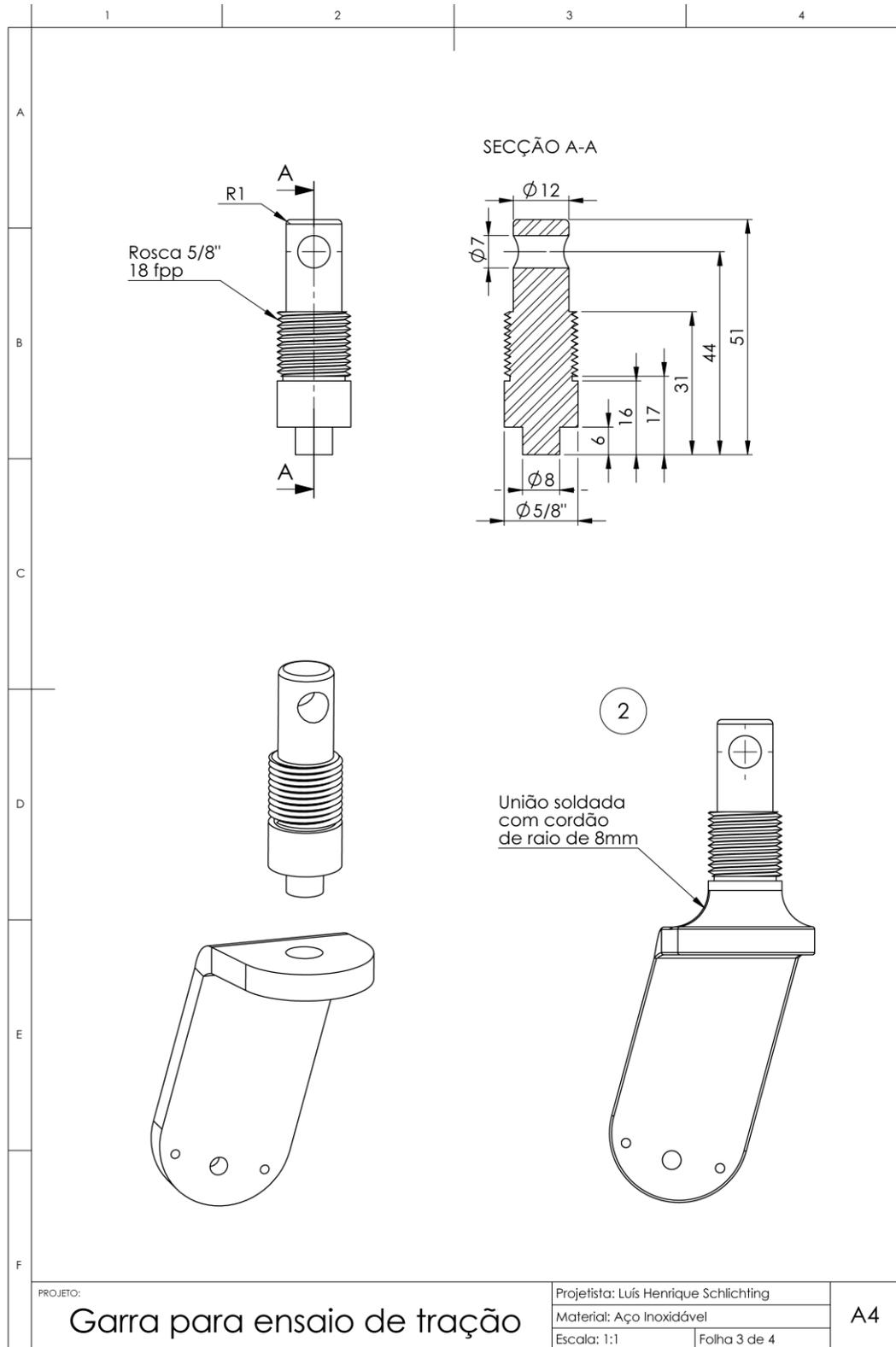
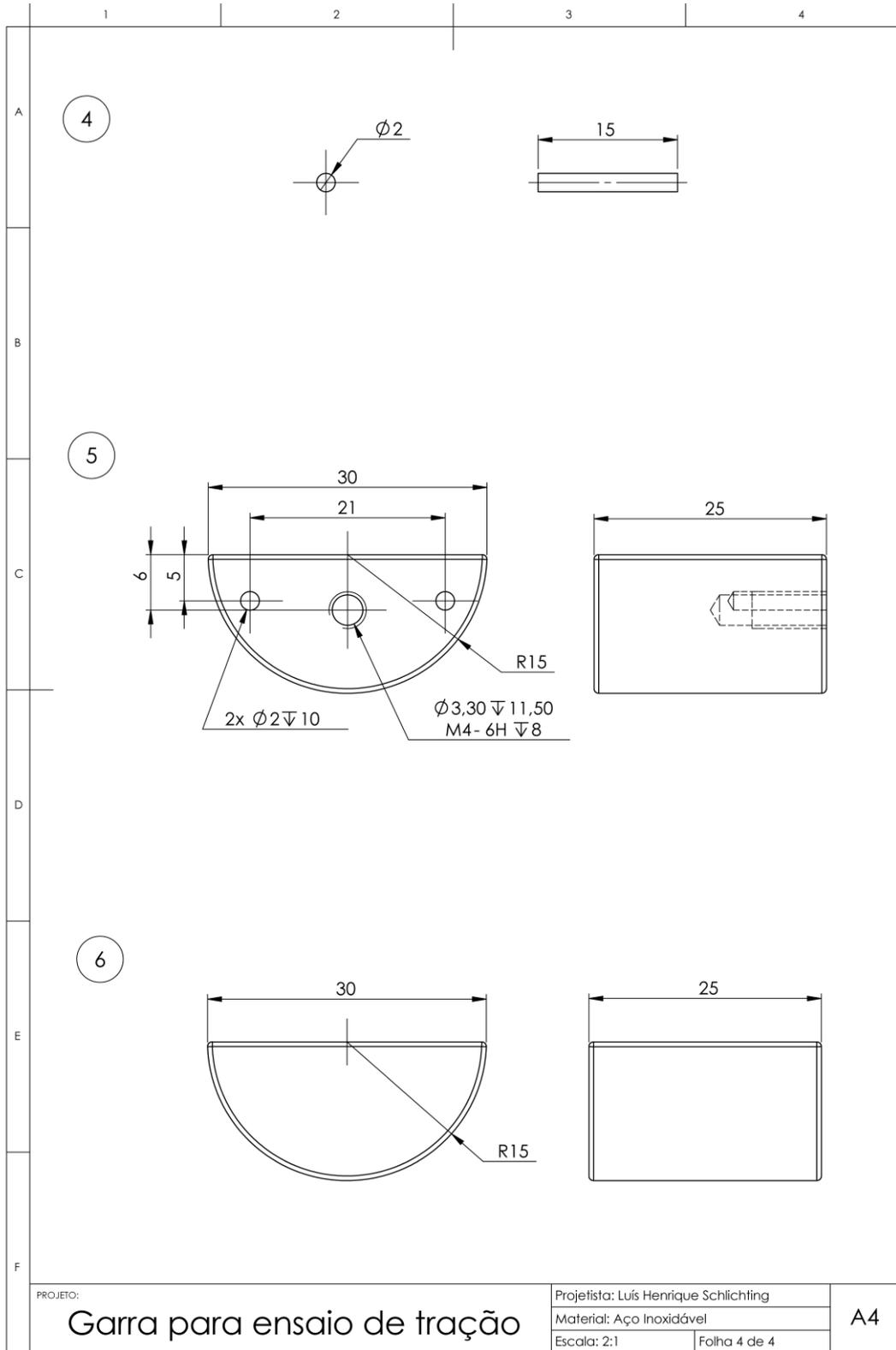


Figura 18 – Planta da garra para tração de fibras

(conclusão)



APÊNDICE F – Apresentação das TAB. 5, 6 e GRAF. 3

Tabela 5- Mensurações, média da carga e resistência à tração do feixe de fibra de vidro

Espécime	Carga (KN)	Carga (Kg)	Resistência à tração (MPa)
1	0,3223	32,89	1284,1
2	0,3305	33,73	1316,7
3	0,3492	35,64	1391,2
4	0,3392	34,62	1351,4
5	0,3463	35,34	1379,7
Média	0,3375	34,44	1344,6

Tabela 6- Módulo de elasticidade (MPa) da fibra de vidro e respectivas variações de tensão e deformação

Espécime	σ_2	σ_1	$\Delta\sigma$	ϵ_2	ϵ_1	$\Delta\epsilon$	E (módulo)
1	1090.3	890.8	199.5	0.0389	0.0333	0.0056	35906.8
2	1246.6	1027.2	219.4	0.0389	0.0333	0.0056	39492.4
3	1068.1	848.7	219.4	0.0333	0.0278	0.0056	39492.4
4	785.9	576.1	209.8	0.0389	0.0333	0.0056	37764.1
5	1121.5	900.8	220.7	0.0389	0.0333	0.0056	39729.1
Média							38477.0

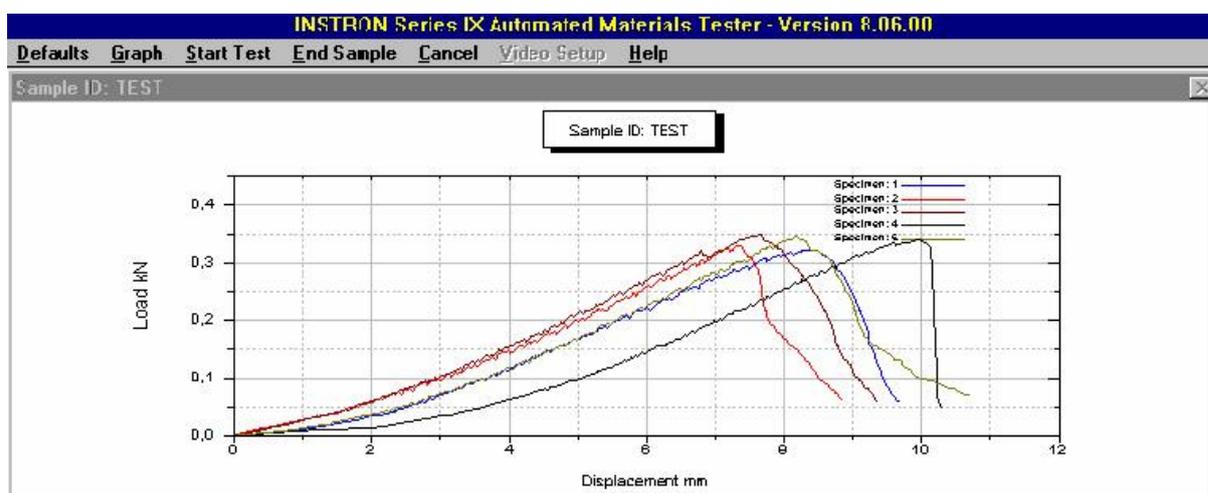


Gráfico 3 – Representação gráfica da carga-deslocamento na tração da fibra de vidro

APÊNDICE G – Apresentação da TAB. 7.

Tabela 7 - Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos compósitos Quixfil e Adoro

Grupo (armazenagem)	Tensão de ruptura (Mpa)	Módulo de elasticidade (Mpa)
Quixfil (1 h)	266,01	2390,46
Quixfil (24 hs)	274,40	2568,62
Adoro (1h)	293,54	1365,82
Adoro + calor (1h)	353,46	1736,74
Adoro + Unidade Targis (24hs)	372,47	1817,20

APÊNDICE H – Apresentação das TAB. 8 e GRAF. 4.

Tabela 8 - Aderência interfacial entre fibra de vidro e a resina Adoro

CP	d (mm)	l (mm)	Força (KN)	Aderência (MPa)
1	0,6	0,3	0,041	72,58
2	0,6	0,3	0,048	85,77
3	0,6	0,3	0,037	65,82
4	0,6	0,3	0,038	67,25
5	0,6	0,3	0,041	72,86
Média				72,86

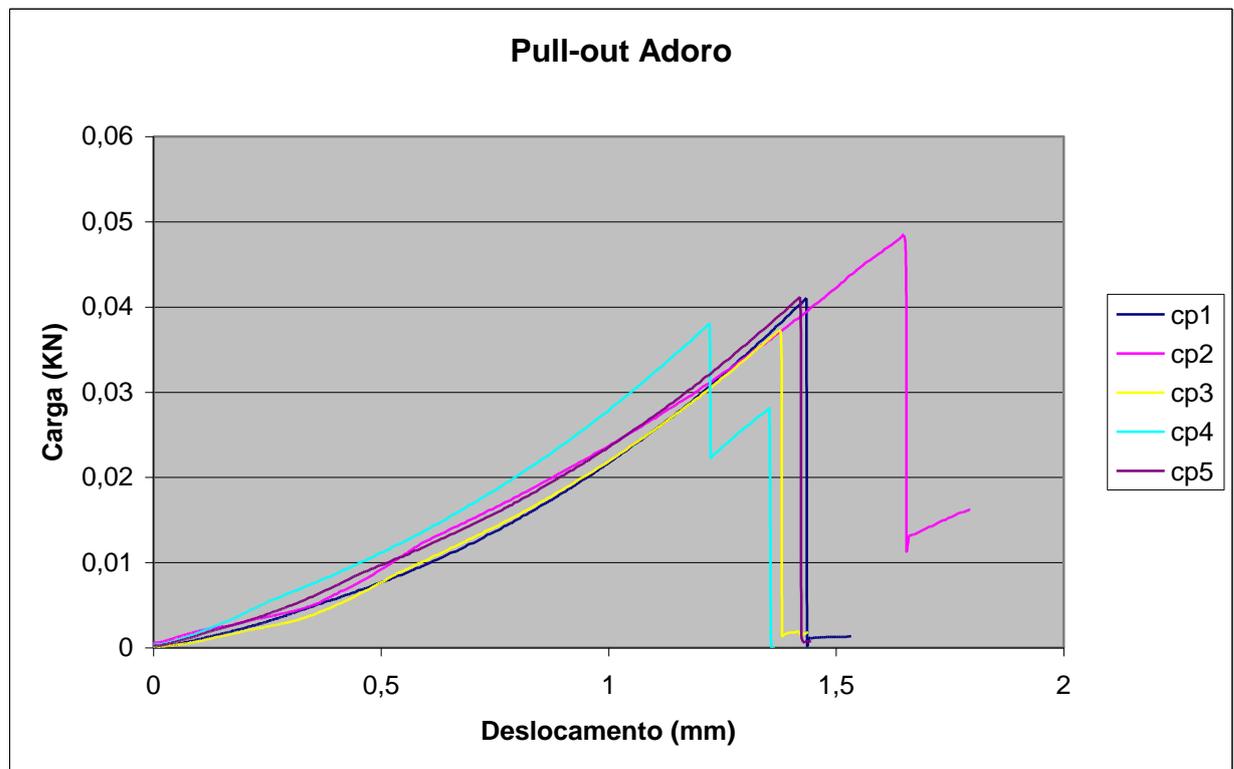


Gráfico 4 – Representação gráfica para o teste pull-out entre fibra de vidro e resina Adoro

APÊNDICE I – Apresentação da TAB. 9 e GRAF. 5.

Tabela 9 - Aderência interfacial entre fibra de vidro e a resina Quixfil

CP	d (mm)	l (mm)	Força (KN)	Aderência (Mpa)
1	0,6	0,3	0,058	102,49
2	0,6	0,3	0,069	122,72
3	0,6	0,3	0,061	108,76
4	0,6	0,3	0,060	105,82
5	0,6	0,3	0,070	123,30
Média				112,62

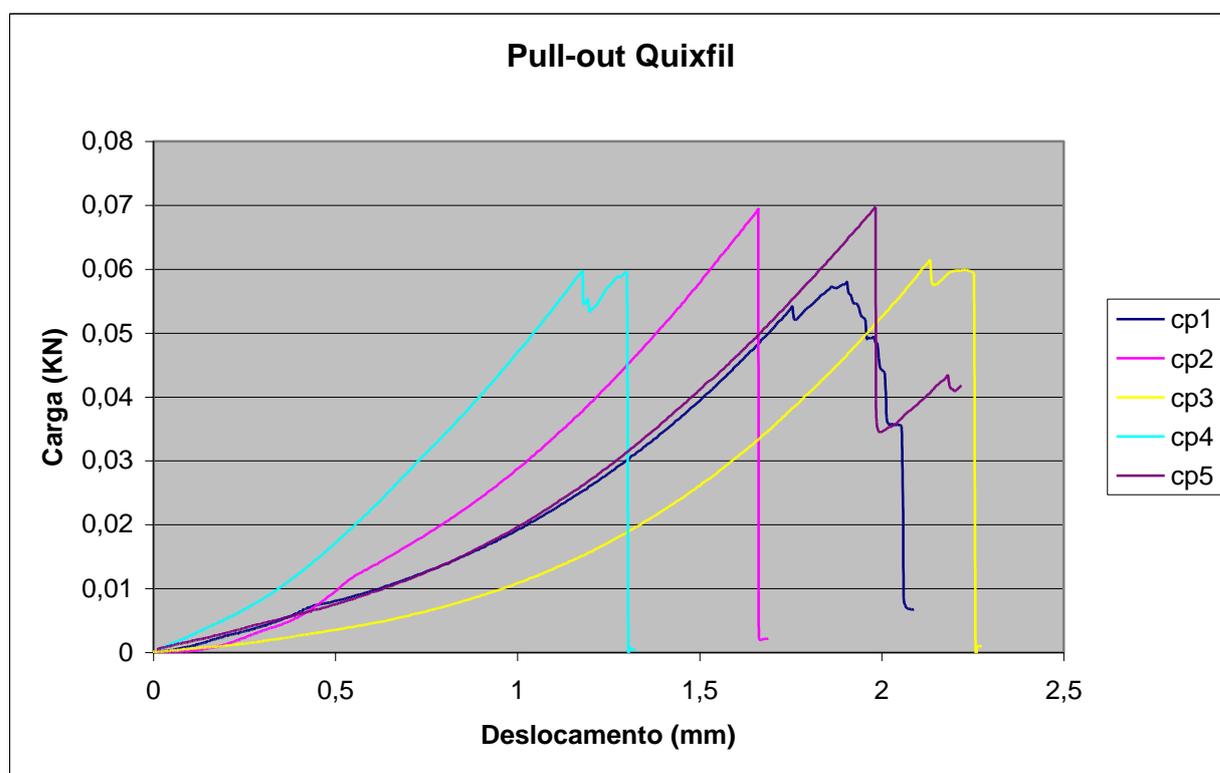


Gráfico 5 – Representação gráfica para o teste pull-out entre fibra de vidro e resina Quixfil

APÊNDICE J – Apresentação da FIG. 53.

Figura 53 – Planta do dispositivo para pré-tracionamento

(continua)

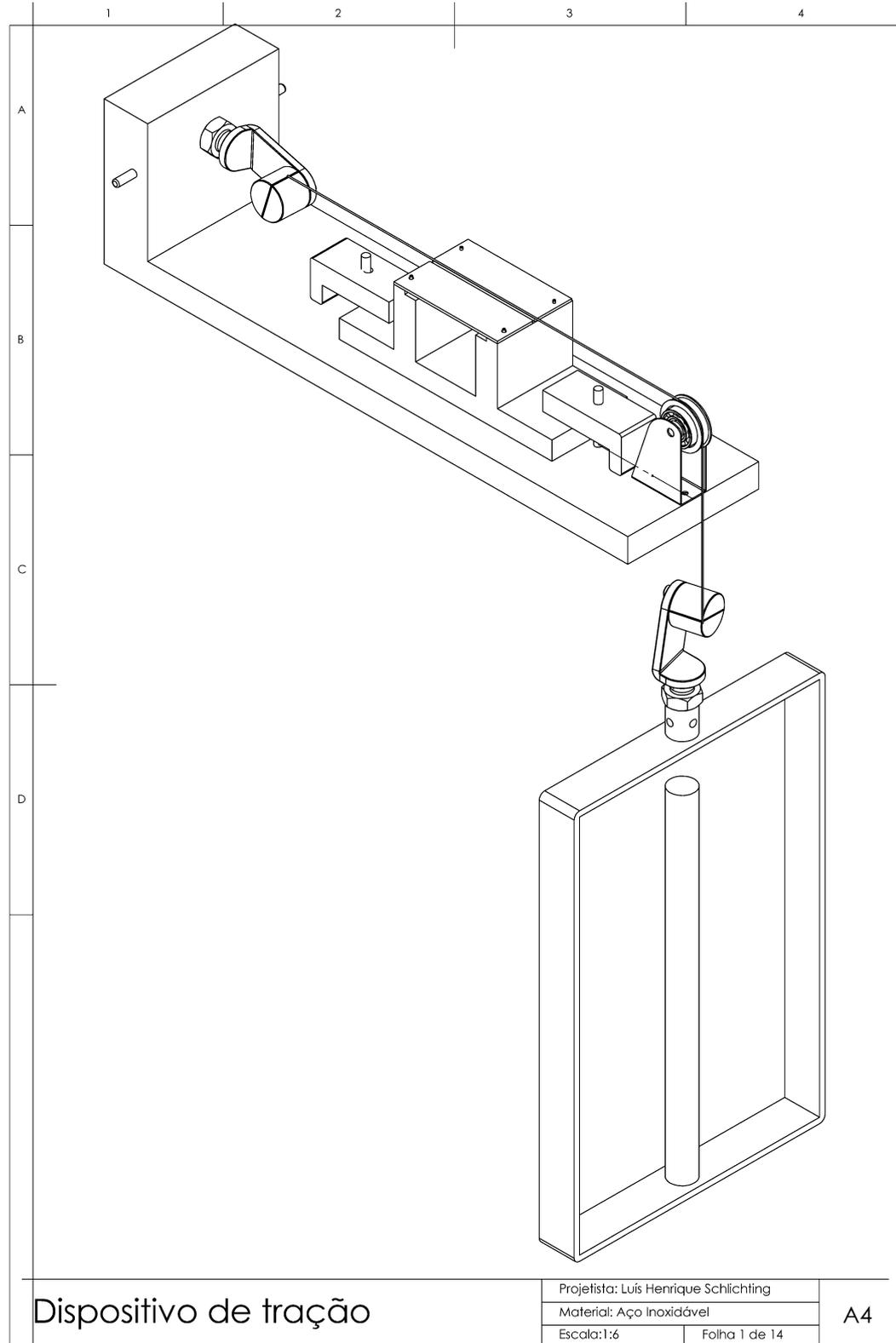


Figura 53 – Planta do dispositivo para pré-tracionamento

(continua)

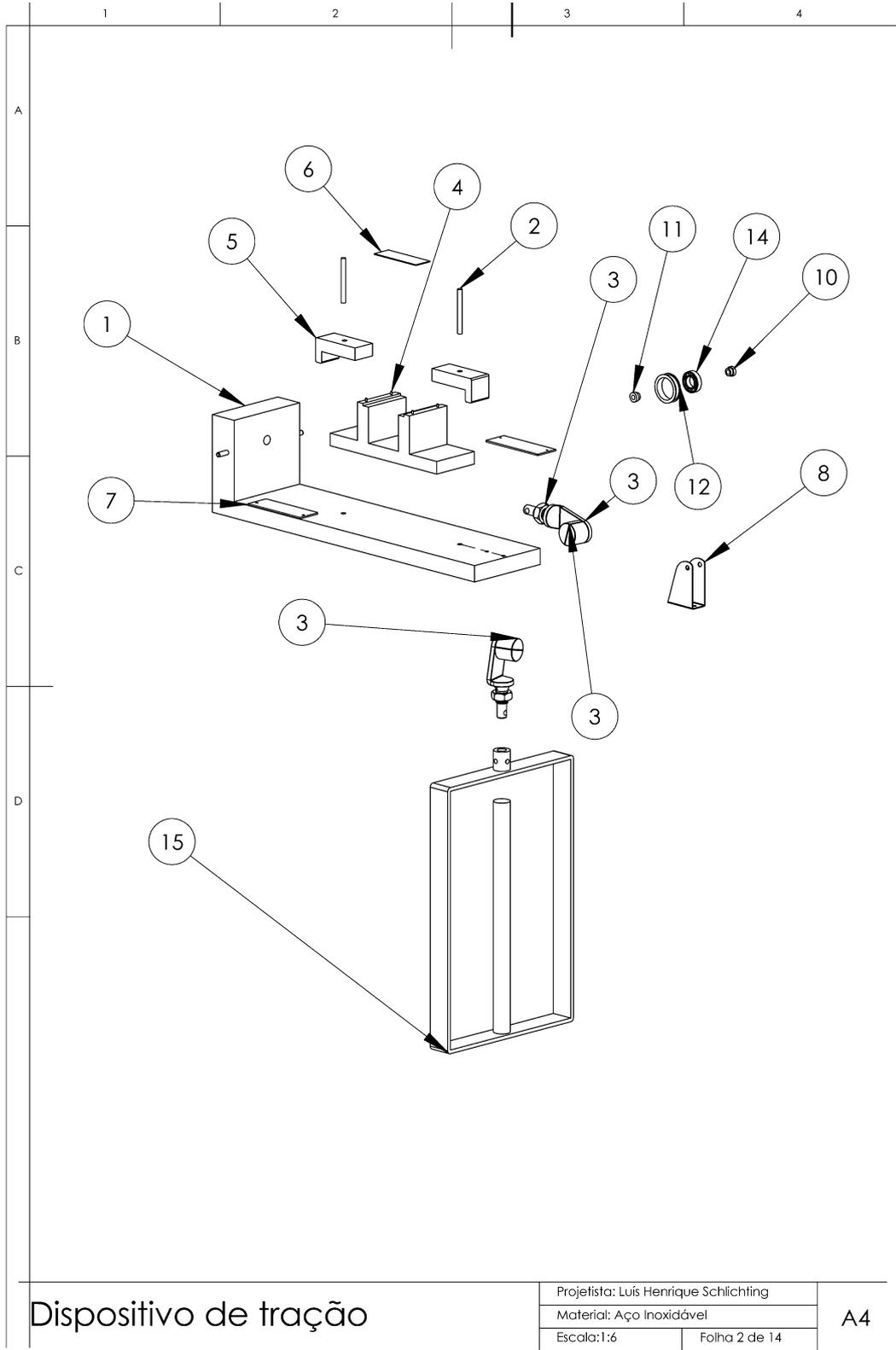


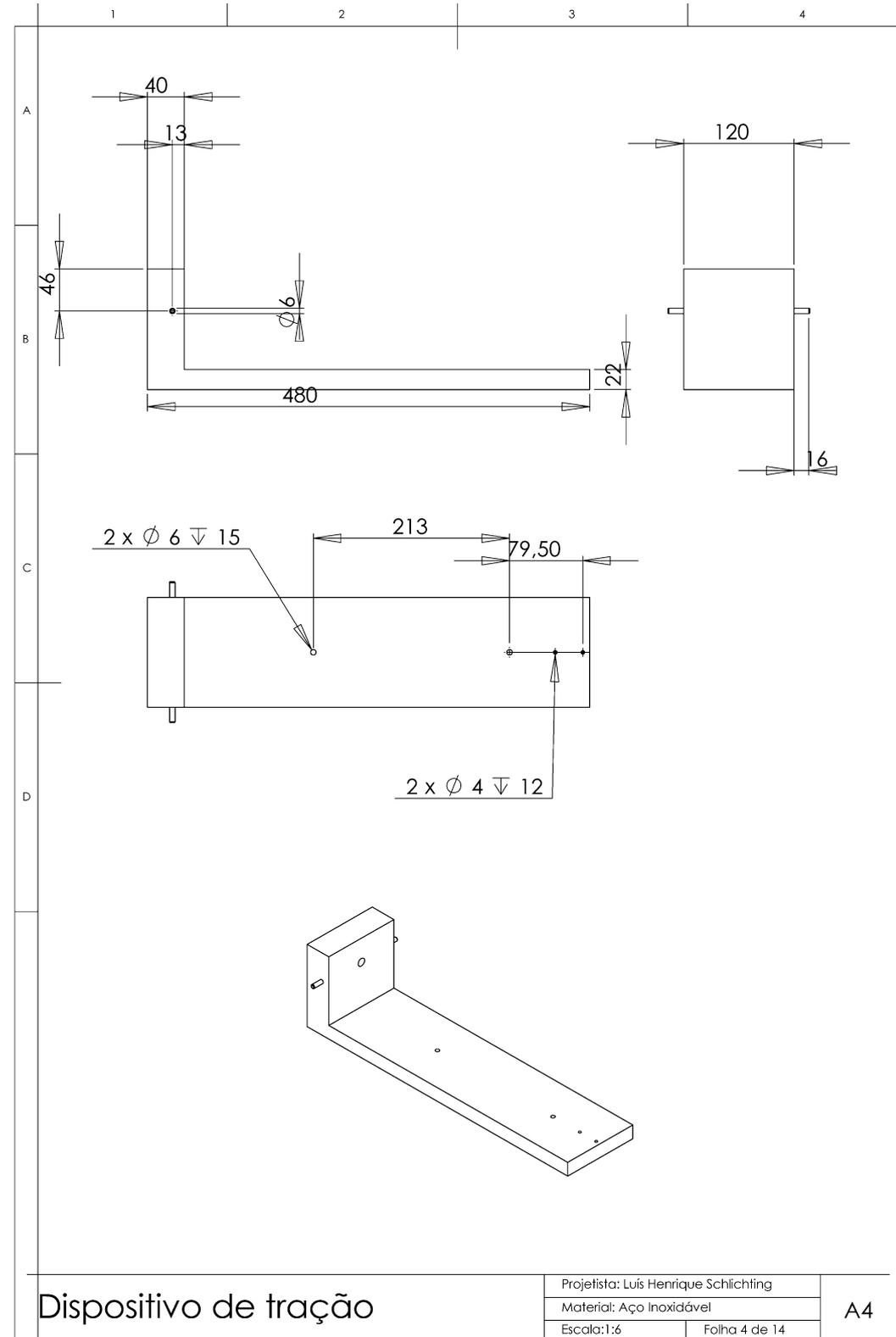
Figura 53 – Planta do dispositivo para pré-tracionamento

(continua)

	1	2	3	4																																																																
A																																																																				
B																																																																				
C	<table border="1"> <thead> <tr> <th>ITEM NO.</th> <th>PART NUMBER</th> <th>DESCRIPTION</th> <th>QTY.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>base</td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>pino_parafuso</td> <td></td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>garra</td> <td></td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>base_ponte</td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>presilha</td> <td></td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>laminula</td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>chapinha</td> <td></td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>apoio roldana</td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>knob-2</td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>encosto interno rolamento</td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>Mirroencosto interno rolamento</td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>roldana</td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>fibra</td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>SW3dPS-15x28x7 brg</td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>apoio de anilhas</td> <td></td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>				ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.	1	base		1	2	pino_parafuso		2	3	garra		2	4	base_ponte		1	5	presilha		2	6	laminula		1	7	chapinha		2	8	apoio roldana		1	9	knob-2		1	10	encosto interno rolamento		1	11	Mirroencosto interno rolamento		1	12	roldana		1	13	fibra		1	14	SW3dPS-15x28x7 brg		1	15	apoio de anilhas		1
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.																																																																	
1	base		1																																																																	
2	pino_parafuso		2																																																																	
3	garra		2																																																																	
4	base_ponte		1																																																																	
5	presilha		2																																																																	
6	laminula		1																																																																	
7	chapinha		2																																																																	
8	apoio roldana		1																																																																	
9	knob-2		1																																																																	
10	encosto interno rolamento		1																																																																	
11	Mirroencosto interno rolamento		1																																																																	
12	roldana		1																																																																	
13	fibra		1																																																																	
14	SW3dPS-15x28x7 brg		1																																																																	
15	apoio de anilhas		1																																																																	
D																																																																				
Dispositivo de tração			Projetista: Luís Henrique Schlichting Material: Aço Inoxidável Escala: 1:6	Folha 3 de 14 A4																																																																

Figura 53 – Planta do dispositivo para pré-tracionamento

(conclusão)



APÊNDICE K – Apresentação da TAB. 10.

Tabela 10 - Pesagem das anilhas, suporte e garra em Kg

Objeto	Peso nominal	Peso real
Anilha 5 Kg	5	4,785
Anilha 5 Kg	5	4,760
Anilha 5 Kg	5	5,080
Anilha 5 Kg	5	5,135
Anilha 5 Kg	5	5,075
Anilha 5 Kg	5	5,105
Anilha 4 Kg	4	3,900
Anilha 4 Kg	4	4,020
Anilha 3 Kg	3	2,930
Anilha 3 Kg	3	2,910
Anilha 2 Kg	2	1,885
Anilha 2 Kg	2	1,875
Anilha 1 Kg	1	0,970
Suporte	-	1,890
garra	-	0,334
TOTAL		50,654

APÊNDICE L – Apresentação das TAB. 11 e 12

Tabela 11 – Resultados do teste piloto para a resina Adoro Convencional: Peso/dimensões do espécime, dimensões do espécime, concentração da fibra (%) em peso e volume, resistência flexural (σ) e módulo flexural (E)

Amostra	Peso(mg)	b	h	comp	% peso	% volume	F(KN)	σ (Mpa)	E (Mpa)
1	186,1	2,04	2,10	25,05	18,41	11,67	0,138	459,52	9587,67
2	184,0	2,03	2,07	25,00	18,59	11,90	0,130	448,33	9894,78
3	184,1	2,04	2,07	25,00	18,58	11,84	0,135	463,84	10216,80
4	185,2	2,03	2,09	25,05	18,50	11,78	0,147	496,83	9897,65
5	187,5	2,04	2,11	25,05	18,28	11,62	0,135	445,86	9556,40
6	186,0	2,02	2,09	25,05	18,42	11,84	0,130	442,51	9845,61
7	188,3	2,03	2,07	25,00	18,16	11,90	0,143	492,23	10436,30
8	185,0	2,03	2,11	25,00	18,49	11,67	0,143	473,91	9243,14
Média	185,8				18,43	11,78		465,38	9834,79

Tabela 12 – Resultados do teste piloto para a resina Adoro Protendida: Peso/dimensões do espécime, dimensões do espécime, concentração da fibra (%) em peso e volume, resistência flexural (σ) e módulo flexural (E)

Amostra	Peso(mg)	b	h	comp	% peso	% volume	F(KN)	σ (Mpa)	E (Mpa)
1	186,0	2,04	2,08	25	18,39	11,78	0,160	542,23	10255,37
2	190,1	2,06	2,13	25	17,99	11,40	0,157	504,63	9360,63
3	190,1	2,07	2,10	25	17,99	11,50	0,156	512,96	9823,91
4	187,0	2,02	2,11	25	18,29	11,73	0,146	487,00	9932,30
5	189,8	2,06	2,10	25	18,02	11,56	0,143	472,16	9994,09
6	196,2	2,05	2,13	25	17,43	11,45	0,148	477,32	10015,40
7	188,3	2,05	2,08	25	18,16	11,73	0,170	574,45	10182,41
8	188,3	2,06	2,10	25	18,16	11,56	0,150	495,41	10088,67
Média	189,5				18,05	11,59		508,27	9956,60

APÊNDICE M – Apresentação das TAB. 13 e 14

Tabela 13 – Resultados do teste piloto para a resina Quixfil Convencional: Peso/dimensões do espécime, dimensões do espécime, concentração da fibra (%) em peso e volume, resistência flexural (σ) e módulo flexural (E)

Amostra	Peso(mg)	b	h	comp	% peso	% volume	F(KN)	σ (Mpa)	E (Mpa)
1	247,5	2,00	2,13	25,05	13,85	11,74	0,123	406,33	10703,34
2	238,3	1,97	2,13	25,10	14,41	11,92	0,132	444,44	11631,91
3	245,3	1,99	2,15	25,10	14,00	11,69	0,127	414,32	10176,72
4	240,5	1,99	2,08	25,00	14,22	12,08	0,130	454,28	12156,75
5	237,3	1,98	2,05	25,10	14,47	12,32	0,149	537,20	12450,89
6	241,7	1,99	2,10	25,05	14,18	11,96	0,134	458,86	11626,94
7	239,7	2,00	2,08	24,85	14,18	12,02	0,146	504,50	11721,66
8	242,1	2,01	2,07	25,00	14,13	12,02	0,123	426,80	11936,10
Média	241,6				14,18	11,97		455,84	11550,54

Tabela 14 – Resultados do teste piloto para a resina Quixfil Protendida: Peso/dimensões do espécime, dimensões do espécime, concentração da fibra (%) em peso e volume, resistência flexural (σ) e módulo flexural (E)

Amostra	Peso(mg)	b	h	comp	% peso	% volume	F (KN)	σ (Mpa)	E (Mpa)
1	250,7	1,99	2,15	25,00	13,64	11,69	0,187	610,42	11300,06
2	245,9	2,00	2,17	25,00	13,91	11,52	0,182	580,49	10331,01
3	248,8	1,98	2,14	25,00	13,75	11,80	0,165	546,79	11622,42
4	243,2	1,98	2,10	25,00	14,06	12,03	0,174	597,33	10627,04
5	252,6	2,00	2,20	25,00	13,54	11,36	0,170	526,18	10214,57
6	252,1	2,02	2,16	25,10	13,62	11,46	0,151	480,66	10752,46
7	250,0	2,00	2,23	25,00	13,68	11,21	0,166	499,81	10367,32
8	242,5	2,02	2,16	25,00	14,10	11,46	0,143	455,99	9928,01
Média	248,2				13,79	11,57		537,21	10642,86

APÊNDICE N – Apresentação da TAB. 15Tabela 15 – Resultados para a resina Adoro sem fibra (G1): Peso do espécime, largura (b), altura (h) e comprimento dos espécimes em mm, resistência flexural (σ), módulo flexural (E), falha (mm)

Amostra	Peso (mg)	b	h	comp	F (KN)	σ (Mpa)	E (Mpa)	Falha
1	165,7	1,98	2,05	25,00	0,026	93,02	3994,50	0,83
2	165,0	1,98	2,05	25,00	0,019	68,54	3828,77	0,60
3	165,1	1,99	2,05	25,00	0,022	77,84	3932,52	0,67
4	165,8	2,01	2,05	25,00	0,025	87,01	3796,96	0,83
5	164,8	2,06	1,99	25,00	0,019	70,61	3784,56	0,65
6	162,0	2,05	1,97	24,95	0,021	78,43	3983,45	0,71
7	163,8	2,07	1,98	25,05	0,020	72,83	3736,32	0,68
8	167,1	2,01	2,07	25,05	0,026	90,91	3734,65	0,88
9	168,0	2,02	2,08	24,95	0,026	87,88	3644,03	0,84
10	168,2	2,01	2,09	25,00	0,025	85,08	3757,77	0,76
Média						81,22	3819,35	0,75

APÊNDICE O – Apresentação da TAB. 16

Tabela 16 – Resultados para a resina Adoro Convencional (G2): Peso do espécime, peso e volume da fibra, largura (b), altura (h) e comprimento dos espécimes em mm, concentração da fibra (%) em peso e volume, resistência flexural (σ), módulo flexural (E), falha inicial (mm), sinal de falha inicial (audível e/ou visual) e falha final (mm)

Amostra	Peso (mg)	Fibra (mg)	Fibra (mm ³)	b	h	comp	% peso	% volume	F(KN)	σ (Mpa)	E (Mpa)	Falha lida	Folga	Falha inicial	Sinal falha	Falha final
1	182,4	34,17	12,49	2,01	2,10	24,98	18,74	11,85	0,132	447,08	10124,80	1,05	0,08	0,97	click/visual	1,40
2	184,5	34,19	12,50	2,03	2,10	24,99	18,53	11,73	0,132	441,34	9515,28	0,85	0,11	0,74	click/visual	1,47
3	180,6	34,20	12,50	2,00	2,09	25,00	18,94	11,96	0,139	477,67	9535,98	0,97	0,11	0,86	click/visual	1,59
4	179,8	34,17	12,49	2,01	2,06	24,98	19,01	12,08	0,141	496,97	10656,02	1,33	0,16	1,17	click/visual	1,51
5	181,1	34,19	12,50	2,03	2,06	24,99	18,88	11,96	0,113	394,92	9877,81	0,92	0,18	0,74	click/visual	1,33
6	179,2	34,28	12,53	2,01	2,06	25,06	19,13	12,08	0,128	450,90	10136,64	0,82	0,07	0,75	click/visual	1,45
7	181,5	34,23	12,51	2,02	2,06	25,02	18,86	12,02	0,130	454,27	10593,92	0,96	0,07	0,89	click	1,38
8	180,0	34,19	12,50	2,01	2,07	24,99	18,99	12,02	0,112	389,43	10267,71	0,91	0,07	0,84	click/visual	1,22
9	175,8	34,17	12,49	1,97	2,07	24,98	19,44	12,26	0,114	404,80	10144,64	0,89	0,08	0,81	click/visual	1,33
10	179,6	34,20	12,50	1,98	2,09	25,00	19,04	12,08	0,138	477,29	10039,23	0,86	0,09	0,77	click/visual	1,56
Média							18,95	12,00		443,47	10089,20			0,85		1,42

* Realizado sob temperatura de 23 °C e umidade relativa do ar de 50%

APÊNDICE P – Apresentação da TAB. 17

Tabela 17 – Resultados para a resina Adoro Protendida (G3): Peso do espécime, peso e volume da fibra, largura (b), altura (h) e comprimento dos espécimes em mm, concentração da fibra (%) em peso e volume, resistência flexural (σ), módulo flexural (E), falha inicial (mm), sinal de falha inicial (audível e/ou visual) e falha final (mm)

Amostra	Peso (mg)	Fibra (mg)	Fibra (mm ³)	b	h	comp	% peso	% volume	F(KN)	σ (Mpa)	E (Mpa)	Falha lida	Folga	Falha inicial	Sinal falha	Falha final
1	183,1	34,23	12,51	2,00	2,08	25,02	18,69	12,02	0,168	580,74	10892,42	1,34	0,09	1,25	visual	1,74
2	184,4	34,17	12,49	2,03	2,09	24,98	18,53	11,78	0,183	618,12	10480,68	1,62	0,06	1,57	click/visual	1,88
3	179,3	34,15	12,48	1,99	2,08	24,96	19,04	12,08	0,151	525,12	10875,06	1,37	0,07	1,30	click/visual	1,57
4	182,5	34,10	12,47	2,02	2,10	24,93	18,69	11,79	0,163	547,59	10437,48	1,46	0,09	1,37	visual	1,69
5	183,5	34,16	12,49	2,00	2,08	24,97	18,62	12,02	0,177	614,02	10872,48	1,38	0,11	1,27	visual	1,82
6	175,8	34,21	12,51	2,00	2,08	25,01	19,46	12,02	0,145	500,99	10745,74	1,31	0,12	1,19	click/visual	1,52
7	180,3	34,25	12,52	1,99	2,09	25,04	19,00	12,02	0,171	590,85	10836,03	1,58	0,07	1,51	click/visual	1,74
8	178,2	34,21	12,51	1,97	2,07	25,01	19,20	12,26	0,166	591,38	10301,64	1,62	0,11	1,51	click/visual	1,91
9	182,2	34,25	12,52	2,00	2,08	25,04	18,80	12,02	0,170	588,36	10696,30	1,51	0,11	1,40	visual	1,80
10	179,9	34,23	12,51	1,98	2,08	25,02	19,03	12,14	0,153	534,42	11214,25	1,34	0,12	1,22	click	1,53
Média							18,91	12,02		569,16	10735,21			1,36		1,72

* Realizado sob temperatura de 23 °C e umidade relativa do ar de 50%

APÊNDICE Q – Apresentação da TAB. 26

Tabela 26 – Resultados para a resina Quixfil sem fibra (G4): Peso do espécime, largura (b), altura (h) e comprimento dos espécimes em mm, resistência flexural (σ), módulo flexural (E), falha (mm)

Amostra	Peso (mg)	b	h	comp	F (KN)	σ (Mpa)	E (Mpa)	Falha
1	264,3	2,00	2,10	25,00	0,043	146,26	9213,70	0,51
2	261,1	2,00	2,05	25,00	0,039	137,42	10128,93	0,46
3	261,9	2,05	2,10	25,00	0,036	120,79	8655,53	0,45
4	259,4	2,00	2,10	25,00	0,030	100,34	9242,23	0,34
5	263,9	2,00	2,10	25,00	0,040	135,71	9380,96	0,47
6	265,1	2,00	2,10	25,00	0,043	144,90	9557,87	0,49
7	263,0	2,00	2,10	25,00	0,031	106,80	9169,84	0,37
8	260,0	2,00	2,00	25,00	0,039	147,75	10278,57	0,49
9	252,9	2,00	2,05	25,00	0,038	133,85	9582,66	0,47
10	256,3	2,05	2,00	25,00	0,040	144,51	9581,54	0,53
Média						131,83	9479,18	0,46

APÊNDICE R – Apresentação da TAB. 27

Tabela 27 – Resultados para a resina Quixfil convencional (G5): Peso do espécime, peso e volume da fibra, largura (b), altura (h) e comprimento dos espécimes em mm, concentração da fibra (%) em peso e volume, resistência flexural (σ), módulo flexural (E), falha inicial (mm), sinal de falha inicial (audível e/ou visual) e falha final (mm)

Amostra	Peso (mg)	Fibra (mg)	Fibra (mm ³)	b	h	comp	% peso	% volume	F(KN)	σ (Mpa)	E (Mpa)	Falha lida	Folga	Falha inicial	Sinal falha	Falha final
1	247,6	34,24	12,52	2,04	2,10	25,03	13,83	11,67	0,119	397,66	11826,73	0,77	0,17	0,60	click/visual	1,15
2	243,5	34,34	12,55	2,03	2,10	25,10	14,10	11,73	0,127	426,09	11266,34	0,70	0,09	0,61	click	1,35
3	249,3	34,34	12,55	2,05	2,11	25,10	13,77	11,56	0,124	408,58	11451,91	0,85	0,07	0,78	click	1,18
4	244,3	34,20	12,50	2,03	2,09	25,00	14,00	11,78	0,126	424,60	11619,57	0,96	0,11	0,85	click	1,21
5	242,7	34,34	12,55	2,01	2,09	25,10	14,15	11,90	0,145	494,08	11227,96	0,76	0,01	0,75	visual	1,47
6	248,5	34,17	12,49	2,06	2,09	24,98	13,75	11,61	0,125	416,08	11752,46	0,93	0,17	0,76	click/visual	1,21
7	248,8	33,99	12,43	2,03	2,10	24,85	13,66	11,73	0,126	420,56	11926,28	0,58	0,07	0,51	visual	1,19
8	249,9	34,20	12,50	2,01	2,15	25,00	13,69	11,57	0,140	451,39	11246,74	0,71	0,06	0,65	click	1,35
9	237,1	34,13	12,48	1,97	2,09	24,95	14,40	12,14	0,108	377,56	12020,81	0,81	0,20	0,61	click/visual	1,11
10	241,4	34,20	12,50	2,03	2,09	25,00	14,17	11,78	0,130	438,13	11509,17	0,65	0,11	0,54	click/visual	1,28
Média							13,95	11,75		425,47	11584,80			0,67		1,25

* Realizado sob temperatura de 24,8 °C e umidade relativa do ar de 56%

APÊNDICE S – Apresentação da TAB. 28

Tabela 28 – Resultados para a resina Quixfil protendida (G6): Peso do espécime, peso e volume da fibra, largura (b), altura (h) e comprimento dos espécimes em mm, concentração da fibra (%) em peso e volume, resistência flexural (σ), módulo flexural (E), falha inicial (mm), sinal de falha inicial (audível e/ou visual) e falha final (mm)

Amostra	Peso (mg)	Fibra (mg)	Fibra (mm ³)	b	h	comp	% peso	% volume	F (KN)	σ (Mpa)	E (Mpa)	Falha lida	Folga	Falha inicial	Sinal falha	Falha final
1	251,6	34,20	12,50	2,04	2,17	25,00	13,59	11,29	0,173	538,72	10701,84	0,87	0,03	0,84	click/visual	1,64
2	249,4	34,20	12,50	2,04	2,13	25,00	13,71	11,51	0,202	653,14	11319,16	1,06	0,05	1,01	click/visual	1,95
3	231,6	34,24	12,52	1,99	2,07	25,03	14,78	12,14	0,144	505,93	11804,47	0,93	0,17	0,76	click/visual	1,48
4	230,4	34,20	12,50	1,98	2,09	25,00	14,84	12,08	0,161	558,80	11171,40	0,98	0,10	0,88	visual	1,64
5	245,4	34,20	12,50	2,03	2,18	25,00	13,94	11,30	0,172	535,79	10248,62	0,98	0,15	0,84	click	1,69
6	239,0	34,17	12,49	2,00	2,11	24,98	14,30	11,85	0,165	554,91	11831,65	0,98	0,09	0,89	click/visual	1,57
7	248,8	34,20	12,50	2,03	2,12	25,00	13,75	11,62	0,173	570,17	11575,60	1,07	0,07	1,00	click	1,61
8	242,3	34,20	12,50	2,04	2,13	25,00	14,11	11,51	0,192	621,38	11243,69	1,15	0,15	1,00	click/visual	1,83
9	246,0	34,20	12,50	2,04	2,10	25,00	13,90	11,67	0,174	580,90	11588,02	1,11	0,16	0,95	click/visual	1,67
10	247,1	34,20	12,50	2,03	2,12	25,00	13,84	11,62	0,170	560,30	11439,27	1,05	0,17	0,88	click/visual	1,62
Média							14,08	11,66		568,00	11292,37			0,90		1,67

* Realizado sob temperatura de 24,8 °C e umidade relativa do ar de 56%

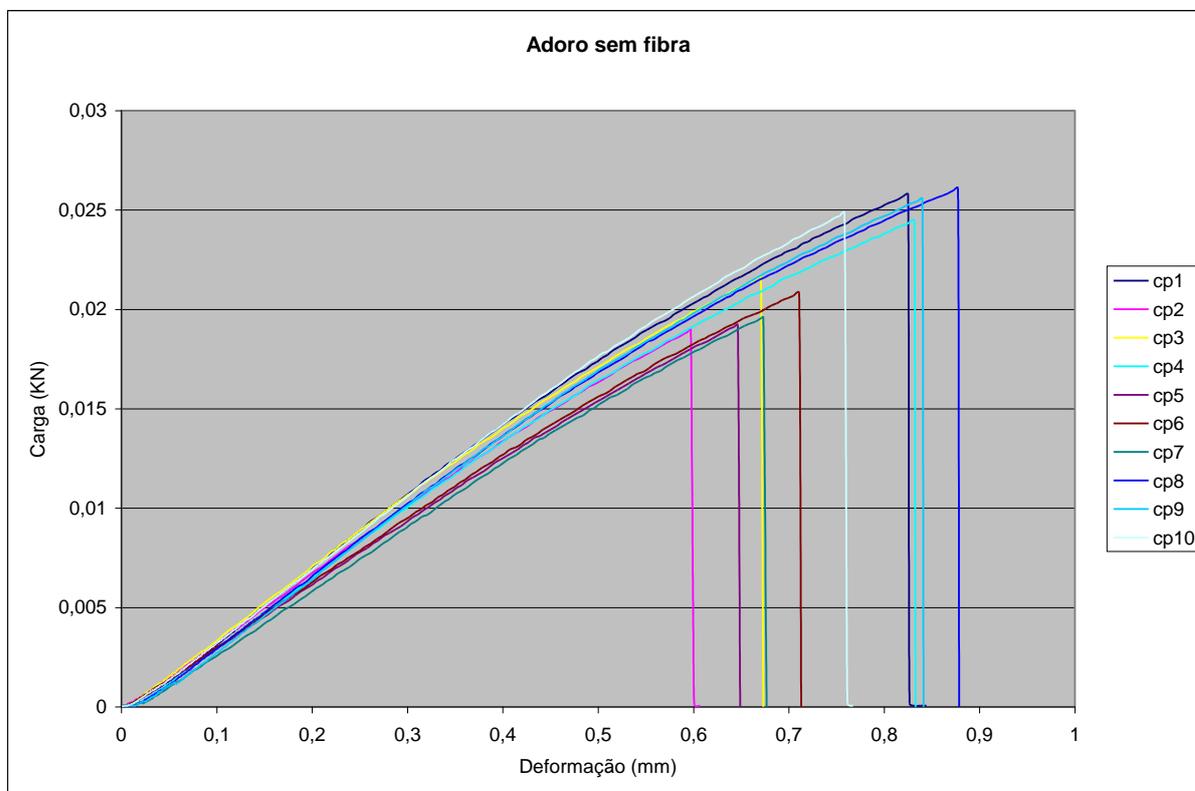
APÊNDICE T – Apresentação do GRAF. 6

Gráfico 6 – Representação gráfica do teste flexural para a resina Adoro sem fibra (G1)

APÊNDICE U – Apresentação GRAF. 7 e 8

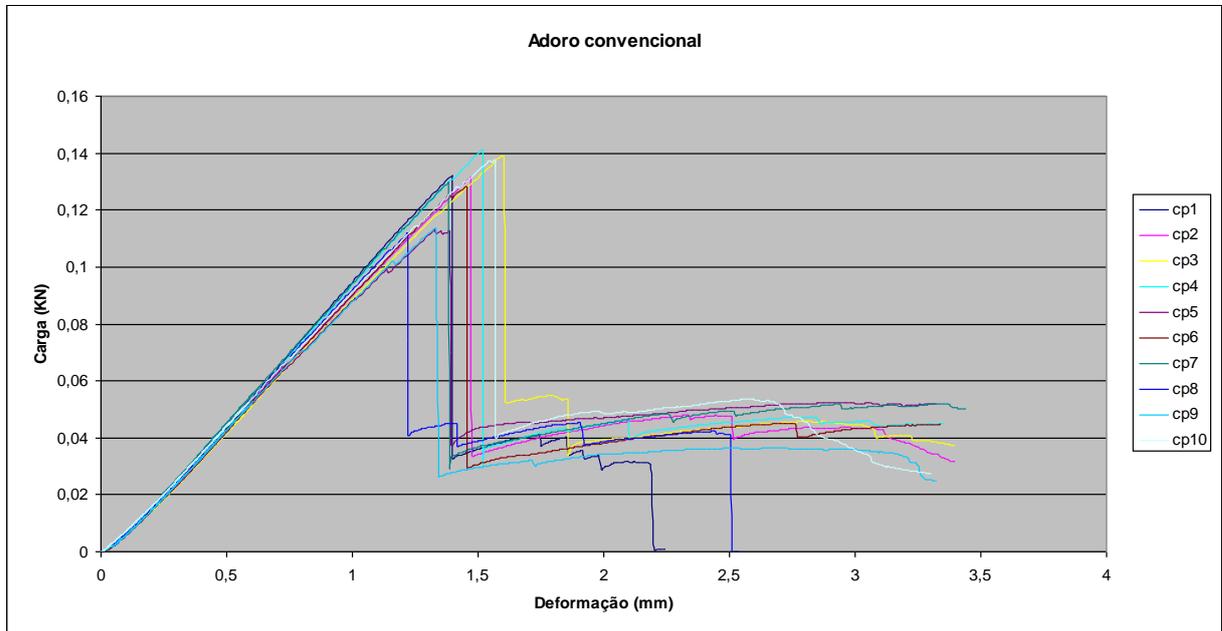


Gráfico 7 – Representação gráfica do teste flexural para a resina Adoro convencional (G2)

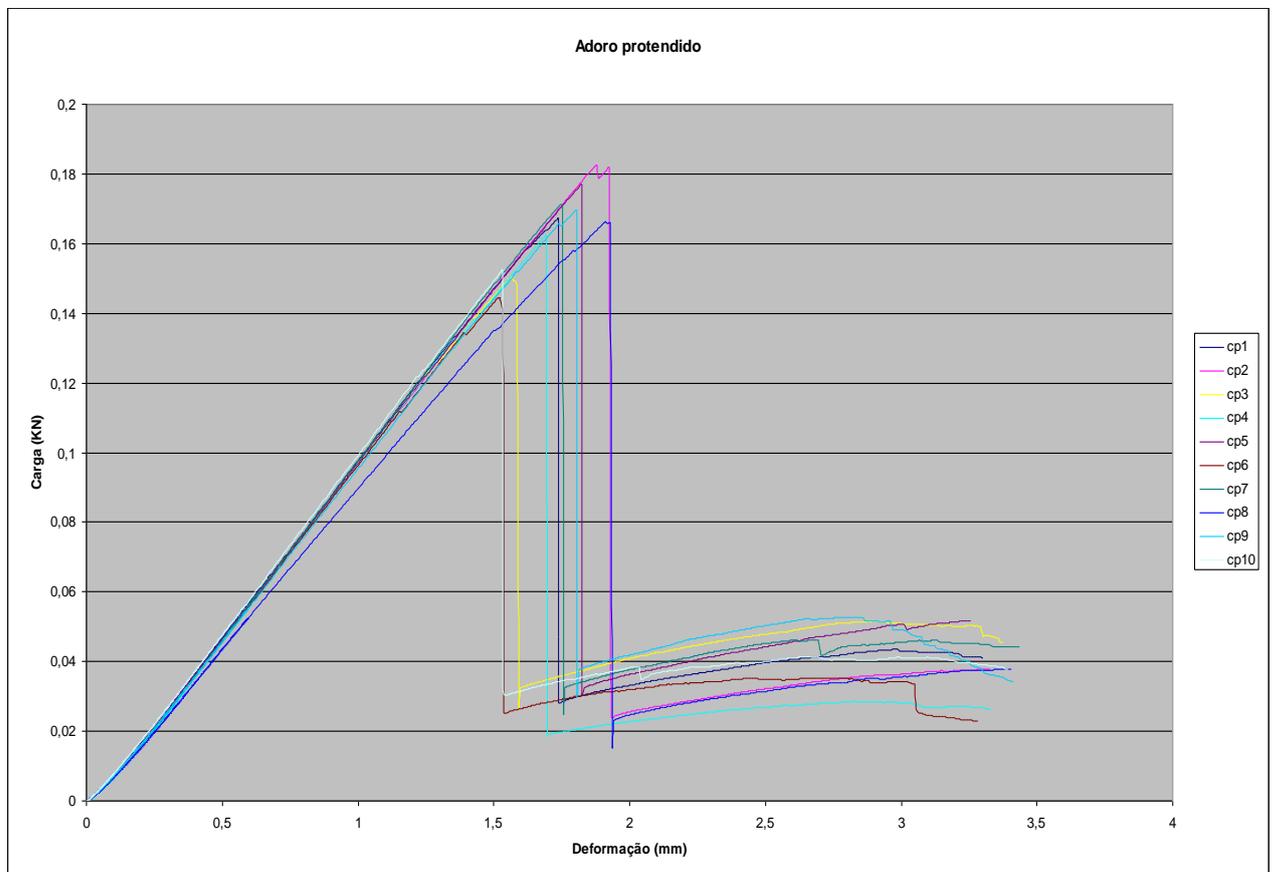


Gráfico 8 – Representação gráfica do teste flexural para a resina Adoro protendida (G3)

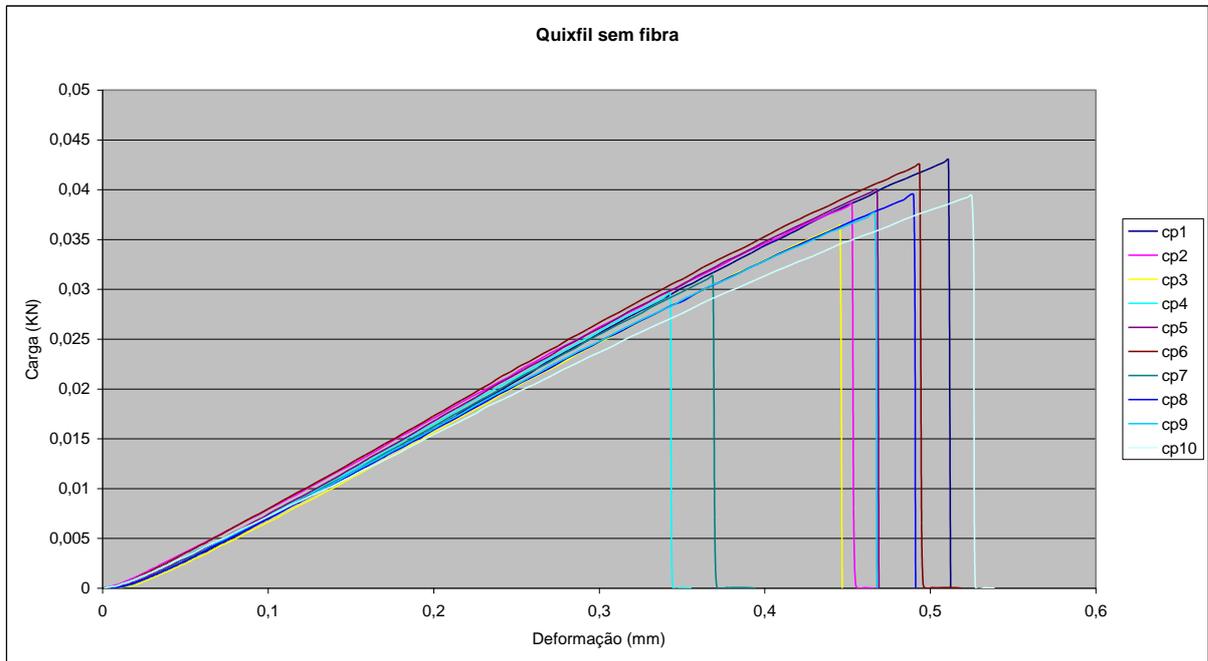
APÊNDICE V – Apresentação do GRAF. 15

Gráfico 15 – Representação gráfica do teste flexural para a resina Quixfil sem fibra (G4)

APÊNDICE X – Apresentação dos GRAF. 16 e 17

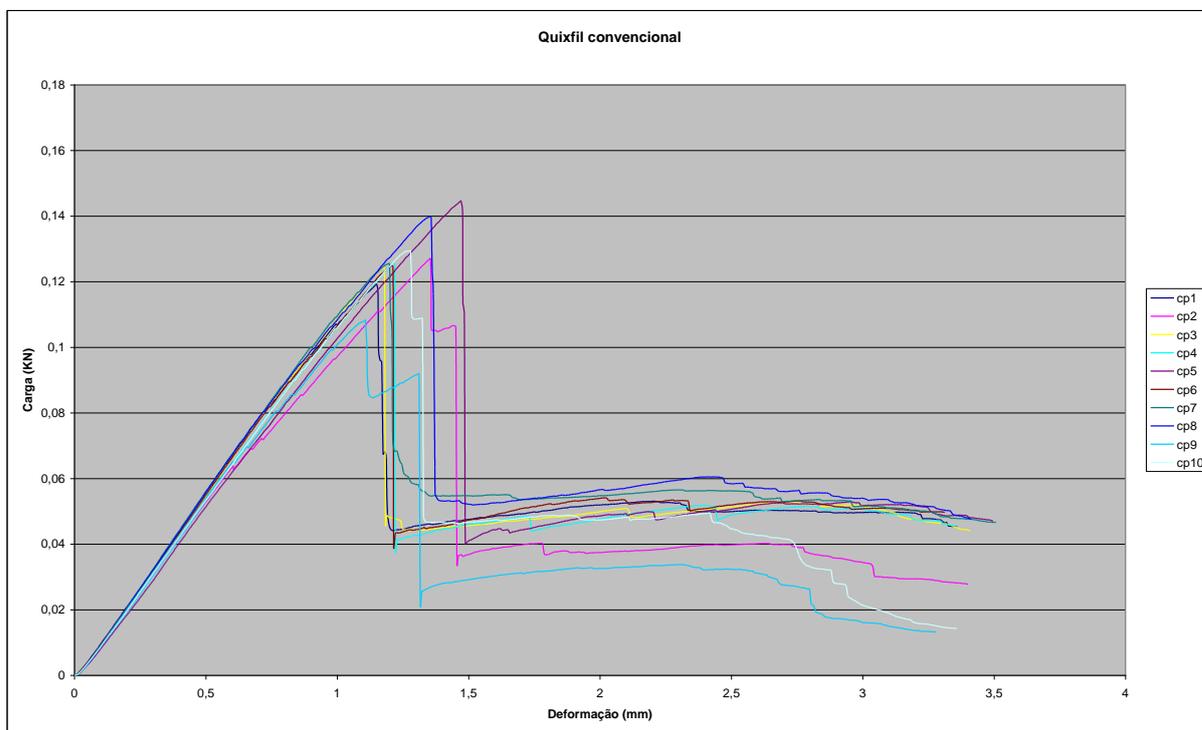


Gráfico 16 – Representação gráfica do teste flexural para a resina Quixfil convencional (G5)

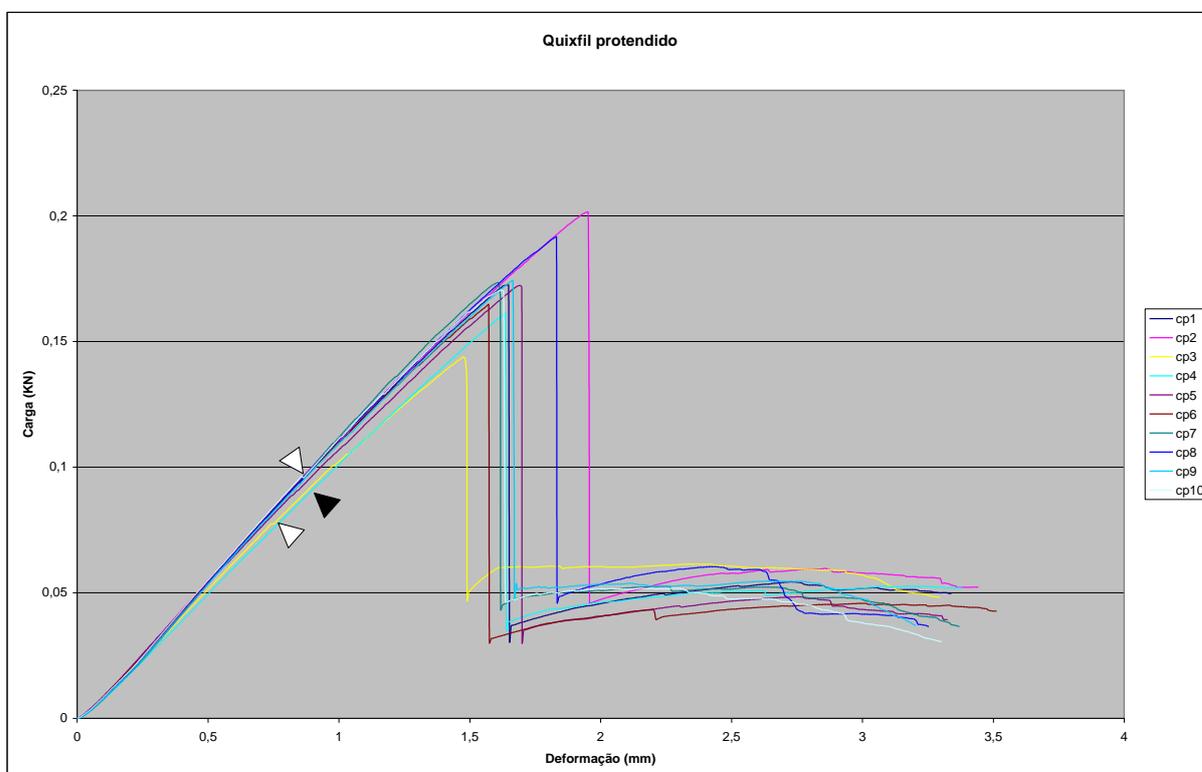


Gráfico 17– Representação gráfica do teste flexural para a resina Quixfil protendido (G6). Em alguns espécimes a falha inicial é facilmente identificável no gráfico através da leitura de uma queda momentânea da carga (setas brancas). Em outros, a falha inicial não gerou quedas de carga suficientemente discerníveis no traçado, sendo então identificada por sinal visual ou audível (seta preta).