

MIGUEL DA FONSECA AMARAL RIBEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE PLACA DE SINALIZAÇÃO EM PLÁSTICO
REFORÇADO COM FIBRAS DE SISAL E CARGA DE REJEITO DE CORTE DE
PEDRAS ORNAMENTAIS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Protasio Ferreira e Castro, PhD.

Co-orientadora: Prof^a. Regina Coeli Martins Paes Aquino, D.Sc.

Niterói, RJ
2005

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da
UFF

R484 Ribeiro, Miguel da Fonseca Amaral.

Desenvolvimento de placa de sinalização em plástico reforçado com fibras de sisal e carga de rejeito de corte de pedras ornamentais / Miguel da Fonseca Amaral Ribeiro. – Niterói, RJ : [s.n.], 2005.

217 f.

Orientadores: Protasio Ferreira e Castro e Regina Coeli Martins Paes Aquino.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, 2005.

1. Engenharia civil. 2. Compósitos poliméricos. 3. Materiais de construção.
4. Resíduo sólido – Reaproveitamento. I. Título.

CDD 624

MIGUEL DA FONSECA AMARAL RIBEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE PLACA DE SINALIZAÇÃO EM PLÁSTICO
REFORÇADO COM FIBRAS DE SISAL E CARGA DE REJEITO DE CORTE DE
PEDRAS ORNAMENTAIS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Engenharia Civil.

Aprovada por:

Prof. Protasio Ferreira e Castro, PhD (orientador)
Universidade Federal Fluminense

Prof^a. Regina Coeli Martins Paes Aquino (co-orientadora), D.Sc.
Centro Federal de Educação Tecnológica - Campos

Prof^a. Ana Lucia Diegues Skury, DSc.
Universidade Estadual do Norte Fluminense - Campos

Prof. Gustavo Saad Terra, DSc.
Centro Federal de Educação Tecnológica - Campos

Niterói, RJ.
2005

Aos
Meus pais.

À Mariana

AGRADECIMENTOS

Ao término deste trabalho quero externar o meu agradecimento a todos aqueles que contribuíram para sua realização. Externo meu agradecimento, em especial:

Aos meus pais, pelo amor, carinho, incentivo e apoio nas horas mais difíceis, durante nossa vida em comum. Na superação de todas as dificuldades no início do curso.

Ao Professor Protasio Castro, pela amizade e incentivo, durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Professora Ana Seroa e aos Professores Fathi e Nireu pelo incentivo inicial do curso.

Aos amigos Sergio Lamas e Luiz Fabio pelo incentivo para ingressar e prosseguir nos estudos.

Aos colegas de mestrado, em especial ao Marcos Paulo, Alexandre Giovaneti, Rondinei, Armando, Eduardo, Fausto, Luciana, Luiz da Guia, Melissa, Monika e Fernanda.

Às funcionárias do mestrado, em especial à Clarice, Gláucia, Cássia, que sempre foram solícitas na resolução dos problemas pertinentes ao curso.

Ao senhor Fábio Kalil da Empresa Vernom pelo fornecimento de material para confecção das placas.

Ao engenheiro Antônio Inácio e aos auxiliares de laboratório da UERJ, pela ajuda durante os ensaios mecânicos.

Ao Manuel da empresa Interplás pelas orientações quanto ao uso dos materiais de poliéster.

Ao meu irmão João pela ajuda no início dos testes com os materiais para produção das placas.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
SUMÁRIO.....	7
LISTA DE FOTOGRAFIAS.....	11
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	12
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE QUADROS	15
RESUMO.....	16
ABSTRACT	17
1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Justificativa	20
1.2 Pesquisas desenvolvidas no banco de dissertações da uff em compósitos com uso de fibras vegetais e ou resíduos.	20
1.3 Relevância	21
1.4 escopo do trabalho.....	22
2 COMPÓSITOS.....	24
3 MATRIZ.....	35
3.1 Polímero.....	35
3.2 Matrizes de base polimérica.	39
3.2.1 Resinas de poliéster insaturado	40
3.2.1.1 Glicóis.....	41
3.2.1.2 Ácidos insaturados	42
3.2.1.3 Ácidos saturados.....	43
3.2.1.4 monômero de estireno.....	44
3.2.1.5 síntese das resinas de poliéster	45
3.2.1.6 cura das resinas poliéster.....	47
3.2.1.7 Pós-cura	52
3.1.2 Resina Tereftálica	53
3.1.3 Resinas epóxi	54
3.1.4 Resinas ester-vinílicas	55
3.1.5 Resinas fenólicas.....	55
3.2 comparativo das características físicas das resinas	55
4 FIBRAS DE REFORÇO	58
4.1 Fibras NATURAIS Vegetais	58
4.1.1 Fibras vegetais mais utilizadas	62

4.1.1.1	Fibras de sisal	62
4.1.1.2	Fibras de Piaçava.....	64
4.1.1.3	Fibras de coco	65
4.1.1.4	Fibras de juta.....	66
4.1.1.5	Fibras de bagaço de cana-de-açúcar	66
4.1.1.6	Fibras de RAMI.....	66
4.1.1.7	Fibras de algodão.....	67
4.1.1.8	Fibras de bambú.....	67
4.1.1.9	Fibras de bananeira.....	68
4.1.1.10	Fibras de henequem ou maguey	68
4.1.2	Características físicas e mecânicas de algumas fibras vegetais	68
4.2	Fibras industriais	69
4.2.1	Fibra de vidro	70
4.2.1.1	Fibras do tipo E	74
4.2.1.2	Fibras do tipo R e S.....	74
4.2.2	Fibras Aramida.....	75
4.2.3	Fibras de carbono	75
4.3	Materiais comerciais utilizados em compósitos reforçados com fibras	76
4.3.1	Fio roving	77
4.3.1.1	Roving direto	78
4.3.1.2	Roving contínuo para processo de enrolamento	78
4.3.1.3	Roving para laminação por projeção	78
4.3.1.4	Roving para painéis translúcidos.....	78
4.3.1.5	Roving para processo SMC e processo a vácuo.....	78
4.3.2	Mantas	79
4.3.3	Véu de superfície	80
4.3.4	Tecidos	80
4.3.5	Tecidos não tramados (PREFORMA)	84
4.3.6	Tecidos híbridos.....	86
4.3.7	Prepregs	87
4.3.8	Tecidos tridimensionais e quadridimensionais.....	88
4.3.9	Complexos de fibras	91
5	MATERIAIS DE ENCHIMENTO.....	92
5.1	Princípios de funcionamento.....	92
5.2	Características e tipos de núcleos e adesivos.	95
5.3	Núcleo de Madeira	97
5.4	Núcleo de espuma	99
5.4.1	Núcleo de espuma de poliuretano	99
5.4.2	Núcleo de espuma fenólica.....	99
5.4.3	Núcleo de espuma de poliéster.....	99
5.4.4	Núcleo de espuma de poliestireno.....	100
5.4.5	Núcleo de espuma de PVC.....	100
5.5	Núcleo tipo colméia (Honeycomb)	102
6	CARGAS E ADITIVOS.....	105
6.1	Cargas minerais industriais.....	106
6.2	Cargas leves	108
6.2.1	Microesferas de vidro	108
6.2.2	Microesferas fenólicas	108
6.2.3	Microesferas plásticas.....	109
6.2.4	Sílica	109

6.3	ADITIVOS	109
6.3.1	Aditivos inibidores	109
6.3.2	Aditivo absorvente de ultravioleta	111
6.3.3	Aditivo desaerante	111
6.3.4	Aditivos umectantes e dispersantes.....	112
6.3.5	Aditivos redutores de emissão de estireno	114
6.3.6	Aditivo nivelante	114
7	PROCESSOS DE MOLDAGEM.....	115
7.1	laminacão MANUAL (hand lay-up).....	117
7.1.1	Aplicação de estrutura de reforço	120
7.1.2	Aplicação de núcleo sanduíche	121
7.2	laminacão a pistola (SPRAY-up).....	123
7.3	laminacão em moldes macho	126
7.4	laminacão com utilização de pressão	127
7.4.1	Laminacão vacumm bagging	127
7.4.2	Autoclave	129
7.4.3	Processo RTM	129
7.4.4	Laminacão com auxílio de vácuo sistema VARTM	132
7.4.5	Sistema SMC	132
7.4.6	Laminacão com o uso de Prepegs.....	134
7.5	laminacão de placas planas.....	135
7.6	pultrusão	137
7.7	enrolamento filamental	139
8	PROCESSOS DE MONTAGEM E UNIÕES	144
8.1	ligacão com uso de Adesivos.....	145
8.2	ligacão com parafusos	149
9	ENSAIOS EM COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA	152
9.1	ensaios MECÂNICos (Destrutivos)	152
9.2	inspeção visual	153
9.3	Ensaio em placas de sinalizacão em poliéster reforçado com fibra de vidro	153
10	PROGRAMA EXPERIMENTAL	157
10.1	caracterizacão dos materias	159
10.1.1	Fibra de sisal.....	159
10.1.2	Resíduo de corte de pedra ornamental.....	162
10.1.3	Resina de poliéster	164
10.1.3.1	Especificacões do produto	164
10.2	Produção de placas de compósito de matriz polimérica reforçado com fibras vegetais.....	164
10.2.1	Fôrma para moldagem da placa.....	165
10.2.2	Prensa para moldagem.....	166
10.2.3	Equipamentos utilizados	168
10.2.3	Materiais utilizados:.....	168
10.2.4	Formas e dimensões das placas.....	169
10.2.5	Dosagem dos materiais para a laminacão	169
10.2.6	Preparo da fôrma	169
10.2.7	Moldagem das placas	170
10.3	preparo de corpos de prova para ensaio	173
10.4	ensaio de tração.....	174

11	CONSIDERAÇÕES FINAIS	184
	BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA	186
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	188
	ANEXO 1	189

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Foto 4.1 Rolo de fio roving.	77
Foto 4.2 Tecido tridimensional.	88
Foto 5.1 Aspecto do núcleo de enchimento tipo colméia de fibra aramida.	102
Foto 7.1 Pistola para processo de laminação spray up.	123
Foto 7.2 processo de enrolamento filamentar	141
Foto 10.1 Fibras segregadas da resina na superfície da matriz.....	157
Foto 10.2 Fibras de piaçava segregadas na superfície do laminado	158
Foto 10.3 Fissura devido à retração da matriz.	158
Foto 10.2 Corpo de prova fixado a máquina de tração.	160
Foto 10.4 material colhido em forma de torrões.....	162
Foto 10.5 Resíduo colhido e tratado	163
Foto 10. 6 Padrão usado no ensaio de campo, para placa de sinalização.	165
Foto 10.7 Misturador acoplado a furadeira de bancada.....	170
Foto 10.8 tecido cortado.....	171
Foto 10.9 Rejeito de fibras de sisal.	172
Foto 10.10 Placa pronta para ensaio de campo.....	173
Foto 10.11 Equipamento universal de ensaio a tração utilizado.	175
Foto 10.11- Corpo de prova fixado a maquina.....	176

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 Classificação dos compósitos.	26
Figura 2.2 Padrão de deformação da matriz em torno das fibras.....	27
Figura 2.3 compósito reforçada com fibras	28
Figura 2.4 Diagrama de tensão deformação da matriz, fibra e compósito típico.....	29
Figura 2.5 Limites de resistência longitudinal e transversal para compósitos com 50% de teor de fibras e três tipos de fibras, reforçados unidirecionalmente.	32
Figura 3.1 Copolímeros.....	37
Figura 3.2 Esquema dos copolímeros.....	38
Figura 3.3 Esquema do poliéster curado.....	40
Figura 3.4 Glicóis mais usados na síntese da resina de poliéster.....	42
Figura 3.5 Fórmula dos ácidos insaturados usados na síntese de resina de poliéster	43
Figura 3.6 Ácidos saturados mais usados na síntese de resinas poliéster.	43
Figura 3.7 Fórmula química da molécula de estireno.....	45
Figura 3.8 Desenho esquemático do reator.	46
Figura 3.9 Tempos de cura das resinas de poliéster.....	48
Figura 3.10: Diagrama de dos sistemas mais usados em resinas de poliéster.	49
Figura 4.1 Estrutura da parede celular da célula de fibras.	59
Figura 4.2 Fibra de linho em corte transversal do caule e fragmento de fibras isoladas.	61
Figura: 4.3 Esquema de forno para produção de fibra de vidro.	71
Figura 4.4 Orifício de fiberização.....	72
Figura 4.5 - Equipamento para produção de mantas.	79
Figura 4.6 - Aspecto das mantas.....	80
Figura: 4.7 Esquema comparativo das características mecânicas dos tecidos de trama balanceada e mantas.	83
Figura: 4.8 Configurações das diversos tipos de tramas.....	84
Figura: 4.9 Costuras usadas em preformas; A - tipo trava, B - tipo corrente.....	85
Figura 4.10 Esquema representativo do tecido biaxial.....	86
Figura 4.11 Esquema representativo dos tecidos triaxial e quadriaxial.....	86
Figura: 4.12 Esquema de produção de um prepeg	87
Figura 4.13 Esquema do tecido tridimensional manufaturado com varetas.	89
Figura 4.14 (A) Orientação do tecido quadridimensional / 4.14 (B) Corte do mesmo.	90
Figura: 4.15 Diversas configurações de reforço.....	91
Figura 5.1 Comparativa de rigidez obtido com o uso de núcleo sanduíche.	93
Figura 5.2 Comportamento do enchimento sobre cargas diversas.	94
Figura 5.3 Danos típicos de materiais compósitos com enchimento.....	95

Figura 5.4 Falhas na adesão.....	97
Figura 5.5 Defeitos na aplicação de núcleo em peças curvas.....	97
Figura 5.6 Espuma de PVC em blocos colado sobre tela.	101
Figura 5.7 Laminado com enchimento de colméia explodido e montado.....	103
Figura 6.1 Processo de polimerização do poliéster.....	110
Figura 6.2 Polimerização do poliéster relacionada com os inibidores.....	111
Figura 7.1 Esquema de um laminado típico.....	120
Figura 7.2 Reforços aplicados em laminados, 1 tarugos de madeira, 2 peças seccionadas, 3 compensado, 4 meia cana de madeira, 5 tubos de cartão cortado ao meio, 6 cordões de papel ou jornal enrolado, tubos ou seções de plástico ou alumínio, poliuretano flexível.....	121
Figura 7.3 Processo de moldagem vacum bagging.....	127
Figura 7.4 Molde para o processo RTM, e a posição do bico de injeção e dos respiros.....	130
Figura 7.5 Esquema do processo de pultrusão.....	138
Figura 7.6 Modelos de cabeçotes de injeção.....	139
Figura 7.7 Diversos tipos de forma de enrolamento.....	140
Figuras 7.8 Variáveis do processo de enrolamento.....	143
Figura 8.1 Tipos de ligações para estruturas pré-moldadas.....	145
Figura 8.2 Diversos tipos de união de peças planas.....	146
Figura 8.3-A Juntas inadequadas.....	147
Figura 8.3-B Juntas adequadas e junta plana sobreposta com face com gel coat..	147
Figura 8.4 Juntas superpostas.....	148
Figura 8.5 geometria de juntas mecânicas.....	150
Figura 8.6 Junta sobreposta e junta flangeda com fixação com parafuso.....	150
Figura 8.7 Ligações em peças estruturais com parafusos.....	151
Figura 10.1 Fluxograma do processo de tratamento do rejeito.....	163
Figura 10.2 Perspectiva da forma para produção da placa.....	166
Figura 10.2 esquema explodido da prensa usada para moldagem da placa.....	167
Figura 10.3 prensa montada.....	168
Figura 10.5 Corpo de prova para ensaio de tração.....	174
Figura 10.6 Diagrama tensão / deformação RcrE-Tec.....	180
Figura 10.7 Diagrama tensão / deformação Tal-Tec.....	180
Figura 10.8 Diagrama tensão / deformação RcrC-Tec.....	181
Figura 10.9 Diagrama tensão / deformação Tal-RRS.....	182
Figura 10.10 Diagrama tensão / deformação RcrE-RRS.....	182

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Propriedades do policarbonato não reforçado e com três diferentes porcentagens de reforço orientado aleatoriamente.....	34
Tabela 10.1 - Resultados de ensaio de tração do tecido.	161
Tabela 10.2 Tratamento dos resultados de amostra de RcrC-Tec.....	177
Tabela 10.3 Tratamento de resultados de ensaio a tração de RcrE-Tec	177
Tabela 10.4 Tratamento de resultados de ensaio a tração de Tal-Tec	178
Tabela 10.5 Tratamento dos resultados de ensaio a tração de RcrE- RRS.....	178
Tabela 10.6 Tratamento dos resultados do ensaio a tração das amostras Tal-RRS	179
Tabela 10.7 Análise de variância RcrC-Tec / Tal-Tec.....	179

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 Sistemas de cura.....	50
Quadro 4.1 Características física e mecânica de algumas fibras.....	69
Quadro 4.2 Composição dos diversos tipos de fibra de vidro.	74
Quadro 9.1 Características de chapas de FRP para sinalização.	156

RESUMO

Esta dissertação apresenta um estudo da produção de placas de sinalização viária em compósito de matriz polimérica reforçada com fibra de sisal. O estudo está dividido em duas etapas. A primeira faz uma revisão bibliográfica sobre compósitos, caracterizando este material, estudando os componentes, matriz fibras de reforço, enchimento, cargas e aditivos. Em seguida abordam-se os processos de produção, montagem e ensaios aplicáveis aos compósitos. Na segunda etapa consiste no desenvolvimento do programa experimental com o intuito de estudar a viabilidade da aplicação do compósito reforçado com fibras vegetais em placas de sinalização. Para consecução deste programa foram desenvolvidas placas de compósito de matriz polimérica adicionando-se carga de talco industrial e rejeito do corte de pedras ornamentais. A proporção de mistura matriz / carga usada foi de 50% / 50%. Com esta proporção foi constatada que a resistência do compósito com adição de rejeito alcançou maior resistência à tração. Para estudar a possibilidade de redução de consumo de resina foi modificada a formulação para 40% / 60%, sendo a redução de resistência de 23,27%. As fibras utilizadas foram na configuração de fibras curtas dispersas e de fibras na forma de tecido. Os ensaios desenvolvidos demonstraram a potencialidade dos referidos compósitos. Estudos mais aprofundados deverão ser implementados para confirmação da viabilidade do uso deste material, fazendo uma análise da possibilidade de novas formulações.

Palavras-chave: compósito, matriz polimérica, fibra de sisal, cargas, resíduo, placas de sinalização.

ABSTRACT

This paper presents a study about the manufacturing of signalling plates in vegetal fiber reinforced polymeric matrix compounds. The study is divided into two steps, namely: The first one reviews bibliographically compounds and their materials such as matrix, reinforcement fibers, fillers, cores and additives. In furtherance, the study features the manufacturing processes, installation and essays applicable to the compounds. The second step consists of the development of an experimental program destined to studying the feasibility of applying the vegetal fiber reinforced compounds in signalling plates. For the execution of this program, polymeric matrix compound plates were developed with the addition of industrial talc and residues of cut-off industrial ornamental stones. The proportion of matrix/filler used in the process was of 50% to 50%. In such proportion, it was verified that the resistance of the compounds with the residue addition reached a higher traction resistance. In order to study the possibility of reduction of resin consume the formulation was modified to 40% to 60%, being the resistance reduction of 23,27%, though. Fibers were used in the configuration of woven fabric and weaving residues. The essays demonstrate the potentiality of the aforementioned compounds. Further studies should be implemented so as to confirm the feasibility of use of such material by means of analyzing the possibility of new formulations.

Key words: compound, polymeric matrix, reinforcement fiber, sisal fiber, cores, residue, signalling plates

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento científico e tecnológico tem sofrido profunda evolução no decorrer da história da humanidade. Nos primórdios a humanidade preocupava-se com a sobrevivência. Tal preocupação levava o homem a desenvolver ferramentas e a usar materiais que obtinha da natureza, conforme as peculiaridades culturais e a disponibilidade local.

Com o desenvolvimento industrial, grandes avanços tecnológicos e científicos foram alcançados, possibilitando ao homem melhorias nas condições de vida e uma maior expectativa de vida.

Novos materiais foram desenvolvidos e sintetizados, resultado do desenvolvimento científico. Os polímeros e as cerâmicas tiveram papel importante neste cenário. Os polímeros possibilitaram uma nova categoria de materiais, denominados de compósitos.

Apesar de todo este desenvolvimento o que se pode constatar é que não houve preocupação com as reservas naturais de materiais e matérias primas. Pensava-se que a natureza era uma fonte inesgotável.

Com o crescimento da demanda industrial os danos ambientais começaram a aparecer e foi constatado que eram irreversíveis. A consequência deste desconhecimento legou a terra de forma global, modificação que só poderão ser contornadas por meio de políticas pública e privadas em âmbito mundial, de redução de danos ao meio ambiente.

Estes danos estão associados não só a cadeia industrial, mas também ao descarte pós-uso dos produtos resultantes.

A indústria segundo a visão atual não é responsável pelo produto apenas até o momento de sua venda e prazo de garantia, Callister (2000). Sua responsabilidade

passa ao descarte das embalagens e rejeitos pós-uso, tais como as embalagens PET, as pilhas e os pneus.

As indústrias procuram adequar sua produção a uma forma de produção ambientalmente sustentável. Esta adequação compreende o uso mais racional de matéria prima, bem como o tratamento dos resíduos gerados pelos seus produtos, a utilização de matérias primas provenientes de materiais reciclados e financiamento de reciclagem de produtos descartados pós-uso.

Os consumidores a cada ano que passa têm mais preocupação com as origens dos produtos, se os danos advindos de sua produção estão entre os padrões internacionalmente aceitos. A imagem das indústrias está ligada ao selo ambiental.

Um grande desafio é colocado para os centros de pesquisa: dar destino economicamente viável aos rejeitos industriais e desenvolver novos materiais que minimizem os danos ao meio ambiente.

Segundo Callister (2000),

“ maiores esforços de reciclagem e o desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem. Como consequência dos aspectos econômicos não somente da produção, mas também do impacto ambiental e de fatores ecológicos, está se tornando cada vez mais importante considerar o ciclo de vida “ desde o berço até o túmulo” dos materiais em relação ao processo global de fabricação.”

O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade da utilização de reforço de fibras de sisal em substituição as fibras sintéticas em compósito de matriz polimérica. Também será pesquisada a possibilidade de adição de cargas para redução do consumo de resina de poliéster através da adição de cargas, sendo as cargas objeto do estudo o talco industrial e o rejeito de corte de rochas ornamentais.

Para tal será estudada a aplicabilidade deste material na produção de placas de sinalização. Serão focados processos de produções simples, que viabilizem sua consecução em comunidades agrícolas e cooperativas, procurando agregar valor à cultura de fibras de sisal e dar destinação adequada ao rejeito de corte de rocha. O produto resultante será submetido a ensaio mecânico para verificar a sua adequação a norma NBR 13275 relativa ao produto em estudo.

1.1 JUSTIFICATIVA

A preocupação com o meio ambiente tem gerado exigências ao setor industrial para a destinação segura de seus resíduos em consonância com os princípios do desenvolvimento sustentável.

Segundo Bigno (2002) apud Andrade e Moura (2002), são produzidas duzentos e quarenta toneladas de resíduo por ano de corte de rocha não havendo destino adequado. O que torna sua utilização uma maneira de reduzir os impactos ambientais causados por estas indústrias.

A produção de fibras vegetais segundo Aquino (2003), a produção de fibras concorre com destaque na agricultura mundial sendo a sua industrialização importante setor na atividade econômica mundial.

As fibras vegetais são importante matéria prima em indústrias industriais menores em países atrasados e subdesenvolvidos, para produção de vestuário e produtos doméstico (AQUINO, 2003 apud MEDINA, 1959).

O uso de fibras vegetais trará um ganho social e econômico para as regiões produtoras melhorando a qualidade de renda e vida destes locais.

O uso de fibras de origem vegetal tem como forte apelo à possibilidade de produção ambientalmente sustentável já que é de fácil incorporação pela natureza e é uma fonte renovável de matéria prima. Fato que torna seu uso interessante.

A demanda destas fibras decorrentes do desenvolvimento de novos materiais compósitos reduziria o êxodo rural e impulsionariam o setor agrícola do país (AQUINO 2003).

O desenvolvimento humano tem acenado com um quadro de crise em função da oferta de matéria prima devido ao esgotamento dos recursos naturais (AQUINO 2003).

1.2 PESQUISAS DESENVOLVIDAS NO BANCO DE DISSERTAÇÕES DA UFF EM COMPÓSITOS COM USO DE FIBRAS VEGETAIS E OU RESÍDUOS.

A biblioteca da Universidade Federal Fluminense possui banco de dissertações direcionada a uma linha de pesquisa sobre o uso de resíduos e materiais compósitos, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

AKIL apresentou em 1992 a Universidade Federal Fluminense dissertação com o título: “POTENCIALIDADE DOS COMPÓSITOS DE CIMENTO PORTLAND COM FIBRAS VEGETAIS”. Fez um estudo de caso em tijolos maciços crus reforçados com fibra de bucha.

MARINHO, em 1995 apresentou dissertação a Universidade Federal Fluminense com o título: “OS VEGETAIS PRODUTORES DE FIBRAS E SUAS UTILIZAÇÕES NOS COMPÓSITOS DE CIMENTO – O SISAL COMO ELEMENTO DE REFORÇO”. Estudou o desempenho de telhas produzidas em compósito cimentício, reforçado com fibras de sisal, comparando-as com telhas sem reforço.

BIGNO em 2002 apresentou dissertação com o título “APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE CORTE DE ROCHAS ORNAMENTAIS COMO FILER MINERAL EM COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA E CIMENTÍCIA”. Estudou o uso de compósito de matriz polimérica com adição de rejeito de corte de rocha em placas e compósito cimentício com adição de rejeito de corte de rocha como filer em molduras.

Atualmente na UFF vêm sendo desenvolvidos estudos sobre os seguintes temas:

- Emprego de resíduos de plástico como agregado em tijolos de concreto leve.
- O uso de resíduo de bagaço de cana como fibra de reforço.
- O uso de fibras de sisal em compósito de matriz polimérica como reforço estrutural.
- A aplicabilidade de rejeitos industriais em compósito de matriz polimérica em elementos de sinalização.

Este trabalho segue esta linha de pesquisa desenvolvida na Universidade Federal Fluminense.

1.3 RELEVÂNCIA

A contribuição deste trabalho para a Engenharia Civil está compreensão dos processos e métodos de produção de compósitos e na aplicação deste material em elementos de sinalização.

Procurando adequar os materiais envolvidos na pesquisa ao método produtivo mais adequado.

Alem de estudar as características mecânicas dos produtos obtidos verificando a sua viabilidade de uso no produto.

1.4 ESCOPO DO TRABALHO

Através de revisão bibliográfica serão estudados os compósitos, das definições aos processos produtivos. Com base nos dados obtidos serão desenvolvidas placas de sinalização com formulações distintas, para o estudo de sua aplicabilidade em placas de sinalização.

O trabalho será organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução. Aborda-se aqui a relevância e justificativa do tema, bem como a metodologia adotada e os meios para consecução do trabalho;
- Capítulo 2: Caracterização dos compósitos, com ênfase em compósitos de matriz polimérica;
- Capítulo 3: Matrizes poliméricas, função, características físicas e processo de produção;
- Capítulo 4: Fibras de reforço; tipos, função em compósito, processo de produção, caracterização física e configurações;
- Capítulo 5: Enchimentos, função, tipos e aplicações em compósitos;
- Capítulo 6: Cargas e aditivos, função, tipos e aplicações;
- Capítulo 7: Processos de moldagem, características, aplicabilidade e materiais utilizados;
- Capítulo 8: Processo de montagem, a necessidade de sua aplicação e formas mais adequadas;
- Capítulo 9: Ensaio em produtos poliméricos, tipos de ensaios aplicáveis normas específica para placas de sinalização;
- Capítulo 10: programa experimental, detalhes do programa experimental, materiais equipamentos, ensaios aplicados e tratamento dos resultados;

- Capítulo 11: Considerações finais sobre o uso do reforço com fibras vegetais, com adição de cargas nos compósitos de matriz polimérica.

2 COMPÓSITOS

Algumas propriedades requeridas pelos novos desafios tecnológicos não são atendidas com o uso dos materiais utilizados classicamente como materiais de construção.

Os materiais que apresentam propriedades mecânicas elevadas, em contrapartida possuem alta densidade, não sendo adequado para usos nos quais a baixa densidade é fator preponderante.

O aumento da resistência e da rigidez implica geralmente em redução da resistência ao impacto, segundo Callister, (2000).

Os materiais metálicos geralmente são mais resistentes, porém apresentam maior densidade. Os cerâmicos apesar da rigidez são frágeis. Os poliméricos possuem boa elasticidade, porém não apresentam elevada resistência mecânica.

Com o intuito de conseguir materiais mais resistentes, que apresentem baixa densidade e resistência ao impacto, foram desenvolvidos materiais resultantes da combinação dois ou mais materiais distintos. Esta nova categoria de material foi denominada de material compósito.

A combinação de materiais vem ampliando as propriedades com o desenvolvimento dos compósitos.

Apesar de se considerar como compósito os materiais industrializados, alguns materiais naturais apresentam características que os enquadram nesta categoria de material. Segundo Callister (2000), a madeira com suas fibras de celulose unidas por lignina, o osso constituído de colágeno e apatita constituem categoria de compósitos naturais.

O compósito segundo Callister (2000) é um material artificial que apresenta mais de uma fase quimicamente diferentes separadas por interfaces distintas.

Os materiais são combinados e como resultado são conseguidos materiais com características específicas adequadas a ambientes agressivos e altas temperaturas. Estes materiais apresentam maior rigidez, tenacidade e resistência mecânica, (CALLISTER, 2000).

Os compósitos que possuem duas fases, a uma das fases denomina-se matriz e a outra é denominada de fase dispersa. As propriedades do compósito estão associadas às características das fases, proporções, dimensões, forma e orientação da fase dispersa.

Pode-se classificar o compósito de acordo com a dimensão da fase dispersa em reforçado com partícula, fibras e compósito estrutural, (CALLISTER, 2000).

O compósito reforçado com partícula apresenta a dimensão das partículas semelhantes em todas as direções. Os reforçados com fibras apresentam um comprimento maior que o diâmetro. Os estruturais combinam materiais compósitos com materiais homogêneos.

Os compósitos reforçados com partículas apresentam duas subdivisões. Os reforçados com partículas grandes, tendo como exemplo o concreto. Os compósitos reforçados por dispersão, como exemplo tem-se os cerments (composto de metal com material cerâmico). Um exemplo de compósito reforçado por dispersão é o níquel TD (níquel com óxido de tório disperso), que apresenta melhor resistência a altas temperaturas que o níquel. Esta resistência é conseguida, com a adição de 3% de óxido de tório disperso (CALLISTER, 2000).

Nos compósitos reforçados com partículas as interações ocorrem a nível molecular ou atômico. As dimensões das partículas estão entre 0,01 e 0,1mm. Neste compósito a matriz suporta as cargas aplicadas e as partículas dispersas, dificultam ou evitam o movimento de discordância. Havendo restrição na deformação plástica e conseqüente aumento na dureza, resistência à tração e limite de escoamento. Já a fase dispersa pode ser metálica ou não metálica. Devido a não reatividade entre a matriz e o reforço suas características são mantidas a altas temperaturas, sendo o seu uso adequado em ferramentas de usinagem sujeitas a temperaturas elevadas, (VAN VLACK, 1983).

Os compósitos reforçados com partículas grandes apresentam maior dureza e rigidez das partículas comparadas com a matriz. As partículas suportam fração de

carga transferida pela matriz, sendo o reforço diretamente relacionado com a aderência na interface matriz partícula.

Nos compósitos reforçados com fibras, a fase fibra encontra-se dispersa na fase matriz, segundo Callister (2000). O uso de fibras como reforço procura aliar a resistência e/ ou rigidez a baixa densidade. Os valores da resistência específica e do módulo específico expressam estas relações com a densidade relativa.

Estes compósitos podem ser classificados em compósito reforçado com fibras contínuas e fibras descontínuas, sendo os com fibras descontínuas divididos em: alinhadas e aleatórias. A Figura 2.1 apresenta esquematicamente uma classificação dos compósitos.

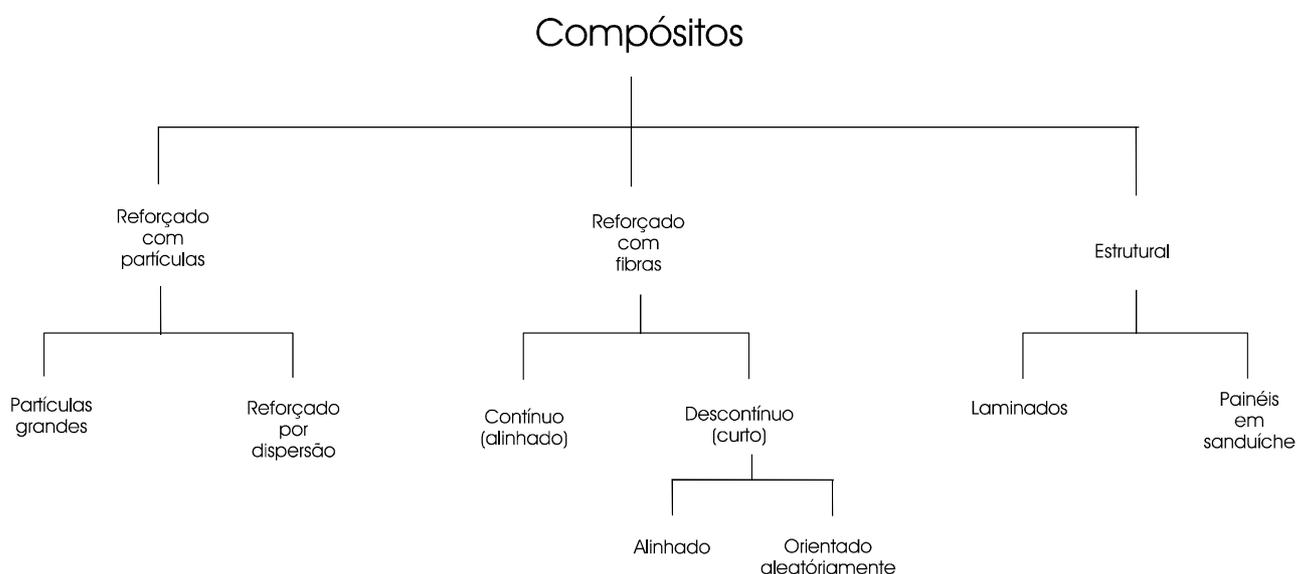


Figura 2.1 Classificação dos compósitos.

Fonte: Callister (2000)

A transmissão das cargas da matriz à fibra, influencia significativamente no comportamento de um compósito. Ao ser submetida à determinada carga, a fibra deforma a matriz devido à ligação existente na interface fibra / matriz. Esta deformação não ocorre na extremidade da fibra. A Figura 2.2 mostra esquematicamente a deformação da matriz.

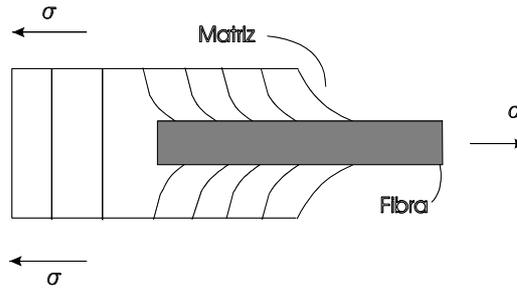


Figura 2.2 Padrão de deformação da matriz em torno das fibras

Fonte: O autor adaptado de Callister (2000)

Para que ocorra o reforço em um compósito a fibra precisa de um comprimento mínimo de aderência que está expresso pela Equação 2.1. Este comprimento é denominado de comprimento crítico (l_c). O comprimento crítico é função diretamente proporcional ao diâmetro da fibra d , ao limite de resistência à tração da fibra σ_f , e inversamente proporcional à força de ligação fibra matriz ou a tensão limite de escoamento cisalhante da matriz τ_c , no caso o que for menor.

$$l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{2\tau_c} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Segundo Callister (2000) o comprimento crítico para fibras de vidro e carbono é de 1mm, este valor varia entre 20 e 150 vezes o diâmetro da fibra.

As fibras com comprimento igual ao comprimento crítico resistem à carga máxima, quando esta é aplicada no eixo central da fibra. Quando é aumentado o comprimento da fibra, o reforço aumenta. As fibras com comprimento quinze vezes o comprimento crítico são consideradas contínuas. No caso da fibra ser mais curta que o comprimento crítico, não ocorre reforço significativo, funcionando o material como um compósito particulado, segundo Callister (2000). O uso de fibras contínuas produz acréscimo substancial de resistência no compósito quando comparadas às fibras descontínuas.

Nos compósitos reforçados com fibras, a relação fibra matriz, a orientação das fibras uma em relação às outras e sua distribuição exercem influência nas características mecânicas. É possível ocorrer quatro situações: as fibras são contínuas e paralelas ao eixo longitudinal, são descontínuas e paralelas ao eixo longitudinal, são descontínuas e orientadas aleatoriamente, e descontínuas,

parcialmente orientadas. A Figura 2.3 mostra esquematicamente a orientação das fibras.

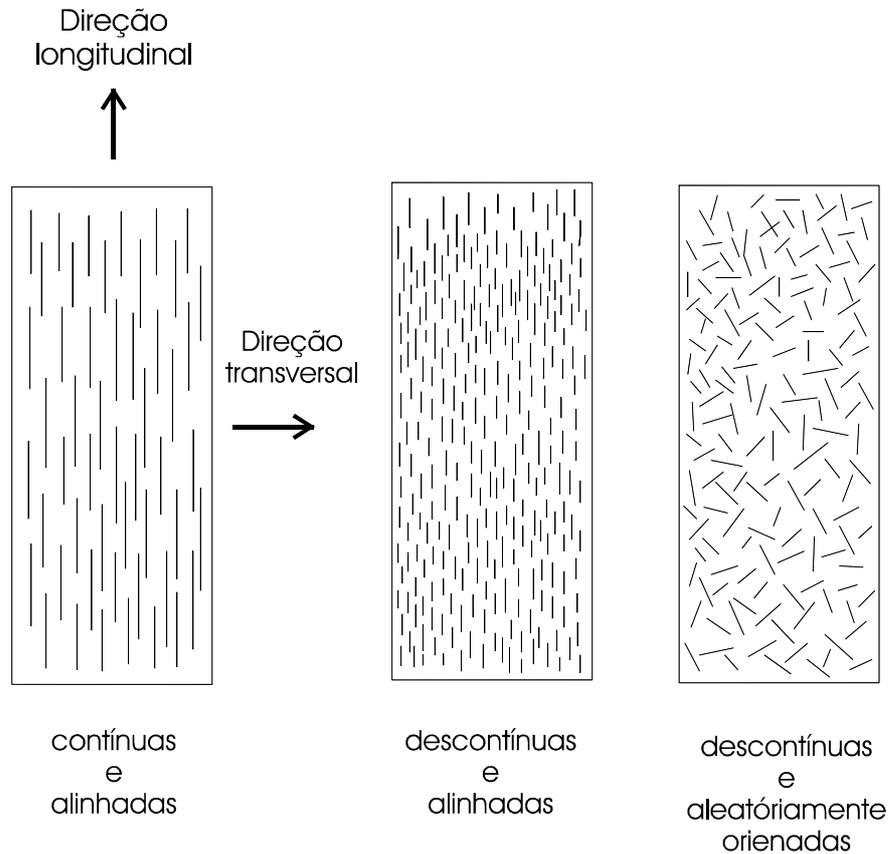


Figura 2.3 compósito reforçada com fibras

Fonte: O autor adaptado de Callister (2000)

No caso das fibras estarem orientadas na direção paralela ao eixo longitudinal, tornam os compósitos anisotrópicos, apresentando propriedades diferentes na direção paralela as fibras em relação à direção perpendicular. O comportamento deste compósito está diretamente relacionado, ao comportamento da fase fibra e fase matriz, bem como as suas frações volumétricas.

A Figura 2.4 apresenta o comportamento tensão deformação da fase fibra, fase matriz e do compósito. Como se pode notar, a fibra e matriz apresentam um comportamento elástico no início do diagrama. A matriz ao entrar em deformação plástica começa a escoar, havendo um aumento na tensão até a ruptura.

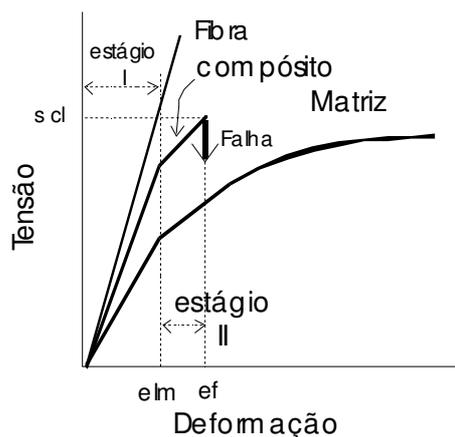


Figura 2.4 Diagrama de tensão deformação da matriz, fibra e compósito típico.

Fonte: O autor adaptado de Callister (2000)

No compósito fibra e matriz se deformam elasticamente até o momento que a matriz entra em escoamento. A partir do início do escoamento da matriz esta passa a se deformar plasticamente enquanto a fibra continua em regime elástico devido a maior resistência à tração, assumido o diagrama um comportamento próximo ao linear. A inclinação é menos acentuada, ocorrendo o aumento de carga nas fibras.

A falha do compósito ocorre a partir do momento que as fibras começam a se romper. A ruptura do compósito não é frágil devido ao fato de não ocorrer ruptura simultânea de todas as fibras e devido à variação da resistência a fratura das fibras. A matriz ainda não entrou em falência devido à sua maior deformação comparada a da fibra. As fibras rompidas com menor dimensão que estão envolvidas pela matriz, possibilitam um reforço residual reduzido e a matriz continua a se deformar plasticamente.

Considerando que há isodeformação a carga suportada pelo compósito submetido a esforço longitudinal igual é o somatório das cargas suportadas pela matriz e pelas fibras. Como na Equação 2.2.

$$F_c = F_m + F_f \quad \text{Eq. 2.2}$$

Como $F = \sigma A$, substituindo-se as cargas pelas suas equivalentes tem-se:

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \quad \text{Eq. 2.3}$$

Para obter-se o valor da σ_c , divide-se o lado direito por A_c tem-se:

$$\sigma_c = \sigma_m \frac{A_m}{A_c} + \sigma_f \frac{A_f}{A_c} \text{ Eq. 2.4}$$

As relações A_m/A_c e A_f/A_c são as frações volumétricas dos da matriz e da fibra, onde se pode expressar a Equação 2.4 como:

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \text{ Eq. 2.5}$$

Considerando-se um estado de isodeformação tem-se $\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f$, dividindo cada termo da Equação 2.5 pelas respectivas deformações tem-se:

$$\frac{\sigma}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} V_f \text{ Eq. 2.6}$$

Sendo as deformações no compósito, matriz e fibras elásticas os termos: σ_c/ϵ_c , σ_m/ϵ_m , σ_f/ϵ_f , expressam os respectivos módulos de elasticidade. Substituindo-se pelos respectivos módulos de elasticidade tem-se:

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f \text{ Eq. 2.7}$$

ou

$$E_{cl} = E_m(1 - V_f) + E_f V_f \text{ Eq. 2.8}$$

Tendo o compósito duas fases, $V_m + V_f = 1$, tem-se que o módulo de elasticidade do compósito é a média ponderada dos módulos de elasticidade da fase fibra e da fase matriz. Valendo a afirmação para a densidade considerando-se as frações volumétricas.

Segundo Callister (2000) as proporções de carga suportada pelas fibras e matriz, para um carregamento longitudinal é expressa pela Equação 2.9.

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} \text{ Eq. 2.9}$$

Segundo Callister (2000), quando o compósito é carregado transversalmente em relação à orientação das fibras, às tensões no compósito e nas fases são as mesmas, o que se denomina de isotensão. A deformação do compósito é expressa pela Equação 2.10.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f \quad \text{Eq. 2.10}$$

Como $\varepsilon = \sigma/E$ tem-se:

$$\frac{\sigma}{E_{ct}} = \frac{\sigma}{E_m} V_m + \frac{\sigma}{E_f} V_f \quad \text{Eq. 2.11}$$

Dividindo-se ambos os termos pela tensão,

$$\frac{1}{E_{ct}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \quad \text{Eq. 2.12}$$

Colocando-se em evidência o módulo de elasticidade do compósito no sentido transversal, a equação assume a seguinte forma:

$$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m} = \frac{E_m E_f}{(1 - V_f) E_f + V_f E_m} \quad \text{Eq. 2.13}$$

O limite de resistência à tração do compósito no sentido longitudinal corresponde à tensão máxima, momento no qual as fibras se rompem, que na Figura 2.4 corresponde a s_{cl} . As falhas nos compósitos dependem das propriedades das fibras e matriz, concomitantemente a ligação na interface fibra matriz.

Admitindo-se que a deformação na fibra é menor que na matriz, ao romperem-se às fibras é transferida à matriz a maior porção das cargas, se pode então adaptar a Equação 2.5, que assume a seguinte forma:

$$\sigma_{cl} = \sigma'_m (1 - V_f) + \sigma_f V_f \quad \text{Eq. 2.14}$$

Na equação σ'_m é a tensão na matriz no momento da falha da fibra e σ_f é o limite de resistência à tração da fibra.

Devido ao compósito unidirecional apresentar características anisotrópicas e a carga de projeto ser avaliada para o sentido longitudinal das fibras, podem ocorrer carregamentos transversais. Sendo o limite de resistência a cargas transversais significativamente inferiores ao limite de resistência longitudinal. Na direção transversal as características mecânicas estão associadas às propriedades das fibras, da matriz, resistência da ligação fibra / matriz e a existência de vazios. Com o objetivo de melhorar a resistência transversal têm sido adotadas melhorias nas

características da matriz. A Figura 2.5 apresenta as resistências longitudinais e transversais de diversos tipos de compósitos.

MATERIAL	LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO LONGITUDINAL (MPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO TRANSVERSAL (MPa)
VIDRO - POLIÉSTER	700	20
CARBONO (ALTO MÓDULO)- EPÓXI	1000	35
KEVLAR-EPÓXI	1200	20

Figura 2.5 Limites de resistência longitudinal e transversal para compósitos com 50% de teor de fibras e três tipos de fibras, reforçados unidirecionalmente.

Fonte: Callister (2000)

Os compósitos com fibras descontínuas alinhadas apresentam módulo de elasticidade e resistência à tração inferior aos com fibras contínuas. Há casos de se conseguir de 90% a 50% do valor, quando comparados aos equivalentes com fibras contínuas. O uso deste tipo de reforço tem se tornado comum, podendo se utilizar fibras de vidro, carbono ou aramida (CALLISTER, 2000).

Considerando o comprimento das fibras maior que o comprimento crítico e as fibras estando alinhadas e uniformemente distribuídas a resistência longitudinal é dada pela seguinte equação:

$$\sigma_{cd} = \sigma_f V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + \sigma'_m (1 - V_f) \text{ Eq. 2.15}$$

Nesta equação σ_f é a resistência da fração da fibra e σ'_m a tensão na matriz quando ocorre à falha da fibra.

No caso do comprimento da fibra ser inferior ao comprimento crítico a resistência longitudinal é expressa σ_{cd}' na Equação 2.16.

$$\sigma_{cd}' = \frac{l \tau_c}{d} V_f + \sigma'_m (1 - V_f) \text{ Eq. 2.16}$$

Sendo d diâmetro da fibra e τ_c o menor valor entre a resistência da ligação fibra / matriz e o limite de escoamento cisalhante da matriz.

Os compósitos reforçados com fibras descontínuas, e aleatoriamente orientadas usam geralmente fibras curtas como reforço. Para o cálculo do módulo de elasticidade é possível usar a equação de regra de mistura a seguir:

$$E_{cd} = KE_fV_f + E_mV_m \text{ Eq. 2.17}$$

Sendo K parâmetro de eficiência do reforço da fibra, que depende de V_f e da relação E_f / E_m , sendo o valor de K entre 0,1 e 0,6. O módulo é diretamente proporcional ao aumento da fração volumétrica da fibra. A eficiência de um reforço com fibras orientadas aleatoriamente é a quinta parte de um compósito alinhado na direção longitudinal, apesar de sua anisotropia.

A opção da orientação do reforço está ligada a fatores construtivos e econômicos. O tempo de produção de peças com fibras curtas aleatórias, ou alinhadas é menor e possibilitam a construção de formas complexas. Apresentam também custo de produção menor, quando comparados as com fibras contínuas.

Na Tabela 2.1 são apresentadas as propriedades do policarbonato não reforçado e o mesmo com diferentes frações de reforço orientado aleatoriamente.

Tabela 2.1 Propriedades do policarbonato não reforçado e com três diferentes porcentagens de reforço orientado aleatoriamente.

Propriedades	Reforço com fibra (% volume)			
	Não reforçadas	20	30	40
Densidade relativa	1,19-1,22	1,35	1,43	1,52
Limite de resistência à tração (MPa)	59-62	110	131	159
Módulo de elasticidade GPa	2,24-2,345	5,93	8,62	11,6
Alongamento (%)	90-115	4-6	3-5	3-5
Resistência ao impacto com entalhe Izod $lb_f / pol.$	12-16	2,0	2,0	2,5

Fonte: Callister (2000)

A opção da orientação do reforço está ligada a fatores construtivos e econômicos. O tempo de produção de peças com fibras curtas aleatórias, ou alinhadas é menor e possibilitam a construção de formas complexas. Apresentam também custo de produção menor, quando comparados as com fibras contínuas.

3 MATRIZ

A matriz em um compósito tem função de ligação entre as fibras, transferindo as solicitações de uma fibra as outras. A matriz suporta porção restrita de carga. Segundo Callister (2000), a matriz deve ser dúctil e apresentar módulo de elasticidade bem inferior a da fibra de reforço.

A matriz promove a proteção das fibras, não permitindo o ataque do meio ambiente agressivo.

Outra função da matriz é não possibilitar a transmissão das trincas devido a sua plasticidade e moleza. Desta maneira as trincas frágeis das fibras não são transmitidas, evitando com isso a falência catastrófica do compósito.

Uma importante característica da matriz é o poder adesivo à fibra, o que caracterizará a sua capacidade de transmitir as tensões fibra matriz.

As matrizes em compósitos variam com os tipos de compósito, podendo ser: cimentícias, asfálticas, poliméricas e metálicas.

O objeto deste capítulo é a matriz de origem polimérica. Nele serão revistos o processo de síntese, materiais constituintes e características mecânicas.

3.1 POLÍMERO

Os polímeros são estruturas compostas de macromoléculas. Estas são constituídas pela união de moléculas menores denominadas meros, palavra grega que significa “em parte”.

Têm-se polímeros naturais e sintetizados. Os naturais são utilizados pelo homem há séculos. A madeira, a borracha, o algodão, a lã, o couro e a seda, segundo Callister (2000), são exemplos de polímeros.

Com o desenvolvimento científico, as estruturas químicas destes materiais puderam ser estudadas, o que possibilitou a síntese de diversos polímeros, utilizando moléculas orgânicas.

Estes compostos orgânicos são em geral produtos resultantes da associação do carbono e hidrogênio. São denominados hidrocarbonetos.

Os átomos de carbono devido a sua estrutura atômica apresentam quatro elétrons que podem participar de ligações covalentes. Nas estruturas moleculares orgânicas o carbono possui quatro elétrons passíveis de participar de ligação covalente simples. Quando ocorre o compartilhamento de dois ou três elétrons, estas ligações são denominadas insaturadas. As ligações insaturadas permitem a adição de um átomo ou grupo de átomos à molécula original, dando origem a uma cadeia.

Em geral nos polímeros são formadas longas cadeias de átomos que estão ligadas através de ligações interatômicas, cuja cadeia principal é constituída de átomos de carbono interligados a um ou dois átomos de carbono. A estas partes unidades que compõem o polímero é denominada de monômero.

A formação de um polímero ocorre através de dois processos; o de adição e o de condensação. No primeiro processo a reação ocorre devido à ação de um iniciador (ou catalisador), em uma unidade monomérica. Esta unidade mero ativa provoca uma reação em cadeia. A adição seqüencial das unidades monoméricas cresce de forma linear. Este processo é relativamente rápido.

No processo de condensação a reação é dividida em etapas e envolve mais de um monômero. Além do polímero, é originado um subproduto de pequeno peso molecular. Geralmente água e outras substâncias, havendo a necessidade de serem eliminadas.

Quando o polímero é constituído por uma mesma unidade mero é denominado homeopolímero. Quando o polímero possui duas ou mais unidades mero em sua cadeia, é denominado copolímero.

Os copolímeros são divididos em aleatórios, alternados, em bloco e por enxerto. Na Figura 3.1 têm-se algumas configurações. Estas configurações buscam melhorar as características dos homopolímeros, segundo Callister (2000).

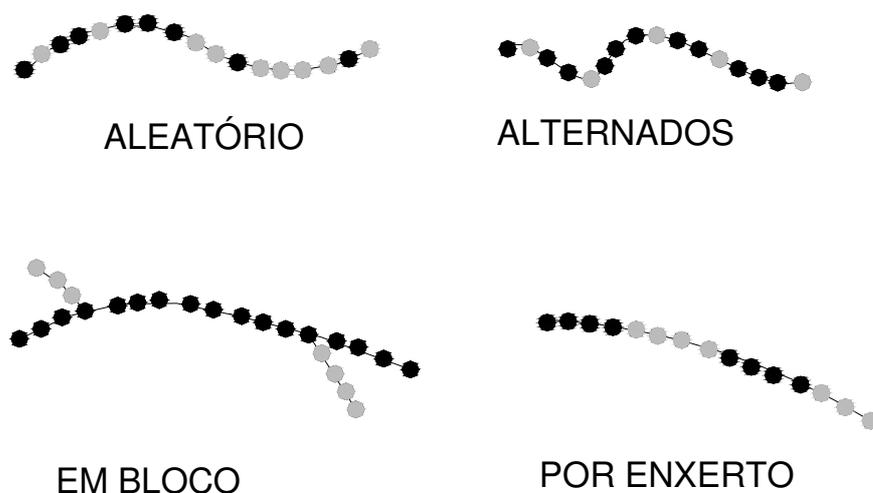


Figura 3.1 Copolímeros

Fonte: O autor adaptado de Callister, (2000).

Os polímeros podem ser encontrados nos três estados físicos em função do seu peso molecular. O peso molecular dos polímeros é função do tamanho da cadeia.

O peso molecular afeta as características do polímero. Uma das características afetadas é a temperatura de fusão. Esta é diretamente proporcional ao peso molecular. Para pesos na faixa de 100 g/mol em temperatura ambiente o polímero é líquido ou gás. Para peso na faixa de 1.000 g/mol são sólidos pastosos ou resinas moles. Acima de 10.000g/mol apresentam-se na forma de sólidos.

As moléculas de polímeros não apresentam mesma dimensão, sendo, portanto o peso molecular do polímero a média das quantidades e pesos das moléculas.

As características físicas dos polímeros são afetadas também por sua estrutura molecular. Segundo este critério os polímeros podem ser: lineares, ramificados, com ligações cruzadas, ou polímeros em rede, na Figura 3.2 tem-se as diversas configurações.

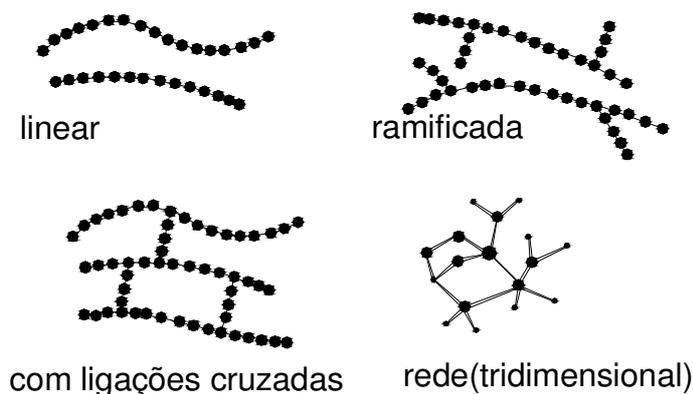


Figura 3.2 Esquema dos copolímeros.

Fonte: O autor, adaptada de Callister, (2000).

Polímeros lineares podem apresentar número elevado de ligações de van der Waals entre as cadeias. As uniões entre as unidades meras são do tipo ponta cabeça.

Os ramificados apresentam ramificações laterais ligadas a cadeia. Estas cadeias dificultam a compactação, reduzindo a densidade do polímero.

Com ligações cruzadas são aqueles nas quais as cadeias estão ligadas às cadeias adjacentes, através de ligações covalentes. Em geral estas não são reversíveis e ocorrem, a temperaturas elevadas.

Em rede são aqueles que possuem ligações trifuncionais covalentes ativas. Segundo Callister (2000) os polímeros que possuem muitas ligações cruzadas, podem ser classificados como polímero em rede.

Ainda segundo Callister (2000) os polímeros não são exclusivamente de um tipo estrutural, podendo apresentar pequenas variações.

Quanto à resposta mecânica a elevadas temperaturas, os polímeros classificam em: termoplásticos e termofixos.

Os termoplásticos são aqueles que submetidos ao aquecimento tornam-se moles e com o aumento da temperatura transformam-se em líquido. Ao serem resfriados a temperatura ambiente endurecem. Este processo possibilita a reciclagem. A temperatura de aquecimento deve ser controlada, pois a partir de determinado limite de temperatura ocorre a degradação do material, devido ao

aumento do movimento molecular. Este fato possibilita a ruptura das ligações das cadeias principais.

Segundo Callister (2000), a grande maioria dos polímeros lineares e os ramificados de cadeias flexíveis são termoplásticos. Estes materiais são mais moles e dúcteis.

Os termofixos são aqueles que após o processamento, quando são submetidos ao calor não amolecem.

As ligações cruzadas fixam as cadeias entre si, o que impede os movimentos vibratórios e rotacionais da cadeia, em altas temperaturas. A elevação da temperatura a pontos extremos produz a degradação do material devido à ruptura das ligações cruzadas. Estes em geral são mais duros, fortes e frágeis que os termoplásticos.

3.2 MATRIZES DE BASE POLIMÉRICA.

As resinas são usadas pelo homem há anos, sendo que as primeiras resinas tinham origem vegetal, sua estrutura química, até o início do século XX não era muito bem conhecida.

As resinas que possuem peso molecular médio a alto, à temperatura ambiente, segundo Callister (2000), apresentam-se como sólido ou como líquido viscoso. São solúveis e fusíveis com o aquecimento gradual. Os polímeros sintéticos que possuem estas características são denominados de resina.

No início do século XX as grandes indústrias voltaram-se para um tipo de produto que possibilitava inúmeras aplicações, conhecidos como plásticos. Dentre estes produtos encontravam-se algumas resinas, sintetizadas a partir de resinas naturais.

O processo de endurecimento destas resinas ocorre através do calor, radiação eletromagnética com determinado comprimento de onda ou a temperatura ambiente pela ação de iniciadores (ou catalisadores) e aceleradores.

Em compósitos, geralmente são utilizadas resinas termorrígidas. As mais correntemente usadas são as resinas de: poliéster, epóxi, éster-vinílicas e fenólicas.

3.2.1 Resinas de poliéster insaturado

As resinas de poliéster insaturado são obtidas através de reação de condensação de ácidos dicarboxílicos com glicóis. A reação dos ácidos com os álcoois produzem éster e água. Quando a reação é processada entre um bi-ácido e um bi-álcool, o resultado são vários grupos éster com eliminação de água.

As resinas sintetizadas com ácidos insaturados apresentam se quebradiças, pelo fato de haver pequeno espaçamento entre as duplas ligações e durante sua cura liberam muito calor. Utilizam-se os bi-ácidos, saturados, não polimerizáveis na sua condensação, para melhorar estas características. Este procedimento acarreta a redução do espaçamento da cadeia, maior flexibilidade, menor exotermia e menor reatividade da resina. A Figura 3.3 apresenta um esquema da molécula de poliéster.

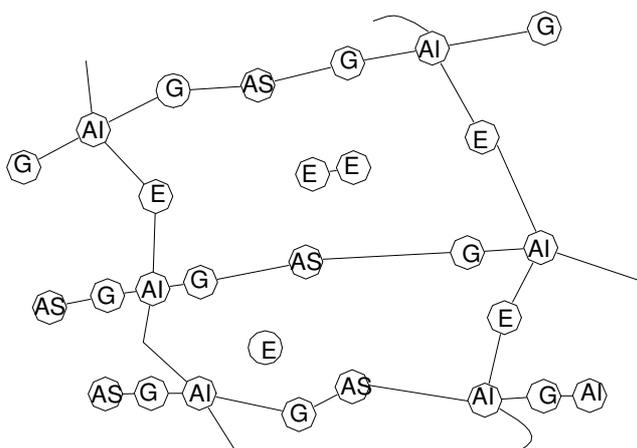


Figura 3.3 Esquema do poliéster curado.

Fonte: O autor adaptado de Carvalho (1992).

O processamento dos poliésteres insaturados é feito no estado líquido e diluído em monômero de estireno. O monômero serve de ponte entre as insaturações do poliéster.

A reação de polimerização num primeiro estágio, devido à ação de aceleradores sobre os catalisadores dá origem a radicais livres. Estes radicais abrem as insaturações do monômero e do poliéster, provocando uma reação em cadeia.

As terminações dos poliésteres são em grupo ácido ou álcool, em função da quantidade, de terminais ácidos, o poliéster deve ser neutralizado com o uso de

KOH. A quantidade em gramas de KOH para neutralizar um grama de resina, expressa o índice de acidez de determinada resina.

Durante o processo de polimerização, algumas insaturações não reagem, o que acarreta perda de propriedades mecânicas e resistência aos solventes. Uma adequada dosagem de monômero, catalisador e acelerador minimizam a ocorrência destas insaturações não reagidas.

3.2.1.1 Glicóis

Os glicóis são importantes na síntese do poliéster, por determinarem características importantes da resina. A flexibilidade, cristalinidade, sensibilidade à água e ao calor e a inércia química. Os mais usados na síntese dos poliésteres são: o etileno glicol, o propileno glicol, o neopentil glicol e o bisfenol A.

O etileno glicol não é muito usado, devido tendência da resina de cristalizar. Este glicol apresenta molécula simétrica.

Devido ao seu custo e desempenho, o propileno glicol, é o glicol mais utilizado na síntese de poliéster. Sua molécula é assimétrica e ramificada. Os glicóis ramificados, geralmente originam resinas resistentes ao impacto, e a altas temperaturas. As resinas sintetizadas a partir do propileno glicol são protegidas do ataque da água, devido à presença do grupo metila.

O neopentil glicol possui dois grupos metila próximos aos grupos hidroxilas. Quando este glicol é usado na síntese do poliéster, estes grupos protegem as ligações éster. Em consequência estas resinas absorvem pouca água e resistem às intempéries. O uso deste glicol é comum devido às boas características transmitidas às resinas, ortoftálicas e isoftálicas. A Figura 3.4 apresenta a fórmula química dos glicóis mais usados.

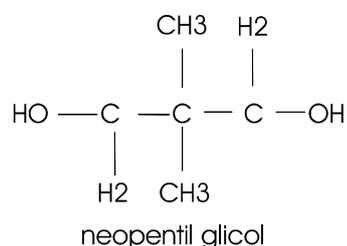
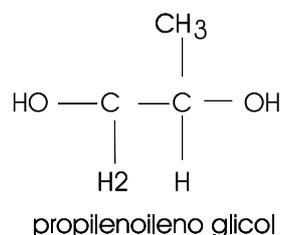
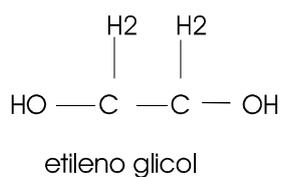


Figura 3.4 Glicóis mais usados na síntese da resina de poliéster.

Fonte: O autor adaptado de Carvalho (1992).

O bisfenol A é outro glicol que é usado na síntese do poliéster. A resina dele originada é denominada de bisfenólica. Esta resina é a mais resistente quimicamente entre os poliésteres. Este glicol é modificado com óxido de propileno, originando um diol diéter, para então ser colocado no reator com o ácido insaturado.

3.2.1.2 ÁCIDOS INSATURADOS

As insaturações do poliéster são derivadas dos ácidos maleico e seu isômero ácido fumárico. O ácido maleico na forma anidra libera menos água e apresenta ponto de fusão mais baixo.

O processo de esterificação com o uso do propileno glicol acarreta a transformação de grande parte do anidro maleico em fumárico. Esta transformação é mais recorrente com o uso do propileno glicol. O uso do ácido fumárico transmite melhores propriedades à resina. Esta melhora é mais evidente nas resinas bisfenólicas. Esta característica deve-se ao fato da não isomerização do ácido maleico em fumárico pelo bisfenol A.

A Figura 3.5 apresenta a fórmula dos dois ácidos.

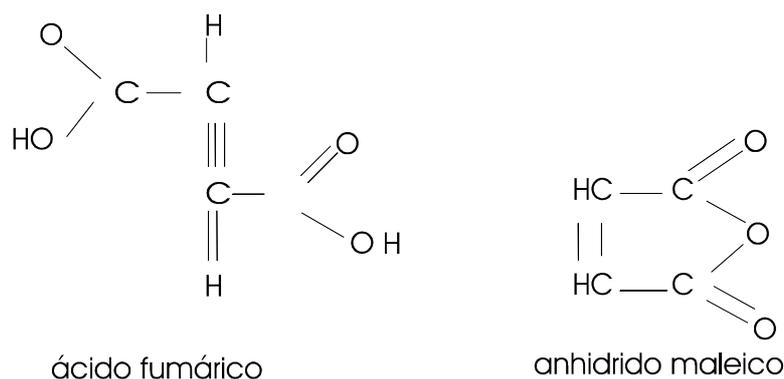


Figura 3.5 Fórmula dos ácidos insaturados usados na síntese de resina de poliéster
 Fonte: O autor adaptado de Carvalho (1992).

3.2.1.3 ÁCIDOS SATURADOS

Os ácidos saturados de uso mais comum são o ortoftálico (anidrido) e o isoftálico, que é isômero do anterior. A Figura 3.6 apresenta a fórmula química destes ácidos.

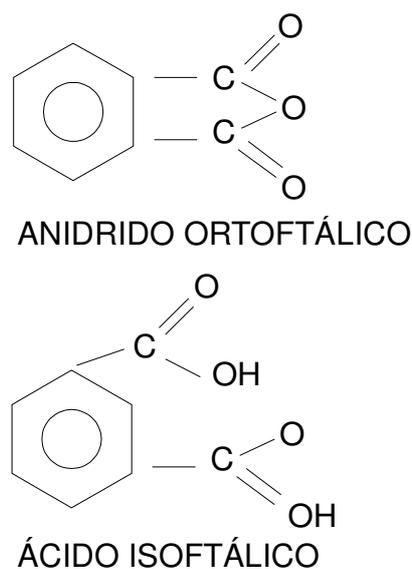


Figura 3.6 Ácidos saturados mais usados na síntese de resinas poliéster.
 Fonte: O autor adaptado de Carvalho (1992).

O uso do ácido ortoftálico foi consequência da busca de uma solução para cristalização, fato que não permitia transparência da resina. O uso deste ácido tornou a resina menos quebradiça e mais compatível com o monômero de estireno. Porém devido à posição orto, dos radicais ácidos ocorre a dificuldade da reação de esterificação. Para facilitar a síntese das resinas ortoftálicas, o processo é executado com excesso molar de glicol. Esta medida torna a resina menos resistente a água.

Devido à posição meta dos radicais carboxilas no ácido isoftálico, não ocorre dificuldade de polimerização. Não havendo a necessidade do excesso molar de glicol, para síntese do poliéster.

Em função desta peculiaridade fazendo-se uma comparação entre as resinas isoftálicas e ortoftálicas pode se dizer que as resinas ortoftálicas:

- São mais rígidas que as isoftálicas devido a proximidade dos grupos éster e das insaturações.
- Apresentam maior tempo de gel devido ao glicol em excesso.
- São menos resistentes a solventes devido aos radicais hidroxilas.
- São mais sujeitas ao empolamento devido ao excesso de glicol solúvel em água.
- São menos resistentes ao impacto, devido a menor cadeia e espaçamento entre insaturações.
- Menor retenção de propriedades mecânicas em altas temperaturas (devido ao menor comprimento de cadeia).
- São menos viscosas devido ao peso moleculares menores.

3.2.1.4 MONÔMERO DE ESTIRENO

Os monômeros funcionam como solvente da resina de poliéster, possibilitando a sua forma líquida. Na polimerização o monômero interliga as insaturações das moléculas de poliéster, transformando o poliéster em sólido por copolimerização.

O monômero mais utilizado é o monômero de estireno, Figura 3.7.

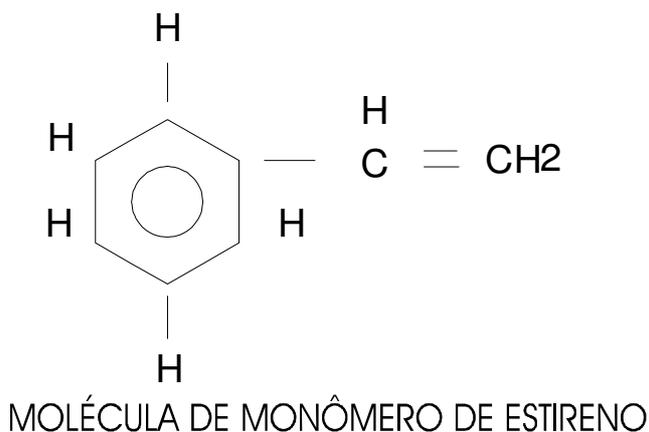


Figura 3.7 Fórmula química da molécula de estireno

Fonte: O autor adaptado de Carvalho (1992).

A ponte é feita através das insaturações do carbono. Outra característica, a presença do anel aromático, compatibiliza-o com as resinas ortoftálicas, isoftálicas e bisfenólicas.

As resinas são formuladas com um excesso molar de monômero com o objetivo de possibilitar a polimerização de todas as insaturações. Os teores de estireno devem ficar em faixas controladas. Sendo as resinas flexíveis as que demandam maior relação molar. As resinas éster-vinílicas curam até sem a presença do monômero.

O excesso de monômero acarreta maior sensibilidade ao calor, fragilidade, fissuração superficial quando exposto ao sol e baixa resistência às intempéries.

3.2.1.5 SÍNTESE DAS RESINAS DE POLIÉSTER

A síntese do poliéster ocorre em reatores aquecidos 170°C a 190°C, a esta temperatura ocorre à reação de esterificação. A atmosfera deve ser neutra para não haver contaminação por oxigênio ou ferro, que prejudicam a coloração da resina, como mostra a Figura 3.8.

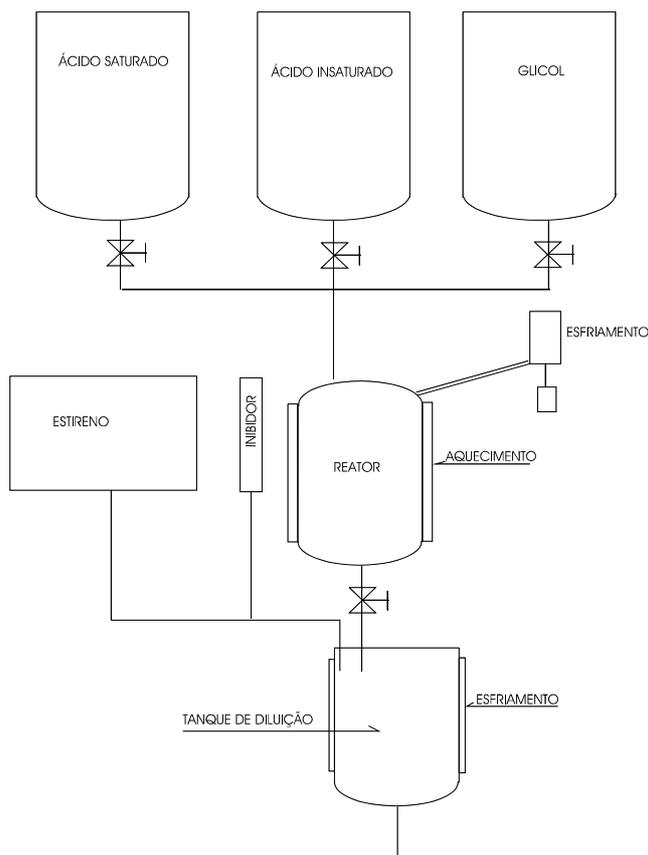


Figura 3.8 Desenho esquemático do reator.

Fonte O autor adaptado de Nasseh (2000).

Para resinas ortoftálicas os reatores são alimentados com propileno glicol, anidro maleico e ácido ortoftálico, simultaneamente.

Já para as resinas isoftálicas segundo Carvalho 1992, o processo, está dividido em dois estágios. Em um primeiro são colocados o ácido isoftálico e o glicol no reator. Este é aquecido desencadeando a reação de esterificação. É eliminada então a água resultante, com o uso de 15% de xilol ou toluol. Com o desenvolvimento da reação a resina torna-se viscosa e é reduzido o número ácido. Num segundo estágio adiciona-se o ácido insaturado, completando assim a esterificação. A razão do fracionamento do processo é que; com a menor permanência dos ácidos insaturados (reativos) no reator, ocorre menos reações laterais, além das insaturações ficarem nas extremidades, tornando o polímero mais flexível. Ao atingir o número ácido desejado o aquecimento do reator é desligado e adiciona-se a hidroquinona. Quando é atingida a temperatura de 90°C, adiciona-se então o monômero de estireno.

A função da hidroquinona é impedir a gelificação da massa no momento da adição do monômero.

3.2.1.6 CURA DAS RESINAS POLIÉSTER

A cura da resina de poliéster ocorre através de interligações de monômero com poliéster. A cura se processa com o surgimento dos radicais livres, que são átomos ou grupos de átomos, com elétron desemparelhado, estes radicais são muito reativos.

A geração de radicais livres pode ocorrer através de: aquecimento, radiação eletromagnética ou por decomposição de catalisadores. O uso de catalisadores a temperatura ambiente é o processo mais comum de cura da resina de poliéster.

Para a cura das resinas de poliéster os catalisadores mais usados são: peróxido metil etil cetona (MEKP) e o peróxido de benzoila (BPO).

No processo de cura os peróxidos são decompostos, gerando radicais livres, estes radicais interligam-se as insaturações do poliéster ou do monômero de estireno, que por sua vez geram outros radicais reativos. Esta reação se processa em cadeia. O processo é parado quando radicais livres se encontram.

Para ocorrer a decomposição dos peróxidos a temperatura ambiente, é necessária a ação de aceleradores. Os aceleradores mais usados são as aminas terciárias e os sais de cobalto. As aminas terciárias (dimetil anilina, DMA, dietil anilina, DEA) atuam como aceleradores de peróxido. Para os hidroperóxidos, são usados os sais de cobalto (naftenato de cobalto e ocotoato de cobalto).

É interessante esclarecer que o termo catalisador não é o correto, devido ao fato destes produtos serem consumidos na reação química, sendo o termo adequado iniciador. No caso dos aceleradores o termo correto é promotor. O termo catalisador e acelerador apesar de incorretos são de uso comum na indústria de compósitos.

O iniciador mais utilizado é o MEKP associado ao promotor cobalto, conhecido como MEKP-cobalto. Outro sistema de cura comum é o iniciador de peróxido de benzoila associado ao promotor dimetil anilina, conhecido como sistema BPO-DMA.

A escolha do sistema de cura está relacionada ao melhor desempenho para a aplicação a que se destina.

A ação do sistema de cura, em um primeiro momento é anulada, com o consumo de seus radicais livres, pelo inibidor adicionado à resina. Este tempo necessário ao consumo do inibidor possibilita o uso da resina para impregnação no estado líquido. Este tempo é função da quantidade de inibidor contido na resina, dos teores de iniciadores / promotores e da temperatura ambiente.

Durante a reação do iniciador com o inibidor a temperatura se mantém constante, por um período de 10 a 15 minutos podendo ser estendida com o controle do teor iniciador/ promotor.

Como o inibidor é aplicado pelo fabricante da resina, o aplicador pode controlar os teores de iniciador / promotor e a temperatura ambiente.

Quando o inibidor é consumido começa a interligação molecular, início da cura. Com o início da cura a resina começa a aquecer provocando a gelatinização. O tempo decorrido para transformação de líquido em gel é denominado tempo de gel. O tempo de gel é um dado importante usado pelo transformador, pois é função deste tempo a facilidade de trabalhar a resina (CARVALHO, 1992).

Na Figura 3.9 tem-se a condição física da resina relacionada com o tempo.

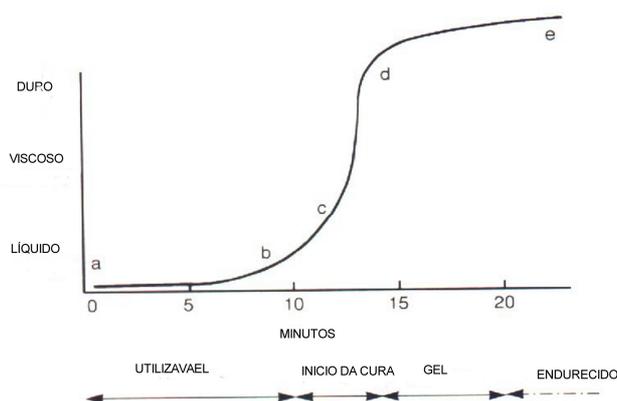


Figura 3.9 Tempos de cura das resinas de poliéster.

Fonte: Du plessis (1996), tradução do autor.

Segundo Carvalho (1992), três critérios não de ser satisfeitos para o tempo de gel: teores de iniciadores e promotores nas faixas recomendadas, permanência da resina no estado líquido para total impregnação e assentamento das fibras e acerto

do tempo de gel em função do tempo de uso da resina nos processos manuais e mecanizados, para não permitir a gelificação nos impregnadores ou vasilhames.

Os dois sistemas mais usuais apresentam características de cura diferenciadas. Comparando os dois sistemas para um mesmo tempo de gel, verifica-se que o sistema BPO-DMA é mais acelerado e apresenta maior pico exotérmico na Figura 3.10 pode-se observar estas características.

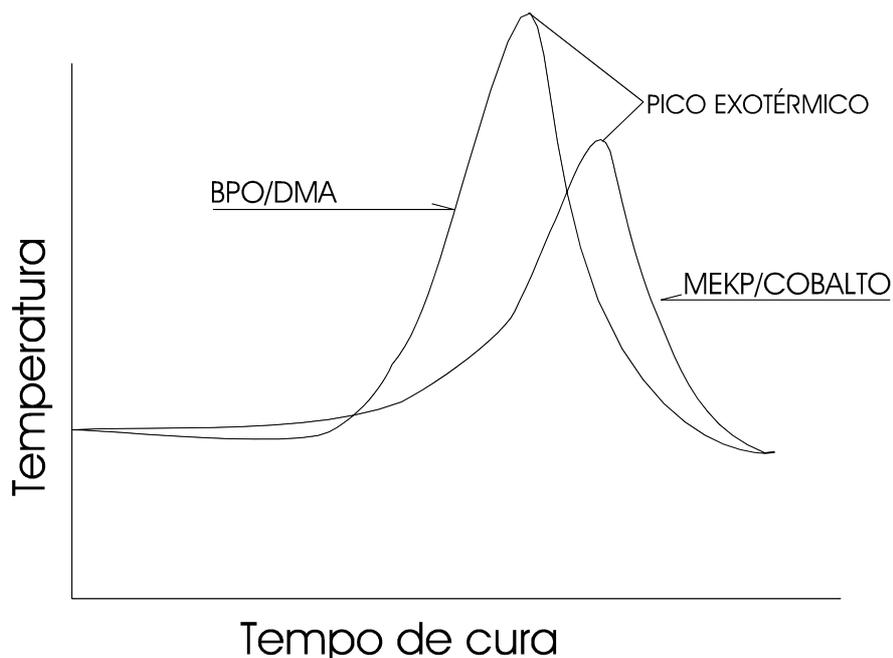


Figura 3.10: Diagrama de dos sistemas mais usados em resinas de poliéster.

Fonte O autor adaptado de Carvalho (1992).

O grau de cura da resina de poliéster e éster-vinílicas é a relação entre o total de insaturações do carbono reagidas dividido pelo número total de insaturações. O grau de cura não estabelece o tipo de conversão, não importando se a conversão foi por interligação com estireno ou radicais livres oriundos de catalisador. As interligações via estireno produzem laminados com maior resistência a solventes e temperaturas elevadas. No caso da ausência de interligação a resina se comporta como termoplástico, com baixa resistência aos solventes e baixas propriedades mecânicas.

A ação dos radicais livre, resultante da decomposição dos peróxidos e hidroperóxidos rompem as insaturações do estireno e une-se a ele formando um radical de maior dimensão. Este radical resultante pode se ligar a uma insaturação de poliéster ou a outro radical livre. No primeiro caso há a propagação da interligação, porém no segundo a reação cessa. Neste caso a polimerização é

incompleta. O controle do grau de polimerização via estireno é feita através do controle dos teores de catalisador e acelerador que devem ser ajustados para propiciar a cura por interligação de estireno maximizada (CARVALHO, 1992). O Quadro 3.1 apresenta alguns sistemas de cura, suas características e aplicações.

Principais sistemas de polimerização utilizados com resina poliéster					
Iniciadores de reação	Acelerador	Vida útil da resina polimerizada	Gel time	Tempo de endurecimento	Campos de aplicação
Peróxido de metil-etil-cetona	Naftenato de cobalto/ octoato de cobalto	Curto	Médio	Lento	Gelcoats/laminação manual/ projeção/injeção/filament winding
Peróxido de acetil-ecetona	Octoato de cobalto + dimetil anilina	Médio	Médio	Rápido	Moldagem por contato/projeção/ injeção (RTM)/prensagem a frio
Peróxido de ciclohexanona	Ocotoato de cobalto dimetil-anilina	Médio	Médio	Progressivo	Vernizes(liner)/placasonduladas
Peróxido de benzoila	Dimetil-anilina	Longo	Médio	Médio a rápido	Moldagem por contato/injeção
Peróxido de benzoila	Dimetil-anilina	Longo	Longo	Lento	Prensagem a frio moldagem por contato/injeção
Peróxido de benzoila	Dimetil-paratoluidina	Longo	Curto	Muito lento	Prensagem a frio moldagem por contato / injeção.

Quadro 3.1 Sistemas de cura

Fonte: Revista do plástico reforçado - Materiais compostos (mar / abr 1999), apud apostila do curso técnico sobre plástico reforçado da "Asplar".

O excesso de catalisador provoca interligações de radicais livres, não havendo propagação da polimerização. Pode-se observar que as resinas catalisadas em excesso apresentam; exotermia normal, baixos teores de estireno residual, baixa exotermia residual e cura rápida. Já a escassez provoca a baixa cura da resina.

O grau de interligações é a relação entre o número de insaturações interligadas via estireno, dividida pelo número de insaturações por unidade de massa da resina.

O grau de cura pode ser medido pelo teor de estireno residual, pela exotermia residual e pela dureza Barcol. A dureza Barcol mede a resistência à penetração de uma agulha padronizada. A medida baseia-se no fato de a resina curada inadequadamente possui estireno livre, o que se denomina estireno residual. O estireno residual provoca a plastificação da resina, o que facilita a penetração da agulha. Esta medição é feita com o durômetro Barcol. O procedimento não é muito preciso devido à necessidade de o laminado não apresentar contaminações e fibras na superfície (CARVALHO, 1992).

A exotermia é devida à conversão das insaturações do estireno e do poliéster, que libera calor, este calor é proporcional à quantidade molar das insaturações convertidas. Sendo assim o calor necessário à complementação da cura, quando comparado ao calor necessário à cura completa do mesmo elemento denomina-se calor residual. A medição do calor residual é realizada através do ensaio de calorimetria diferencial (DSC). Este ensaio mede o calor que flui do elemento a ser avaliado com o de uma mesma quantidade de resina completamente curada. Sendo o calor liberado diretamente proporcional ao número de insaturações reagidas. Podem-se relacionar os dois valores. Na prática segundo Carvalho (1992), passa-se uma amostra de resina com 10 a 15 miligramas de resina no analisador DSC, anota-se o calor liberado em cal/g, para completa cura. Analisa-se o laminado (10 a 15 miligramas) desconsiderando-se as cargas e as fibras, anotando-se a energia liberada. O grau de cura é fornecido pela relação abaixo.

$$Gc = \frac{Cr}{Ct} \cdot 100$$

sendo:

- Gc - grau de cura.
- Cr – número de insaturações reagidas
- Ct – número total de insaturações

O grau de interligação tem influência em características importantes do laminado. Com o aumento do grau de interligação há um aumento da resistência aos solventes e manutenção de propriedades mecânicas a altas temperaturas.

O grau de interligação pode ser avaliado de forma indireta por dois processos. O primeiro é a sensibilidade à acetona, esfregando-se um pedaço de algodão embebido em acetona, se houver baixo grau de interligação a acetona ataca a resina amolecendo e ficando pegajosa. Um motivo para ocorrência do fato é a ação do oxigênio presente no ar ambiente bloqueia a propagação dos radicais livres e evaporação do estireno superficial. O uso de filme de celofane aplicado à superfície do laminado (quando possível) ou o uso de resina parafinada na última camada de laminação evita a ocorrência da inibição de cura (CARVALHO, 1992).

Com o início da cura da resina de poliéster em baixas temperaturas forma-se uma estrutura vítrea não cristalizada que impede a mobilidade das moléculas. Aumentando-se a temperatura da resina esta estrutura é rompida possibilitando a mobilidade das moléculas e retomada das interligações. Esta temperatura é denominada de transição vítrea. No momento da transição vítrea o módulo de elasticidade abaixa acentuadamente. A partir da transição vítrea ocorre a retomada do processo de interligações das moléculas, até alcançar novo estado de vitrificação. Este processo é repetido várias vezes até a completa interligação. Neste ponto a resina alcançou a máxima temperatura de transição vítrea (TG max). Quando o pico exotérmico é mantido a temperatura superior ao Tg máximo, é alcançado o máximo grau de interligação. As peças curadas a temperatura ambiente possuem diferentes temperaturas de transição vítrea. As peças usadas em aplicações que necessitem completa interligação das moléculas devem ser pós-curadas a temperatura ligeiramente superior à temperatura de transição vítrea.

Devido à dificuldade de se determinar a temperatura de transição vítrea, é fornecido pelos fabricantes de resina o ponto de termodistorção. O ponto de termodistorção é determinado aplicando-se uma carga no centro de um corpo de prova bi-apoiado de maneira que a tensão na flexão seja de $18,2 \text{ kg/cm}^2$. Anota-se a flecha, aumenta-se então a temperatura, com o corpo imerso em óleo. Com o aumento da temperatura ocorre o aumento da deflexão. O ponto de termodistorção é a temperatura que a flecha aumenta em 0,25 mm na deflexão máxima. O ensaio é feito em peças fundidas de poliéster sem fibras para não haver influência nas propriedades mecânicas (CARVALHO, 1992). A temperatura de termodistorção é expressão da capacidade dos polímeros de reter módulo de elasticidade a altas temperaturas, o que para o poliéster depende do grau de interligação e da constituição da resina. Segundo Carvalho (1992), para as resinas bisfenólicas e éster-vinílicas $T_g = 1,2 \text{ HDT} = 25^\circ\text{C}$.

3.2.1.7 PÓS-CURA

Os laminados curados a temperatura ambiente não apresentam interligação adequada a aplicações sujeitas ao ataque de solventes. Para promover estas interligações é necessário que sejam submetidas a pós-cura. A pós-cura é a sujeição do laminados a temperatura acima da temperatura máxima de transição

vítrea, por um determinado período de tempo. Com este procedimento são facilitadas as interligações.

Em aplicações comuns não há necessidade de promover a pós cura, porém em aplicações que haja necessidade de baixos teores de estireno residual (armazenamento de alimentos) ou quando a peça será submetida a ambientes agressivos, é necessário pós curar a peça.

Precauções necessárias a pós-cura de laminados (CARVALHO, 1992):

- Aplicar temperatura 10°C acima da temperatura do ponto de transição vítrea máximo.
- Pós curar por um período de 1 a 3 horas, em função da temperatura.
- Laminados curados pelo sistema BPO-DMA devem ser pós-curados após a laminação, no máximo de uma semana após. No caso da proporção de BPO-DMA for 40:1 em peso 250 a 500 ppm de DMA e 10.000 a 20.000 ppm, de BPO, a pós-cura pode ser até três meses depois.
- Os laminados curados com o sistema MEKP-Cobalto podem ser pós-curados a qualquer momento. Sendo este sistema é o aconselhado para pós-cura.
- Para usos que exijam o sistema BPO-DMA, como hipoclorito de sódio. Deve-se observar os teores recomendados para aplicação e o tempo máximo par a execução da pós-cura.
- Nos elementos que não podem transmitir contaminação deve-se proceder à lavagem das superfícies internas com vapor em seguida a pós-cura.

3.1.2 Resina Tereftálica

As resinas de poliéster tereftálicas são sintetizadas substituindo-se, determinada proporção do anidro ftálico por ácido tereftálico. O ácido tereftálico é obtido da reciclagem de embalagens de “PET” (politerftalato de etileno), possibilitando uma redução no custo da resina em 20 %.

A resina tereftálica quando comparada à resina ortoftálica apresenta vantagens em aplicações que estarão em contato com a água, devido a sua menor absorção de água. Esta resina apresenta menor contração na polimerização, melhor temperatura de distorção térmica e maior resistência mecânica.

O desempenho destas resinas equivale à resina de poliéster isoftálica, em relação à resistência química, térmica e a hidrólise. A exposição aos raios ultravioleta provoca o amarelamento da resina, sua resistência é baixa quando exposta ao sol.

Um inconveniente desta resina é o aumento do tempo de produção devido à necessidade da abertura das ligações químicas para extração do tereftalato. Esta fase intermediária ocasiona um acréscimo de 30% no tempo de sua produção, comparado ao das resinas ortoftálicas segundo.

3.1.3 Resinas epóxi

Os primeiros adesivos a base de epóxi foram conhecidos a partir de 1936 quando Pierre Castan patenteou este produto. Devido a suas propriedades adesivas, diversas aplicações foram desenvolvidas em todas as indústrias para este novo material.

Os epóxios são resinas termofixas que suportam temperaturas inferiores a 70 •C e acima deste valor começam a se degradar. Em temperaturas na faixa de 300 •C se carbonizam.

As resinas epóxi não aceitam erros em sua preparação sendo pouco indicada a profissionais inexperientes.

As resinas de epóxi possuem excelente poder de adesão; elevada resistência mecânica; elevada resistência química ao ataque de ácidos, óleos álcalis e solventes; baixa retração; baixa deformação por fluência e baixa absorção de água.

A cura ocorre com o uso de endurecedor, que varia em proporção ao volume de resina na faixa de 100/20 a 100/50. O pot-life varia de 45 a 120 minutos. O pot-life é controlado pelo tipo de endurecedor

3.1.4 Resinas ester-vinílicas

As resinas ester-vinílicas têm origem da reação de bisfenol A ou F com epocloridina, originando uma resina epóxi. Esta resina reage com ácido acrílico ou metacrílico dando origem à resina do tipo éster-vinílica. O ácido metacrílico é preferido devido ao grupo metila. Esta denominação é consequência da presença do grupo éster junto ao grupo vinílico. Suas duplas ligações entre átomos de carbono (insaturação), nos extremos da cadeia, são altamente reativas, apresentando excelente cura.

Estas resinas apresentam a facilidade de cura do poliéster e resistência semelhante ao epóxi.

Os laminados com esta resina apresentam baixa absorção de água e menor hidrólise (quebra da cadeia molecular pela água).

As resinas éster-vinílicas são resistentes ao ataque químico de solventes polares.

Estas resinas apresentam características intermediárias entre o epóxi e as resinas de poliésteres em termo de resistência física, química e em relação ao custo. Sendo uma opção interessante (NASSEH, 2000).

3.1.5 Resinas fenólicas

É uma resina obtida a partir da reação entre um fenol e um aldeído.

A resina fenólica foi a primeira resina sintética sintetizada sendo usada em isoladores e patenteada por Baekeland, conhecida como bakelite.

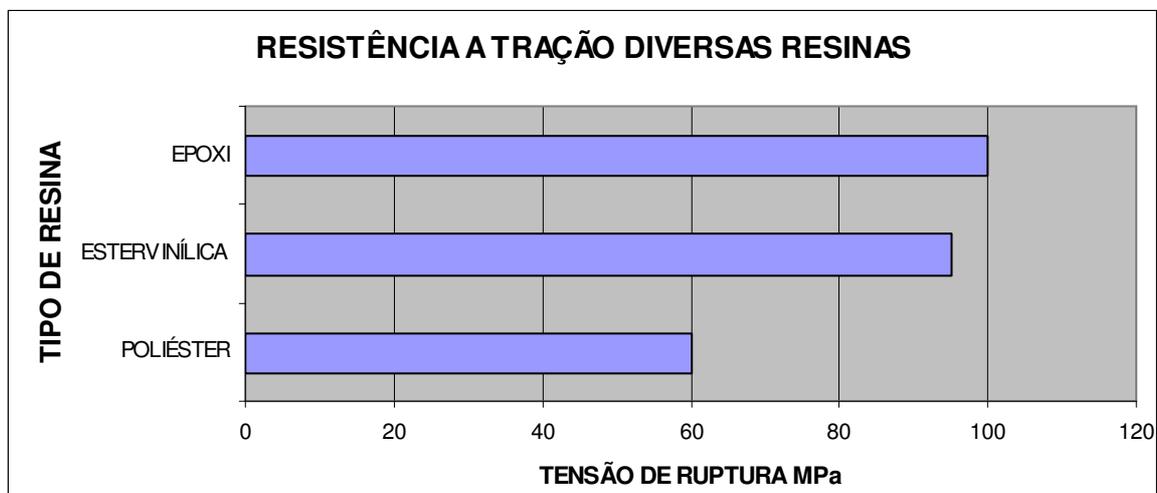
As resinas fenólicas suportam altas temperaturas, resistem aos solventes orgânicos.

Não emitem gases tóxicos e possuem boa aderência a outras resinas.

3.2 COMPARATIVO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS RESINAS

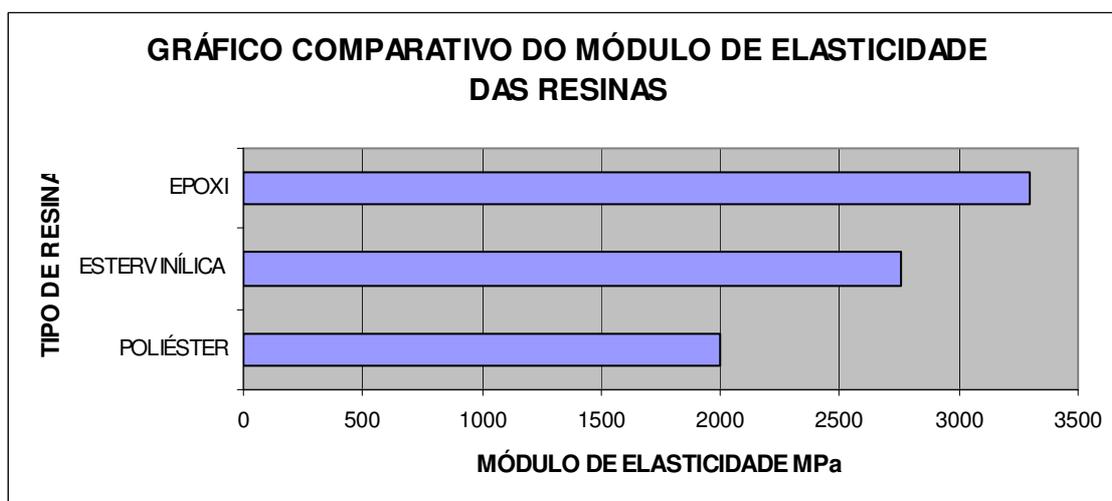
Nas Figuras 3.11, 3.12, 3.13 são apresentados quadros comparativos das características físicas das diversas resinas. A resina epóxi apresenta maior resistência mecânica que os outros tipos. Como se pode observar a resina ester-vinílica possui características mecânicas intermediárias entre o poliéster e o epóxi. Quando se considera o custo, a resina de poliéster apresenta menor valor e a epóxi

o mais elevado. Este fator deve ser levado em consideração quando da especificação do material.



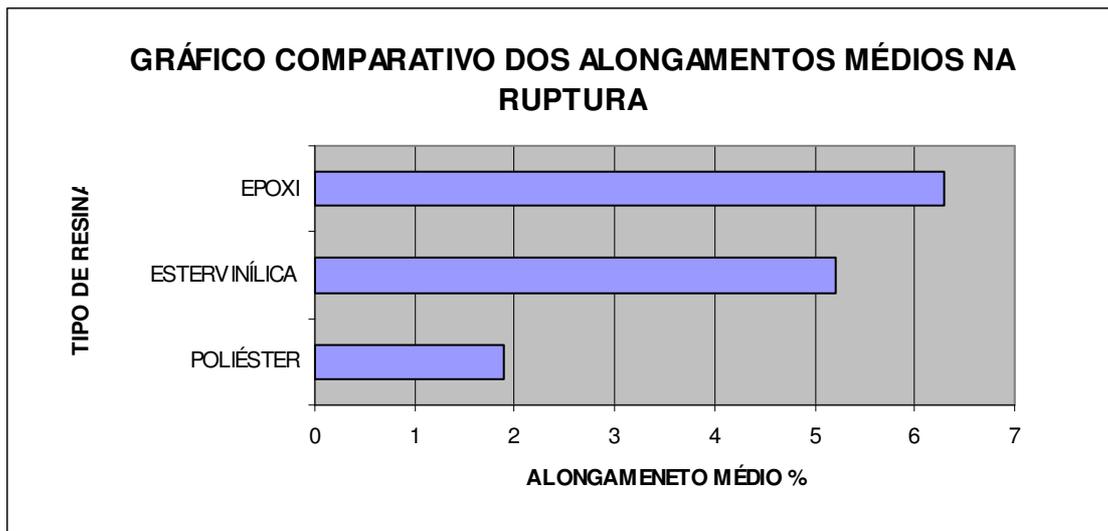
3.11 Gráfico comparativo de resistência à tração

Fonte: O autor adaptado de Nasseh (2000)



3.12 Gráfico comparativo dos módulos de elasticidade das diversas resinas.

Fonte O autor adaptado de Nasseh (2000).



3.13 Gráfico comparativo dos alongamentos médios na ruptura.

Fonte: O autor adaptado de Nasseh (2000).

Há de se observar que o processo de cura influencia nas características das resinas aumentando os valores apresentados nos gráficos acima.

Esta variação é função do grau de polimerização e da formulação da resina.

4 FIBRAS DE REFORÇO

4.1 FIBRAS NATURAIS VEGETAIS

As fibras naturais sempre foram utilizadas pelo homem servindo de fio para confecção de vestuário, na produção de cabos trançados, na confecção de cestos para carga e estocagem de alimentos.

O uso de fibras é remoto, através de estudos arqueológicos foi descoberta na Índia a sua utilização 1.800 anos AC.

Os vegetais produtores de fibras são uma fonte renovável de matéria prima dependendo apenas de solo e sol. Este tipo de cultura adapta-se bem ao semi-árido nordestino, sendo uma opção para exploração econômica nesta região.

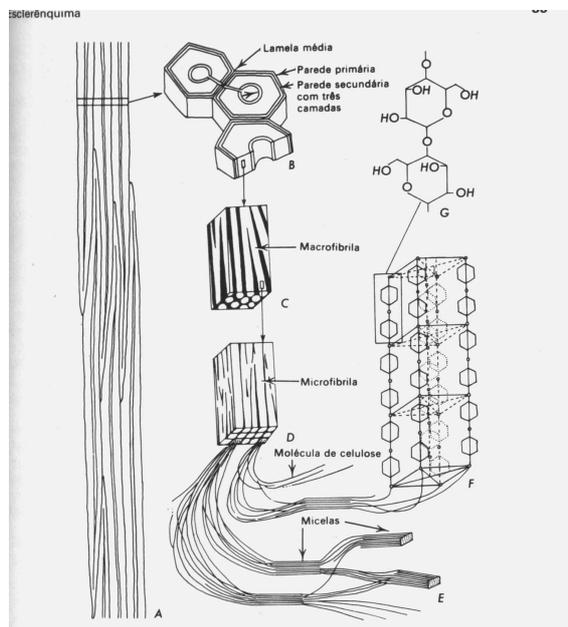
As fibras vegetais são células de esclerênquima, em geral longas e delgada apresentando espessura muito inferior ao comprimento. As com paredes secundárias são mais ou menos espessas e em geral ocorrem em feixes, segundo Esau (1974).

Estão distribuídas em diversas partes das plantas, sendo comum nas dicotiledôneas nos tecidos vasculares. Constituem fibras de floema e de xilema ou lenho.

A parede primária apresenta como principal componente a celulose, é constituída também de substâncias não celulósicas tais como a hemicelulose e compostos pécticos.

A parede secundária é mais ou menos espessa composta essencialmente de celulose acompanhada por substâncias não-celulósicas, sem componentes pécticos verdadeiros, formam geralmente feixes. Em geral são estes feixes usados comercialmente, segundo Esau (1974). A extração das fibras é feita por meio de

maceração. Este processo visa separar as células de fibras das células não fibrosas. Estas fibras funcionam como elemento de sustentação nas plantas. A Figura 4.1 apresenta a estrutura das fibras em diversas escalas.



A - Feixe de células fibriformes.

B - Corte transversal das células fibriformes.

C - Fragmento de camada secundária média, com macrofibrilas (branco) de celulose e espaços interfibrilares (negro), ocupado com material não celulósico.

D - fragmento de uma macrofibrila (branco) mostrando microfibrilas (branco), sendo o espaço negro preenchido por material não celulósico.

E - Microfibrilas (micelas)

F - Fragmento de uma micela, mostrando partes de moléculas celulósicas em cadeia.

G - Resíduos de glicose, ligados por átomos de oxigênio-fragmento de molécula de celulose.

Figura 4.1 Estrutura da parede celular da célula de fibras.

Fonte: Esaú, (1974).

As fibras lignocelulósicas são as de uso mais comum em virtude de sua diversidade, sendo o seu maior uso em indústrias de menor importância. O uso destas fibras também atende a demanda de populações menos desenvolvidas, como fonte de matéria prima para vestuário e utensílios domésticos, segundo Aquino (2003) apud Medina (1995).

As fibras têm sido usadas como material de construção por diversos povos como elementos de amarração de estruturas, cobertura elemento de vedação ou como reforço adicionado em elementos construtivos.

Alguns países têm tradição do uso de fibras na construção de habitações em virtude de características culturais. Países da África e América latina usam fibras vegetais em suas habitações.

As fibras podem ser classificadas de acordo com a parte vegetal de origem segundo Aquino (2003), Apud Medina (1959) em:

- Semente, algodão.
- Líber, juta, linho, cânhamo, crotalária, papoula-de-São-Francisco e guaxima.
- Folha, sisal, abacá, henequém, cantala, foemio, caroá, istle, pita, piaçava.
- Fruto, coco e paina.
- Raiz, zacatão.

As plantas fibrosas em geral fornecem fibras, sendo algumas compridas e outras mais curtas.

Segundo Esau (1974) as fibras de floema das dicotiledôneas são fibras liberianas, entre algumas se pode citar: cânhamo (*Cambias sativa*), usado em cordoalha; juta (*Corchorus capsularis*), cordoalhas e aniagens; papoula de São Francisco (*Hibiscua cannabinus*), tecidos grosseiros; linho (*Linum usitatissimum*), tecidos, fios de linha e rami (*Bohemeria nívea*), tecidos. As fibras de floema são classificadas como “fibras macias” independente de serem ou não lignificadas são relativamente moles e flexíveis. A Figura 4.2 mostra fibras de linho em corte transversal e em fragmento isolado.

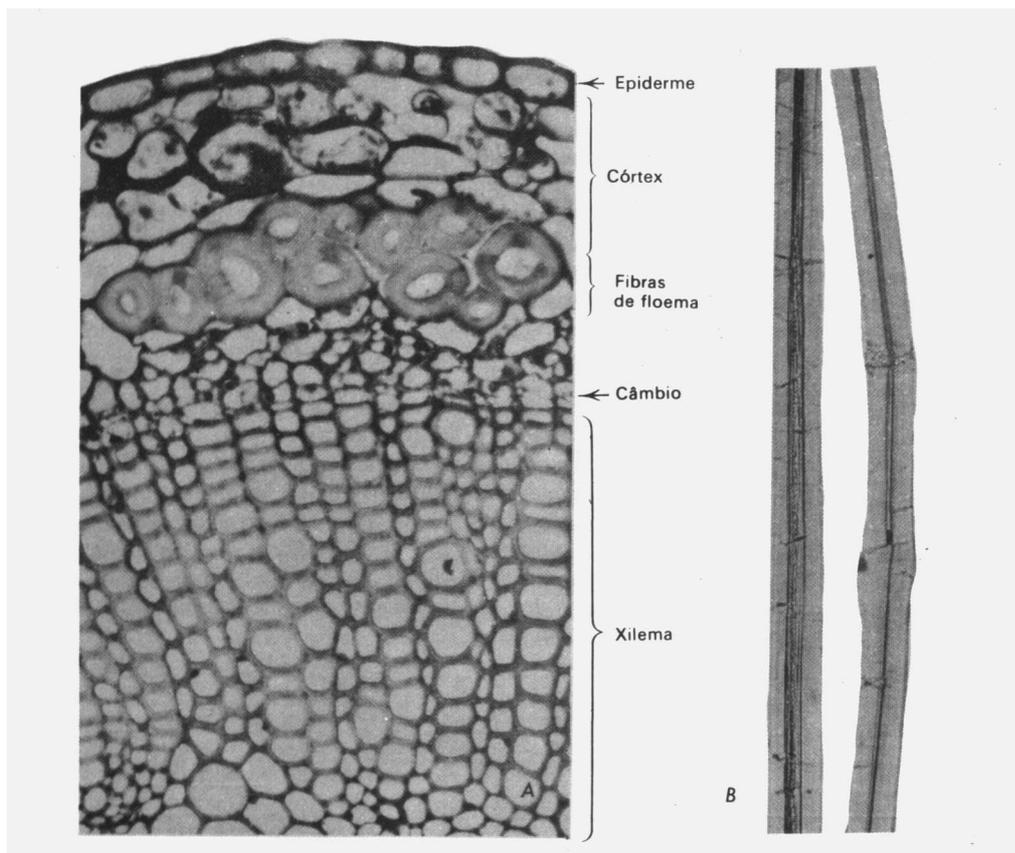


Figura 4.2 Fibra de linho em corte transversal do caule e fragmento de fibras isoladas.
 Fonte: Esau, (1974).

Segundo Esau (1974) apud Harris (1954), as fibras das monocotiledôneas, chamadas em geral de “fibras de folhas”, por serem obtidas das folhas, são classificadas de “fibras duras” devido às paredes fortemente lignificadas, são rígidas e firmes.

O comprimento das fibras varia de acordo com a espécie, segundo Esau (1974) apud Harris (1954) como exemplo: Fibras de floema: juta 0,8 a 6,0 mm; cânhamo, 5 a 55 mm; linho, 9 a 70 mm; rami, 50 a 250 mm. Fibras de folhas: sisal, 0,8 a 8,0 mm; espada-de-são-jorge, 1,0 a 7,0 mm; abacá, 2,0 a 12,0 mm; fórmio, 2,0 a 15,0 mm.

Comercialmente falando, aplica-se o termo fibra a materiais que em um sentido botânico, além de células de fibra incluem outras que não são fibras. As fibras de folhas de monocotiledônias incluem elementos vasculares. As fibras de algodão são pêlos epidérmicos de sementes de *Gossypium*; a rafia é constituída de segmentos foliares da palmeira *Raphia* e a rota (junco) de caule da palmeira *Calamus*, segundo Esau (1974).

É grande o número de plantas produtoras de fibras sendo este recurso inesgotável. Porém não há uma exploração comercial deste recurso. Segundo Aquino (2003) apud Medina, (1959) isto é devido a:

- Falta de conhecimento de conhecimento das exigências das plantas quando em cultura;
- Insuficiência de preparo das fibras;
- Falta de similaridade com fibras industriais e usos com fibras tradicionais, em consequência, não competição econômica;
- Descontinuidade de oferta do produto, causando a incapacidade de tradição no mercado;

A quantidade de plantas produtoras de fibras é bastante vasto segundo Aquino (2003) apud Medina (1959), em 1872 era estimado em 550, provavelmente 700, as plantas úteis à humanidade.

As fibras de maior utilização pelo homem são: abacaba, algodão, bambu, da bananeira, cana da Índia, cana-de-açúcar, celulose, coco, capim elefante, esponja, henequém, juta, linho, linho da Nova Zelândia, malva roxa, piaçava, tanchagem, rami, sisal.

As fibras lignocelulósicas apresentam propriedades mecânicas inferiores as fibras sintéticas. O atrativo destas fibras está no tocante a preservação do meio ambiente. Além da oferta generosa no Brasil.

Os resíduos oriundos da obtenção de produtos agroindustriais, florestais carecem de informações disponíveis de como transformá-los em produtos valorizados, segundo Aquino (2003) apud Salvastrano Jr.et al (1997).

4.1.1 Fibras vegetais mais utilizadas

4.1.1.1 Fibras de sisal

A fibra de sisal é obtida das folhas de plantas da família das Agaváceas, antes classificadas entre as Amarilidáceas, dos gêneros Agave e Fourcroya, que são semelhantes no aspecto.

Estas plantas conhecidas popularmente como pita, são originárias do México, existem aproximadamente 350 espécies. A espécie mais utilizada é a *Agave Sisalana*, denominada de “sisal verdadeiro”.

O *Sisalana* possui um caule que pode atingir dois metros, ao qual estão fixadas as folhas basais suculentas, de coloração cinza-esverdeada. Suas folhas são retilíneas com forma de ponta de lança, com largura variando de 8 a 10cm e comprimento de 1,50 a 2,00m, podendo alcançar 3,00m.

O cultivo do sisal deve ser feito em solos não sujeitos a encharcamento. Devido a sua raiz alcançar a profundidade de 1,50 m é mais aconselhável sua cultura ser desenvolvida em regiões de baixo índice pluviométrico. Devido a resistência ao clima, sua cultura se adapta bem ao Nordeste do Brasil.

O rendimento médio é de 15 folhas, com o primeiro corte entre 2 e 3 anos após o plantio, com intervalos de corte de 6 a 9 meses subseqüentes.

As plantas florescem apenas uma vez a partir de uma haste longa que pode alcançar de 5 a 10m de altura. Após a eflorescência a planta em geral morre.

Das folhas de sisal se extrai ácidos, gorduras, álcool, celulose, e fibras. As fibras representam 20% de fibras, 50% de suco, do qual se obtém hecogenina para produção de glicocorticóides para indústria farmacêutica. Os 30% restantes são constituídos de água.

A fibra é extraída por meio de processo mecânico artesanal. Após o desfibramento é submetida a processo natural de secagem, resultando em feixe de fibras longas amarelas.

Estas fibras estão entre as mais resistentes no grupo das fibras vegetais.

As fibras têm comprimento entre 90 a 120 cm. O uso do sisal está voltado para produção de fios para enfardamento de forragens; artesanato; cordas e cordéis torcidos. O sisal também é utilizado em estofados; pasta para indústria de celulose; tapetes; tequila, remédios, biofertilizantes; ração animal; adubo orgânico e sacaria. Na indústria automobilística em compósitos como substituto da fibra de vidro.

Os resíduos denominados de refugo, bucha branca e fibras curtas resultantes do beneficiamento e da produção de fios e cordas, são compostos de fibras de comprimentos variados e sem pó, não apresentando valor comercial baixo no

mercado. Na produção de fio agrícola para exportação dá origem a um resíduo de fibras curtas de dimensões inferiores a 1 cm. Estas fibras são impregnadas com óleo mineral na proporção de 16 % da massa de fibras. Outro resíduo sem valor comercial é oriundo da produção de tapetes, ramo de mercado em desenvolvimento.

4.1.1.2 Fibras de Piaçava

A fibra de piaçava é extraída de uma palmeira denominada de *Attalea funífera Mart.* Esta palmeira é originária do Sul da Bahia é conhecida como piaçava da Bahia. Outra espécie a *Leopoldina piassaba Wallace*, denominada de piaçava-do-Pará, é encontrada no Alto Rio Negro no Estado do Amazonas e no norte do Estado do Pará. Outra espécie denominada de *Attalea acaulis* ocorre ao norte do Estado da Bahia em terrenos arenosos, secos. Alguns autores acreditam que seja a *Attalea funífera* sujeita a condições de deficiência de água em solos pobres.

As fibras da *Attalea funífera* são comercialmente melhores, são impermeáveis e mantêm a elasticidade. As fibras são mais longas que a da Amazônia, podendo chegara 3,00 m e 1,1 mm de espessura.

A palmeira *Attalea funífera* é nativa disseminada em associação com vegetação secundária sob a mata ou em áreas exposta à luz. Procedimentos de limpeza da planta e controle de invasora melhoram a produtividade. Com o plantio é conseguida uma densidade de 1.000 plantas/ha, enquanto a mata natural apresenta a densidade de 300 plantas /ha. A colheita ocorre uma vez ao ano, a partir do sétimo ano de plantio.

A piaçava do Pará apresenta mais macia e maior valor comercial. Sendo suas fibras mais flexíveis e elásticas. Quando comparada com a piaçava da Bahia possuem menor capacidade de conservar elasticidade quando úmidas são menos permeáveis.

As palmeiras produzem:

- Fibras industriais usadas na indústria de vassouras, enchimento de assentos de carro, cordoaria e escovões.
- O resíduo da limpeza (bagaço, fita ou borra), usado como cobertura.
- Coco para alimentação, na forma de mingau, leite e farinha.
- Coco como combustível em forno industrial.

- O coco também é usado na produção de botões e artesanato.
- Isolante térmico.

No beneficiamento 30% de refugo são gerados que separados da palha poderiam agregar valor comercial ao material. Um outro resíduo que poderia ser aproveitado seria os rejeitos de indústria de vassouras, segundo Aquino (2003) apud John (1996).

4.1.1.3 Fibras de coco

O coqueiro denominado de *Cocos nucífera Linn* é um a palmeira que pode atingir 30 m de altura, com tronco cilíndrico. Foi trazido para o Brasil em 1553, pelos portugueses que o introduziram na Bahia, Segundo Gomes (1984).

A parte explorada comercialmente é o fruto que é uma drupa de tamanho grande e arredondado. O coco é composto do exocarpo, camada fina, lisa que envolve a fruta; mesocarpo, camada grossa, fibrosa, acastanhada quando seca é nesta região que se localiza o coiro, fibra de grande uso industrial; endocarpo lenhoso, duríssimo de coloração escura; o albume que serve de alimento para o embrião, sendo oca acumula água que será consumida com o desenvolvimento do coco (GOMES, 1984).

As fibras do mesocarpo são obtidas por meio de curtimento, prensagem, desfibramento. Deste processo são obtidas fibras de escova e de enchimento, que são classificadas segundo a cor e o comprimento. As fibras possuem comprimento variando de 1 a 3 cm.

As fibras do coiro são usadas em: estofamento, filtros industriais, divisórias associadas ao gesso, tapetes, isolamento acústico, proteção de encostas contra erosão, forração.

Com o aumento do consumo do fruto e a redução da demanda pela indústria automobilística resultado da substituição por matéria prima sintética, existe um excedente de produto não aproveitado.

4.1.1.4 Fibras de juta

As fibras de juta são provenientes das fibras liberianas da planta do gênero *Corchorus capsularis*, família das Tiliaceae. A colheita deve ser feita na emissão de botões florais, período de melhor qualidade da fibra, segundo Akil (1992).

A cultura de juta é feita em áreas de aluvião na região do vale do Rio Amazonas.

As fibras de juta apresentam coloração variando do creme-claro ao vermelho-marrom. Seu comprimento varia de 1,80m a 3,60m. A qualidade da fibra é função do comprimento, resistência, cor, brilho, rigidez e proporção de cortes. A fibra em geral apresenta brilho fino e sedoso (AKIL, 1992).

A fibra da juta é usada na produção de cordoalha, sacos e telas de aniagem. O tecido resultante apresenta-se grosseiro e custo baixo.

4.1.1.5 Fibras de bagaço de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea gigante da espécie *Saccharum officinarum*, Linn, sendo bem adaptada a diversos ecossistemas.

A fibra da cana-de-açúcar é encontrada no bagaço resultante da moagem para produção industrial.

Do bagaço são produzidos: farelo para ração animal, placas de papel, matéria prima para produção de energia, matéria prima para produção de amônia, metano, ácido acético, aldeído acético, condicionadores de solo, camada absorvente para galinheiro (AKIL, 1992).

Com o uso energético, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de se obter espécies com maior volume de fibras, segundo Akil (1992).

O bagaço da cana apesar da moagem apresenta alto teor de sacarose o que limita certos usos sem prévio tratamento.

4.1.1.6 Fibras de RAMI

A fibra do rami é extraída de uma planta da família das Urticáceas, originária da Ásia oriental, *Boehmeria nivea*. A planta sufrutescente, possui rizoma do qual nascem ramos que crescem mais de 2,00m. As folhas, caducas não são urticantes.

Por meio de processo de descorticação, são retiradas fitas nas quais encontram-se as fibras. Para a utilização em tecelagem as fibras de rami bruto passam por processo de estabilização, operações mecânicas e químicas.

As fibras do rami são mais longas que a do linho, do cânhamo e da juta, é delgada e resistente apresentando brilho que torna semelhante à seda.

As fibras do rami são usadas na fabricação de tecidos, cordas barbantes. Seu também pode se estender à produção de mangueiras, pneus, fios de pára-quadras (AQUINO, 2003). Impregnados com tório, na antiguidade era usado na produção de camisas para bicos Auer de iluminação a gás.

4.1.1.7 Fibras de algodão

O algodoeiro (*Gissypium*) da família das Malváceas (Dicotiledônes). São distintas dezenas de espécies, algumas originárias da América e outras da Ásia. As variedades anuais e bianuais, com 0,70m a 1,00m de altura.

A fibra do algodão é proveniente da penugem que envolve as sementes do algodoeiro. Sua colheita é feita quando a flor amadurece e deixa escapar os pelos. As fibras do algodão 10 a 60 mm de comprimento e espessura de 14 a 28 microns. O exame microscópico revela uma fibra em forma de fita, enrolada em espiral, com bordas brilhantes.

O valor econômico do algodão está relacionado com a sua brancura e comprimento das fibras. No Nordeste brasileiro são explorados o algodoeiro de fibras longas e extralongas.

Os resíduos (fibras inferiores a 5 mm), são usadas em reforço de pastas, seu preço é baixo nos locais produtores, segundo Aquino (2003) apud Salvastrano Jr et al (1997).

4.1.1.8 Fibras de bambú

As fibras de bambu estão localizadas na periferia do caule de plantas da espécie *Bambusa vulgaris*, constituindo 60 a 70% de seu peso. As fibras estão dispostas ao longo do comprimento, fortemente interligadas. Esta característica confere resistência longitudinal à tração e baixa resistência transversal, característica que faz com que seja um material anisotrópico.

Seu caule em algumas espécies é do tipo colmo, com dimensões de 45 cm a 30 cm.

O uso do bambu em construção civil é comum, sendo nos países asiáticos a maior concentração.

4.1.1.9 Fibras de bananeira

As fibras da bananeira são extraídas das bainhas foliares do pseudocaule. Esta parte da bananeira é cortada a cada produção.

Da palha originária do pseudocaule são produzidos: tapetes, bolsas, cestas, chapéus, sacolas, cortinas e esteiras artesanalmente.

Segundo Aquino (2003) apud Nolasco (1997), o uso desta fibra apresenta potencial produtivo nas regiões produtoras. Porém não há extração em escala comercial destas fibras, o que torna o seu uso em compósito viável em médio prazo, segundo Aquino (2003) apud Salvastrano Jr et al (1997).

4.1.1.10 FIBRAS DE HENEQUEM OU MAGUEY

Estas fibras são extraídas de uma espécie de Agave, parecida com o sisal, conhecida como falso sisal. Suas folhas verdes e pontiagudas possuem espinhos medindo de 1,00m a 1,30m de comprimento.

O uso das fibras de henequem está direcionado a produção de cordas.

4.1.2 Características físicas e mecânicas de algumas fibras vegetais

Para o uso em compósito as características macroscópicas relevantes são as que interferem no comportamento do compósito. Segundo Aquino (2003) apud Sosa Griffin; Agopyan (1997) são:

- Dimensões – comprimento/ diâmetro, fator determinante da transferência de esforços matriz / fibra. Irregularidade na seção transversal e aspecto fibrilado, que influenciam na ancoragem das fibras.
- Volume de vazios e absorção de água – em função do volume de vazios, a absorção de água é elevada, provocando o inchaço e posterior retração em presença de água. Os volumes de vazio

melhoram o comportamento acústico e o isolamento térmico nos produtos.

- Resistência à tração – em média semelhantes entre si.
- Módulo de elasticidade - As fibras vegetais apresentam baixo módulo, quando comparado com as matrizes, sendo seu uso adequado em componentes que estejam a impactos e resistam a esforços dinâmicos.

O Quadro 4.1 apresenta as características físicas e mecânicas de algumas fibras.

Fibra	Absorção de água (%)	Massa específica (kg/m³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)x 10⁻³	Alongamento na ruptura (%)
Sisal	110	1270	347-378	15,2	4,9-5,4**
Piaçava	34,4-108	1054	143	5,6	6**
Coco (Cocos Nucifera)	93,8	1177	95-118	2,8	23,9/51,4**
Cana-de açúcar	562	751	181	50	5,11***
Bambu (Bambusa vulgaris)	145	1158	73-505	5,1-4,6	3,2**
Algodão	-	-	331,2	-	8*
Linho	-	-	662,4	-	1,5*
Rami	-	-	669,3	-	4*

Quadro 4.1 Características física e mecânica de algumas fibras

Fonte: * Himmelfarb (1966) ** Aquino (2003) apud Agopyan (1997), ***Akil (1992).

4.2 FIBRAS INDUSTRIAIS

São materiais de diâmetro entre 6 e 15 microns e possuem resistência à tração até quatro vezes superior ao aço (NASSEH, 2000). Suas características variam de acordo com o material de que se originam.

4.2.1 Fibra de vidro

As fibras de vidro já eram conhecidas no Egito Antigo, porém apenas em 1836, foi patenteado na Europa um método de tecer vidro maleável. Em 1839, tecidos de fibra de vidro foram colocados em uma exposição, sendo que seu fabricante começou a receber encomenda em 1840 (NASSEH,2000).

Este material não teve competitividade com outros produtos de sua época devido a seu alto custo.

Com o desenvolvimento das resinas sintéticas, a partir de 1940 houve uma expansão no seu campo de aplicação.

As fibras de vidro têm favorecido o uso dos plásticos reforçados, em aplicações reservadas aos metais e suas ligas. As características que tornam atraentes as fibras como reforços em compósito são:

- Baixo coeficiente de dilatação térmica
- Elevadas propriedades mecânicas
- Alto alongamento na ruptura
- Facilidade de processamento
- Baixo custo

Com a contribuição das fibras sintéticas, os compósitos de matriz polimérica apresentam as qualidades dos plásticos: resistência a corrosão, baixo custo de processamento, liberdade de projeto, associadas a outras propriedades advindas do acréscimo das fibras, como: resistência mecânica, estabilidade dimensional, resistência a temperaturas elevadas, resistência a fadiga, e ao impacto. A adição de fibras aos plásticos expandiu sua aplicação, possibilitando a concorrência com os metais.

As fibras de vidro são obtidas através de processo de fusão e fiberização de mistura de óxidos metálicos segundo Carvalho (1992). Após análise química, são moídos, dosados misturados, postos em fornos de fusão para serem posteriormente transformados em fibras.

As fibras são produzidas do vidro na forma líquida, que passa em feiras e são resfriadas as altas velocidades. Controlados, a temperatura e a velocidade de

escoamento, são produzidos filamentos de diâmetros variados. Estes fios passam por tratamento para oferecer melhor adesão às resinas.

O que distingue o vidro comum tipo A, usados em garrafas, dos utilizados como reforço é a alta resistividade elétrica dos vidros para reforço.

Na Figura 4.3 tem-se o esquema de um forno para produção de fibras de vidro. Na zona de fusão a temperatura é de aproximadamente 1550°C. Borbulhadores são fixados nesta área com objetivo de homogeneizar a massa fundida antes de passar para o conduto de alimentação das fieiras. Nesta região a massa se resfria até alcançar a temperatura de fiberização que se encontra em torno de 1250°C. A esta temperatura a massa apresenta viscosidade adequada a fiberização, possibilitando seu estiramento sem a ocorrência de quebras.

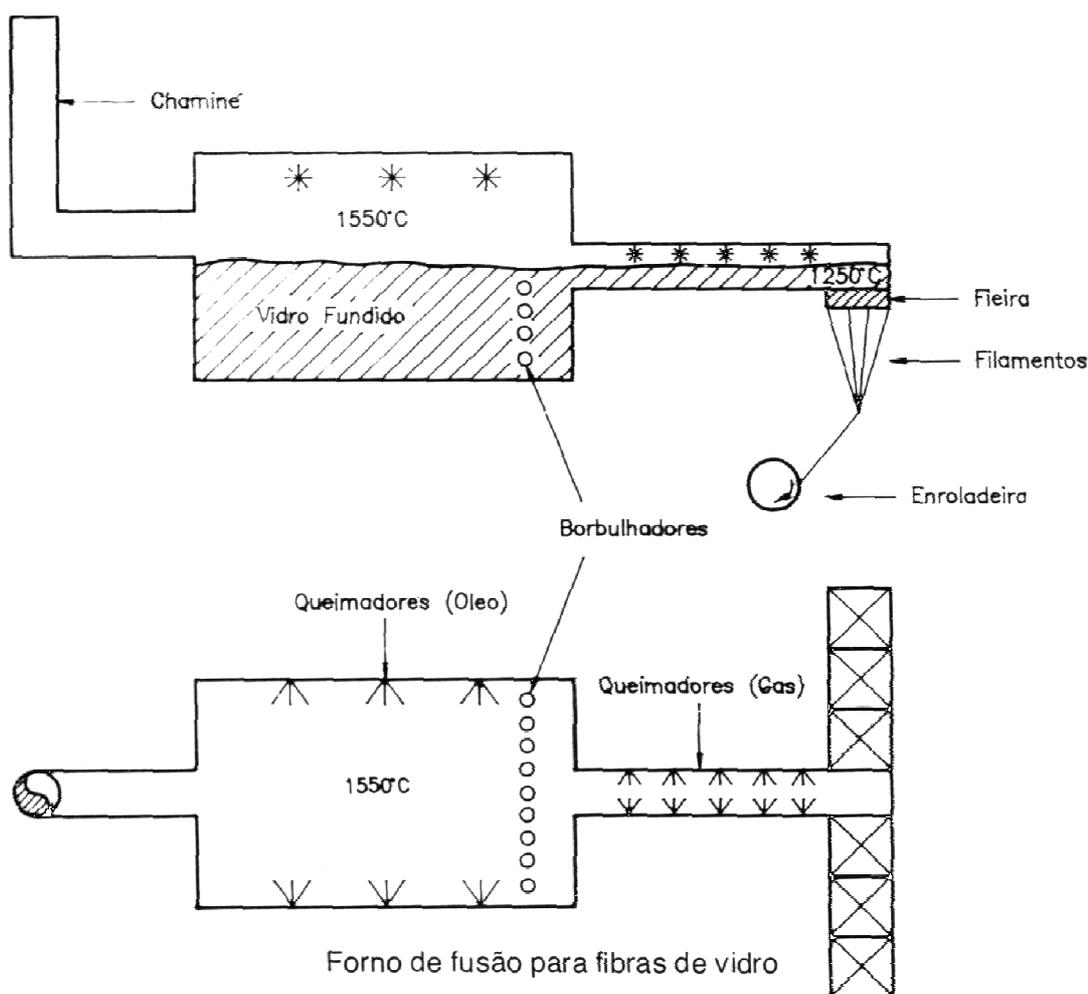


Figura: 4.3 Esquema de forno para produção de fibra de vidro.

Fonte: Carvalho 1998

$$Q = K \cdot \frac{R^{5/2} \cdot h}{l \cdot \eta}$$

A vazão nos orifícios pode ser estimada segundo a seguinte expressão:

Sendo:

Q - vazão

K - coeficiente de ajuste

R - raio do orifício

h - altura da coluna de vidro fundido

l - comprimento do bico

η - viscosidade da massa de vidro

Segundo a fórmula a vazão não depende do diâmetro do filamento. É indiferente puxar um filamento de diâmetro grande ou pequeno, o que influencia é a geometria da feira e a viscosidade da massa de vidro (CARVALHO, 1998). Na Figura 4.4 tem-se o esquema do orifício de fiberização.

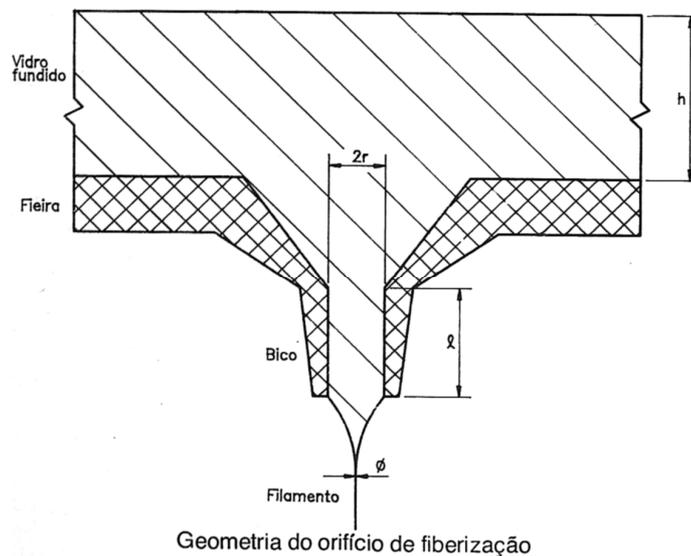


Figura 4.4 Orifício de fiberização.

Fonte: Carvalho 1992.

O que fixa o diâmetro do filamento é a velocidade de puxamento das enroladeiras. Sendo menor o diâmetro, com o aumento da velocidade de enrolamento.

Ao saírem da fieira o fio é tratado com emulsão aquosa, formulada com varias substâncias, que tem função de: aglutinar os filamentos mantendo-os em mechas, proteger, evitando a quebra por abrasão e promover adesão da matriz as fibras.

A emulsão é composta por:

- Água, que serve de veículo para aplicação da encimagem.
- Emulsificante, que emulcionam os materiais da encimagem.
- Antiestático serve para dissipar a eletricidade estática desenvolvida em ambientes secos.
- Lubrificante, que facilitam a passagem dos filamentos através dos olhais.
- Silanos servem para unir as fibras às matrizes, mantendo as características mecânicas do compósito, em ambientes úmidos.

Sendo a vazão da fieira controlada e constante, é conseguida uma densidade linear uniforme. Esta densidade é um parâmetro importante denominado de “TEX”, que corresponde por definição à quantidade de gramas por quilômetro de mecha de fibras de vidro. O TEX depende do número de filamentos, se uma mecha tiver poucos filamentos grossos, terá o mesmo número TEX de outra com muitos filamentos, porém com filamentos finos (CARVALHO, 1992).

As mechas são enroladas em espiral com ângulos pré-determinados para facilitar o desenrolamento e a eliminação da água. Os filamentos podem ser agrupados em uma ou mais mechas de acordo com o uso, sendo possível à torta conter uma ou mais mechas.

Há casos em que os filamentos de uma fieira são agrupados em uma mecha antes de serem enrolados, é o caso dos rovings destinados ao processo de laminação por enrolamento, pultrusão, e tecelagem. Em outros casos os filamentos são divididos em mechas menores antes de serem enrolados.

Após o enrolamento as tortas são postas em estufas para secar e em seguida processadas.

As fibras possuem características diversas de acordo com a composição do vidro que lhe originou. De acordo com a sua composição temos entre as fibras mais utilizadas os seguintes tipos: E, C, S, R (NASSEH, 2000).

No Quadro 4.2 observam-se as diversas composições das fibras.

Composição	Tipo de fibra		
	E	S	R
SiO ₂	52,4	64,4	60,0
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	14,4	25,0	25,0
CaO	17,2	X	9,0
MgO	4,6	10,3	6,0
Na ₂ O, K ₂ O	0,8	0,3	X
B ₂ O ₃	10,6	X	X

Quadro 4.2 Composição dos diversos tipos de fibra de vidro.

Fonte: Adaptado de Nasseh (2000) pelo autor.

4.2.1.1 Fibras do tipo E

A fibra do tipo E tem baixa alcalinidade, boa resistência à tração e boa rigidez a flexão.

Sendo a de uso mais comum em laminados, produzidas com um diâmetro de 6 a 15 microns. Estas fibras perdem metade de sua resistência devido a abrasão entre fibras durante seu processamento

Seu uso é bastante difundido em função de seu custo em comparação com outros tipos de fibras alternativas.

4.2.1.2 Fibras do tipo R e S

Em virtude da demanda da indústria aeroespacial por fibras mais resistentes, com propriedade mecânicas melhores, foi desenvolvida uma fibra denominada tipo S, fabricada desde 1960 nos EUA, na mesma época uma empresa francesa produziu um outro tipo denominado tipo R.

Estes dois tipos têm como característica uma maior proporção de alumínio e sílica, o que determina um aumento entre 20 % e 40 % em suas propriedades em

comparação com as do tipo E. Uma variante do tipo S-2 ou CS (comercial S-glass) é fabricado para uso não certificado em indústria militar e aeroespacial.

Em virtude do maior cuidado com seu acabamento e de seu baixo volume de produção, o custo destas fibras são cinco a nove vezes maior que a do tipo S, porém em função da aplicação seu custo se justifica.

As fibras do tipo S e R possuem um melhor acabamento e seus fios apresentam menor diâmetro em comparação as do tipo E sendo a sua área duas vezes maior, o que melhora a aderência em função de sua maior área de adesão.

4.2.2 Fibras Aramida

As fibras aramida foram desenvolvidas em 1965. São fibras derivadas do nylon, têm em geral cor amarela.

As fibras aramida possuem boa relação resistência densidade, se comparadas com as outras fibras do mercado. São cinco vezes mais resistentes que o aço e duas vezes mais resistente que as de vidro tipo E.

As fibras aramidas são resistentes a impactos e a choques cíclicos, o que impede a propagação de trincas e fissuras. Porém as fibras aramida não apresentam boa resistência à compressão, suas características de trabalho se assemelham aos metais, sendo elástica em baixas deformações e plástica em altas deformações.

A laminação das fibras aramidas é considerada difícil devido a característica de não se tornarem transparentes quando impregnadas, havendo a necessidade de mão de obra mais especializada.

As fibras de aramida são denominadas de acordo com seus nomes de registro; Kevlar • 49, Kevlar • 29, Twaron •, Tecnora •.

4.2.3 Fibras de carbono

As fibras de carbono são produzidas a partir de fibras orgânicas, denominada tecnologicamente de fibras precursoras, uma destas fibras é o poliacrilonitrila (PAN). Submetida em fornos especiais sob atmosfera inerte a temperaturas na faixa de 1.000 °C (fibras de carbono), 3.000 °C (fibras de grafite). Dependendo do tratamento, carbonização contínua, grafitação e oxidação, se obtém diversas configurações de resistência. Existem configurações que são várias vezes

superiores ao aço em resistência. A partir de outros materiais como precursores podem-se obter fibras de carbono, como exemplo o piche, porém, as propriedades mecânicas são inferiores ao PAN.

Sua cor é preta, são encontradas em quatro tipos principais: carbono HS, Carbono IM, Carbono HM, Carbono UHM, sendo suas resistências à tração respectivamente; 3.500, 5.300, 3.500, 2.000 MPa.

O diâmetro de seu filamento esta entre 7 e 11 microns e são agrupados em 48 mil filamentos.

A resistência à tração é compatível com as fibras de vidro tipo R e S, porém é superior a outras fibras quanto à rigidez, são resistentes à fadiga e a vibrações.

As fibras de carbono por serem quebradiças e não terem bom alongamento, não resistem ao impacto, para tal devem ser associadas a fibras de vidro do tipo R ou Aramida.

Seu custo é 15 a 40 vezes maior que o da fibra de vidro tipo E, porém devido a sua produção ser menos complexa que as outras seu custo tende a diminuir.

Em aplicações que serão submetidas a grande variação de temperatura, variando de 200°C a -100°C as fibras de carbono são estáveis apresentando dilatação térmica praticamente nula.

O uso de fibras de carbono está disseminado nas mais diversas áreas tais como: aeroespacial, médica, esportiva, industrial, aeronáutica e automotiva.

Como se pode observar cada tipo de fibra se presta à determinada solicitação, seja de ordem financeira seja de ordem de resistência, sendo sua escolha a critério do projetista.

4.3 MATERIAIS COMERCIAIS UTILIZADOS EM COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Os reforços para compósitos são produzidos em diversas configurações tais como: fios contínuos (fio roving), mantas constituídas de fibras de vidro picotadas e arrumadas de maneira multidirecional de diversas gramaturas, tecidos trançados, tecidos não trançados, biaxiais, triaxiais e quadriaxiais, woven roving (tecidos trançados com mechas).

4.3 1 Fio roving

Os fios enrolados em tortas são colocados em prateleiras e o enrolamento de várias mechas dá origem aos rovings. As mechas são enroladas em espiral com ângulos pré-determinados para facilitar o desenrolamento e a eliminação da água. Os filamentos podem ser agrupados em uma ou mais mechas de acordo com o uso, sendo possível à torta conter uma ou mais mechas.

Há casos em que os filamentos de uma fieira são agrupados em uma mecha antes de serem enrolados, é o caso dos rovings destinados ao processo de laminação por enrolamento, pultrusão, e tecelagem. Em outros casos os filamentos são divididos em mechas menores antes de serem enrolados (CARVALHO, 1992).

Após o enrolamento as tortas são postas em estufas para secar e em seguida processadas.

Os rovings enrolados em bobinadeiras, atingem o peso de 23 kg por bobina. O tex do roving depende do número de mechas por torta, do número de tortas usadas para alimentar a bobinadeira e do tex de cada mecha. A Foto 4.1 mostra o aspecto de um rolo de fio roving.

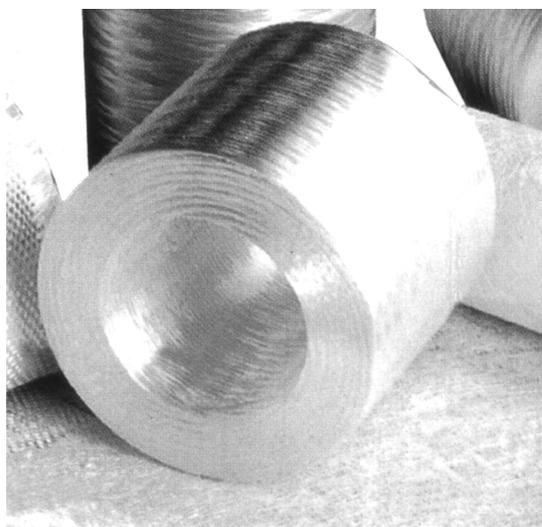


Foto 4.1 Rolo de fio roving.

Fonte: Revista do plástico reforçado – Materiais Compostos (2001).

Os rovings são utilizados para reforço em processo de laminação contínua (pultrusão), laminação a pistola, enrolamento (filament winding), laminação manual.

Para cada processo são produzidos rovings com características específicas para atender ao processo de produção.

4.3.1.1 Roving direto

É adequado ao processo de enrolamento (filament winding) e pultrusão devido a sua compatibilidade com as resinas empregadas nestes processos, poliéster, éster-vinílica e épxi.

4.3.1.2 Roving contínuo para processo de enrolamento

Este tipo é tratado superficialmente para facilitar a molhamento e trabalhabilidade. Este material também recebe tratamento químico para aumentar a adesão à matriz.

4.3.1.3 Roving para laminação por projeção

Este material é resultante do enrolamento de várias mechas sem torção. Estas mechas são aglutinadas por tratamento químico superficial objetivando facilitar o processamento e a compatibilização com a resina de poliéster. Este tratamento facilita a molhagem da fibra devido à solubilidade do aglutinante, aumentando assim a produtividade do processo.

4.3.1.4 Roving para painéis translúcidos

É o resultado do enrolamento em bobina de várias mechas de vários fios que recebem tratamento químico para oferecer translucidez aos laminados. Foi desenvolvido para laminação contínua e apresenta baixa eletricidade estática.

4.3.1.5 Roving para processo SMC e processo a vácuo

São adequados a estes processos por possuir boa processabilidade em aplicações estruturais, oferecendo acabamento de superfície classe A. Seus filamentos são enrolados sem torção e agrupados com tratamento superficial. Apresenta ótimas qualidades mecânicas aliadas a facilidade de impregnação.

4.3.2 Mantas

As mantas de fios picados são produzidas através do picotamento de mechas desenroladas de tortas em pedaços de 5cm de comprimento sobre uma esteira transportadora de forma aleatória, após é aplicado sobre a mesma um ligante a fim de fixar os pedaços em sua posição. A Figura 4.5 mostra o esquema do equipamento usado para produção de mantas.

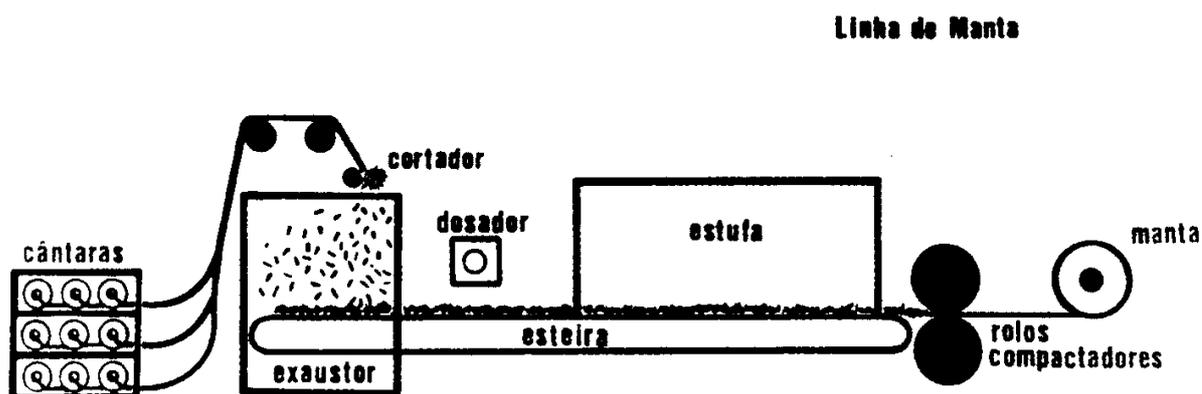


Figura 4.5 - Equipamento para produção de mantas.

Fonte: Carvalho (1992).

O ligante pode ser de dois tipos; em forma de pó ou emulsão. As mantas produzidas com emulsão são mais flexíveis que as produzidas com ligantes a base de pó, sendo, portanto mais fáceis de dobrar e de impregnar. O inconveniente do ligante a base de emulsão é a facilidade de absorver umidade, o que não é conveniente para o processamento, pois reduz a aderência da matriz à fibra.

A facilidade de impregnação e o baixo custo fazem das mantas, o material mais usualmente empregado em compósitos. As mantas apresentam características isotrópicas, pois apresentam resistência aproximadamente igual em todas as direções. Porém o que se observa na prática, é que há uma direção mais resistente, devido ao processo de fabricação, porém esta diferença é desprezível (Nasseh, 2000). As mantas apresentam o inconveniente de não permitir altas concentrações de fibras, em geral variando em torno de 25 % a 30 %, porém é comum de serem encontrados laminados com 20 % de teor de fibras. Devido ao tamanho e a descontinuidade das fibras, os produtos feitos com as mantas, apresentam reforço menor comparado a outros tipos de reforço. Uma vantagem da manta é a facilidade de rolagem e eliminação de bolhas de ar do laminado, o que aumenta a

produtividade e reduz o trabalho do laminador. A Figura 4.6 apresenta o aspecto das mantas.

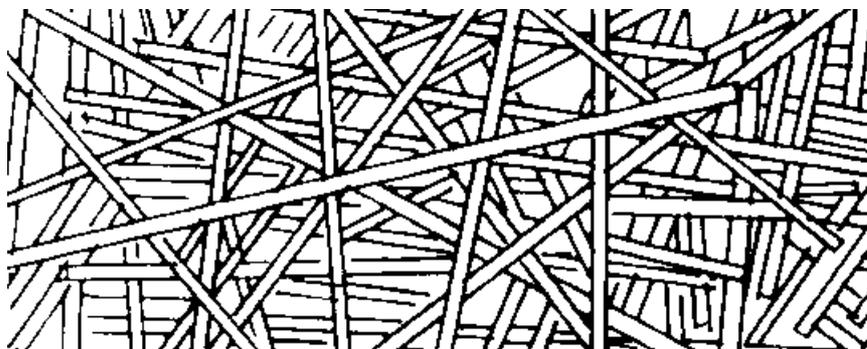


Figura 4.6 - Aspecto das mantas.

Fonte: Guia de laminação manual e a pistola Owens Corning.

As indústrias têm produzido mantas com características determinadas para a adequação aos processos de produção. Existem mantas apropriadas aos processos RTM, vácuo, e prensagem, que são resistentes ao arrasto das fibras, têm boa conformabilidade aos moldes e maciez. Há também mantas apropriadas ao processo de pultrusão, que apresentam fios mais longos que mantêm a integridade da manta apesar do atrito gerado pelo processo, e apresentam também facilidade de impregnação.

As mantas são fornecidas nas seguintes gramaturas, 150 g/ m², 225g/ m², 300 g/ m², 450 g/ m², 600 g/ m².

4.3.3 Véu de superfície

O véu de superfície é um tipo de manta fina feita com fios picados de vidro tipo C, para resistir ao ataque de ácidos, bases, ligados por copolímero estireno-acrílico. O véu geralmente é utilizado na primeira camada, pois devido ao alto grau de absorção de resina, são conseguidas nestas camadas porcentagens de resina em torno de 95 %, com a utilização de resina adequada esta camada é uma importante barreira química de proteção do reforço e também melhora o acabamento da superfície do laminado.

4.3.4 Tecidos

A palavra tecer tem origem latina da palavra texere, que significa entrelaçar. Os tecidos utilizados como reforço em compósitos são produzidos por processo

semelhante ao da tecelagem tradicional, diferenciando apenas pela maior resistência à abrasão dos teares, em virtude do atrito dos fios de fibra de vidro. A necessidade de redução do atrito tem o objetivo de não reduzir as características mecânicas das fibras.

Os tecidos são produzidos com mechas de fibras contínuas entrelaçadas e ligadas com ligantes químicos compatíveis com as resinas de impregnação, o que os diferencia das mantas.

Os tecidos podem ser fabricados com fibras de vidro dos tipos R, S, E, fibras de aramida e fibras de carbono ou uma associação de duas ou mais fibras de acordo com o tipo de solicitação a qual será submetida à peça a ser produzida, esta associação dá origem aos tecidos híbridos. Estes materiais vêm atender as necessidades de projeto, levando em consideração que cada tipo de fibra resiste melhor a um determinado tipo de solicitação. A escolha do material de reforço é orientada pelas características individuais de cada fibras, um tipo resiste melhor a tração, outra tipo resiste ao impacto, uma terceira apresenta densidade menor, a escolha esta relacionada a fatores de ordem técnica ou econômica. A associação de fibras de carbono com aramida produzem um laminado rígido e resistente ao impacto, já quando se deseja obter resistência ao impacto com baixo custo, devem-se associar as fibras de aramida com fibras de vidro.

Nos tecidos as fibras colocadas no sentido longitudinal denominam-se urdume, e os fios dispostos no sentido transversal, denominam-se trama.

Os tecidos podem ser fabricados com fios torcidos ou não, sendo os de fio torcidos mais facilmente produzidos, porém apresentam o inconveniente de apresentarem menor resistência, devido a maior quantidade de operações para sua produção, o que causa danos ao fio, devido à abrasão. Os tecidos de fibras de vidro com fios torcidos apresentam gramatura variando entre 90 g / m² e 400 g / m².

Já os tecidos de fios contínuos (não torcidos) são mais resistentes e apresentam maior facilidade de impregnação. Estes tecidos são denominados de *woven rovings*. Os *woven rovings* são produzidos com rovings trançados em duas direções, quando laminados produzem um maior reforço, se comparado aos tecidos de fio torcido. Os *woven rovings* são fabricados nas seguintes gramaturas: 400 g/

m², 600 g/ m² e 800 g/ m². Conforme aumenta a gramatura maior a proporção de fibras e conseqüentemente maior a resistência mecânica.

O uso de tecidos e woven rovings possibilitam a produção de laminados com maior teor de fibras e com menor peso se comparados com as mantas. Devido a sua forma de produção os tecidos possibilitam um arranjo de tal maneira que as fibras sejam direcionadas no sentido dos esforços predominantes. Os tecidos são mais facilmente colocados nos moldes, devido à uniformidade do tramado, mantém a espessura uniforme da peça e são menos suscetíveis a ocorrência de falhas e buracos.

Os tecidos apresentam largura comercial de 1,25 m e 1,50 m, suas fibras necessitam um acabamento superficial compatível com a resina a ser utilizada e adequado ao padrão de tecelagem, que em geral é o *Volan 5*. Quanto ao acabamento das bordas, podem ser, coladas, costuradas, arrematadas e livres. Os tecidos acima de 400 g/ m² apresentam geralmente bordas livres. Apesar de alguns laminadores preferi-los, pela facilidade de moldagem, apresentam o inconveniente de se deformarem no momento da laminação não assumindo as direções corretas projetadas, ocasionando trechos ricos em resina o que pode reduzir a resistência do laminado em 60 %, comparados com os outros tipos de tecidos.

Os tecidos podem apresentar tramas diversas, que terão características diferentes. O tipo de trama irá influenciar na facilidade de impregnação e a facilidade de acomodar o tecido as curvas das fôrmas. Em geral a trama balanceada é a mais utilizada, cada direção possui a mesma quantidade de fios por metro quadrado. O que não é garantia de resistência igual nos dois sentidos. A Figura 4.7 mostra a variação das características mecânicas relacionadas com a direção das fibras, para tecidos comparados às mantas. Os tecidos apresentam resistência à tração e módulo de elasticidade maior no sentido da trama e da urdidura. Na direção a 45°apresentam as menores resistências e módulo de elasticidade As mantas apresentam resistência à tração e módulo de elasticidade inferior aos tecidos porém com valores constantes em todas as direções.

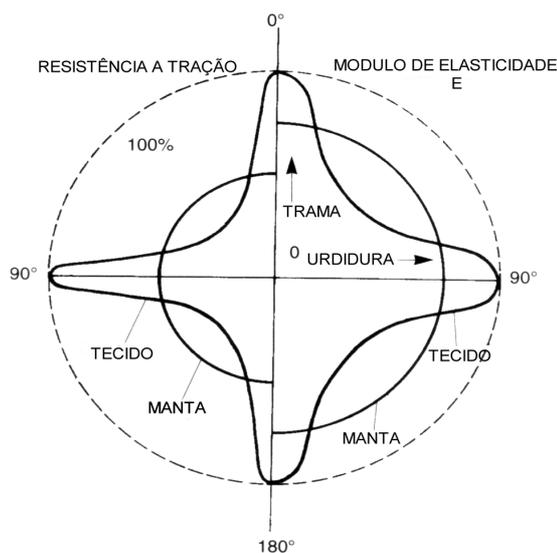


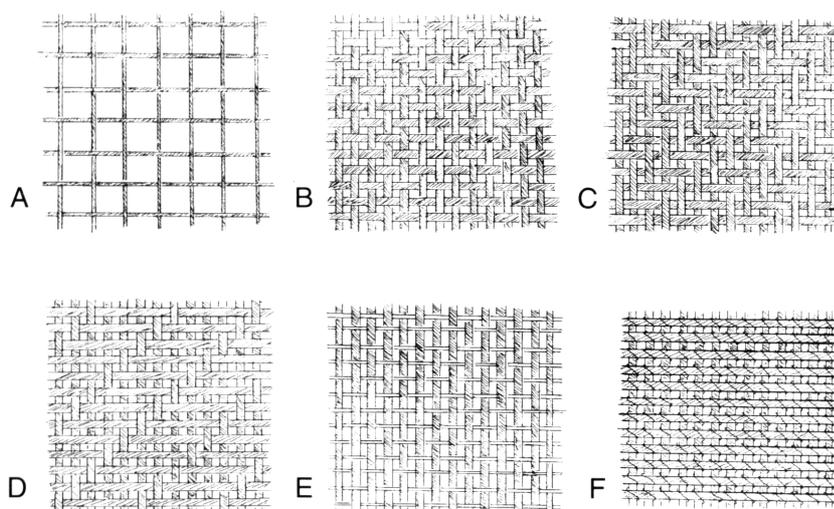
Figura: 4.7 Esquema comparativo das características mecânicas dos tecidos de trama balanceada e mantas.

Fonte Du Plessis (1996) traduzido pelo autor.

Os tecidos podem apresentar variação na quantidade de fios em cada direção variando de 30 % a 70 % . Sendo considerado unidirecional quando 70 % dos fios forem colocados em uma mesma direção. Estes tecidos são fabricados na largura de 1,25m e em fitas de 2,5cm a 5cm de largura. Nos tecidos não balanceados a abertura entre cabos influencia a laminação, pois se forem muito frouxos possibilitarão a ocorrência de buracos no momento da laminação, segundo Nasseh (2000).

A trama pode ser do tipo: plana, sarja, leno. A trama plana é aquela em que os fios ou mechas cruzam-se alternadamente. Este tipo de trama pode ser de cabos retorcidos, ou de cabos planos, ou de retorcidos em uma direção e plano em outra. Uma variante da trama plana é a trama basket, na qual dois cabos são trançados ao mesmo tempo gerando uma trama plana.

A Figura 4.8 mostra as diversas configurações de tramas de tecidos.



- A – Tecido de malha aberta.
- B – Tecido Plano.
- C – tecido tipo sarja com fio duplo na trama e duplo e na urdidura.
- D - Tecido tipo cetim, onde sobrepõe quatro fios sobre um podendo variar esta configuração.
- E – Unidirecional.
- F – Tecido não trançado bidirecional.

Figura: 4.8 Configurações das diversos tipos de tramas.

Fonte Du Plessis (1996).

Outro tipo de trama é a sarja, no qual cada fio cruza mais de uma vez chegando a oito vezes. A trama na qual o fio cruza duas vezes é denominada de twill, se o fio cruza três ou quatro vezes denomina-se de crowfoot, se os fios se cruzam cinco ou mais vezes, a trama é denominada satin. Um tipo de trama na qual os fios são retorcidos a fim de estabilizar o tecido, denomina-se *leno* este tipo de trama tem a característica de ser aberta.

4.3.5 Tecidos não tramados (PREFORMA)

Uma categoria de tecido que na verdade não são tecidos, são os tecidos não tramados, nos quais as fibras dispostas em uma determinada direção são fixadas através de colagem ou outros processos industriais. Estes tecidos apresentam a

vantagem de serem facilmente impregnados e não apresentam o inconveniente do processo de tecelagem. Esta configuração apresenta característica unidirecional.

Estes tecidos podem ser utilizados em camadas orientadas de acordo com as solicitações mecânicas dando origem a um laminado de reduzida espessura e alto teor de fibras. Estas camadas são ligadas por fio de poliéster fino ou fibras. O uso destes fios ou fibras ajuda a resistir aos esforços de cisalhamento interlaminar. A Figura 4.9 mostra a maneira como são costurados.

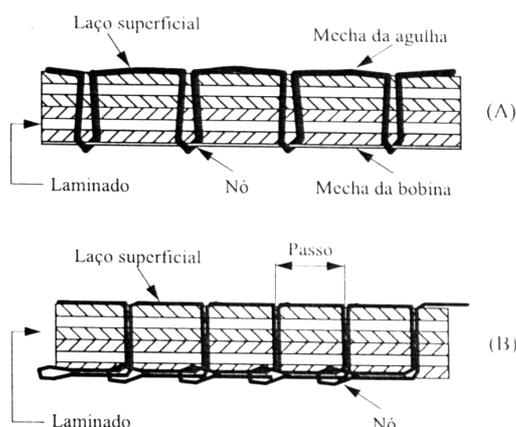


Figura: 4.9 Costuras usadas em preformas; A - tipo trava, B - tipo corrente.

Fonte: Pardini (2000).

Os tecidos não tramados podem ser fabricados nas seguintes categorias: biaxiais, triaxiais, e os quadriaxiais. Estes tecidos são compostos por tecidos uniaxiais justapostos em camadas nos ângulos de 0° , 90° , ou 0° , 45° , no caso dos biaxiais. Os laminados com tecido biaxial apresentam resistência superior a 40% aos woven roving e peso 25% menor. Os triaxiais nos ângulos de 0° , -45° , 45° , no caso dos quadriaxiais, 0° , 90° , 45° , -45° .

Estes materiais apresentam a vantagem de não serem tramados, reduzindo o atrito entre fibras e estarem alinhados com as direções das solicitações mecânicas.

A Figura 4.10 e 4.11 mostra o esquema deste tipo de tecido não tramado.

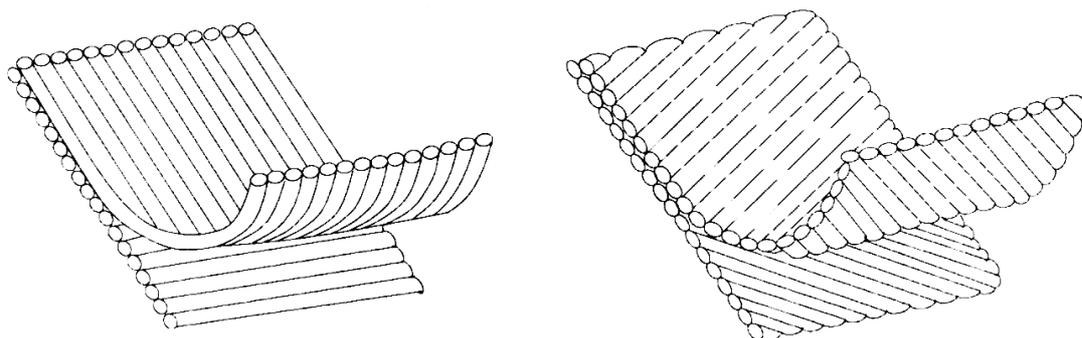


Figura 4.10 Esquema representativo do tecido biaxial.

Fonte: Nassed (2000).

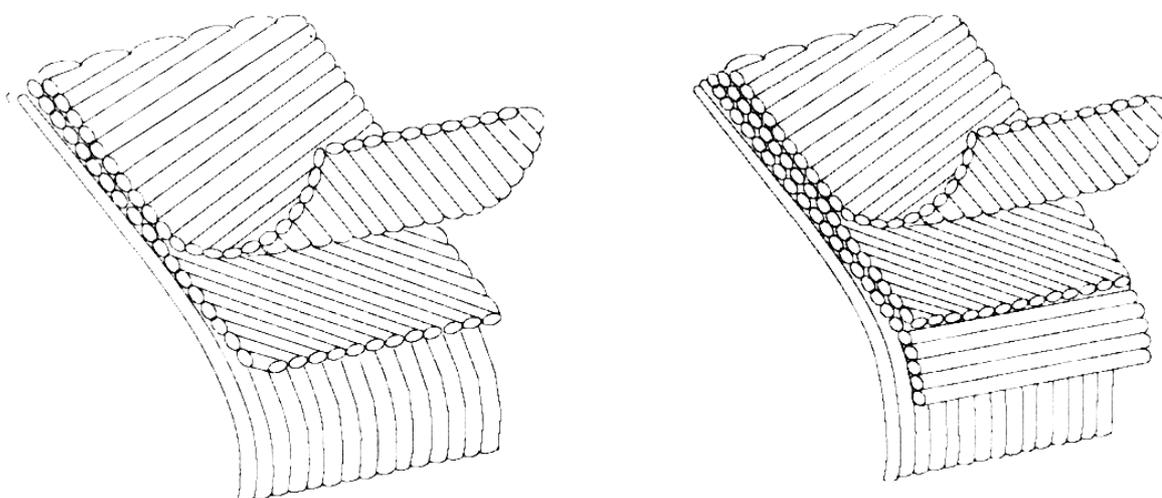


Figura 4.11 Esquema representativo dos tecidos triaxial e quadriaxial.

Fonte: Nassed (2000).

Estes tecidos podem ser fabricados com fibras de vidro, carbono ou aramida, sendo muito comum às configurações híbridas de baixa gramatura. São disponibilizadas gramaturas muito variadas que estão compreendidas entre 300 g/m² e 1800 g/m² e largura de 1,25m, 1,50m e fitas entre 25cm e 60cm de largura.

4.3.6 Tecidos híbridos

Com o objetivo de se obter melhores características nos laminados foram desenvolvidos tecidos híbridos, estes tecidos são uma associação de dois ou mais tipos de fibras a fim de se tirar proveito das características inerentes a cada tipo, buscando uma compensação para a deficiência que cada tipo de fibra apresenta.

4.3.7 Prepregs

Uma material de uso recente é o prepreg que é um tecido já impregnado com resina pré-catalisada. Os tecidos pré-impregnados são produzidos para cura em altas temperaturas e pressão. Estes tecidos podem ser produzidos com resinas epoxi, poliéster, estervinílicas e fenólicas. A impregnação é feita mecanicamente, o que garante um teor adequado de resina. Os prepregs são enrolados com filme plástico ou de papel encerado, conforme Figura 4.12. Apesar da pré-catalisação e pré-aceleração este material tem durabilidade de meses, quando estocado em câmaras refrigeradas e secas. O uso dos prepregs é facilitado devido ao fato de apresentarem pegajosidade superficial, suficiente para sua fixação. O trabalho com os pré-impregnados apresenta vantagem pelo fato de garantir controle do teor de resina e ser um trabalho limpo, porém possui o inconveniente de necessitar do uso de pressão e temperatura para sua cura. Há materiais que precisam de temperatura em torno de 80° C. Há uma tendência destes limites de temperatura abaixarem, o que facilitaria sua utilização.

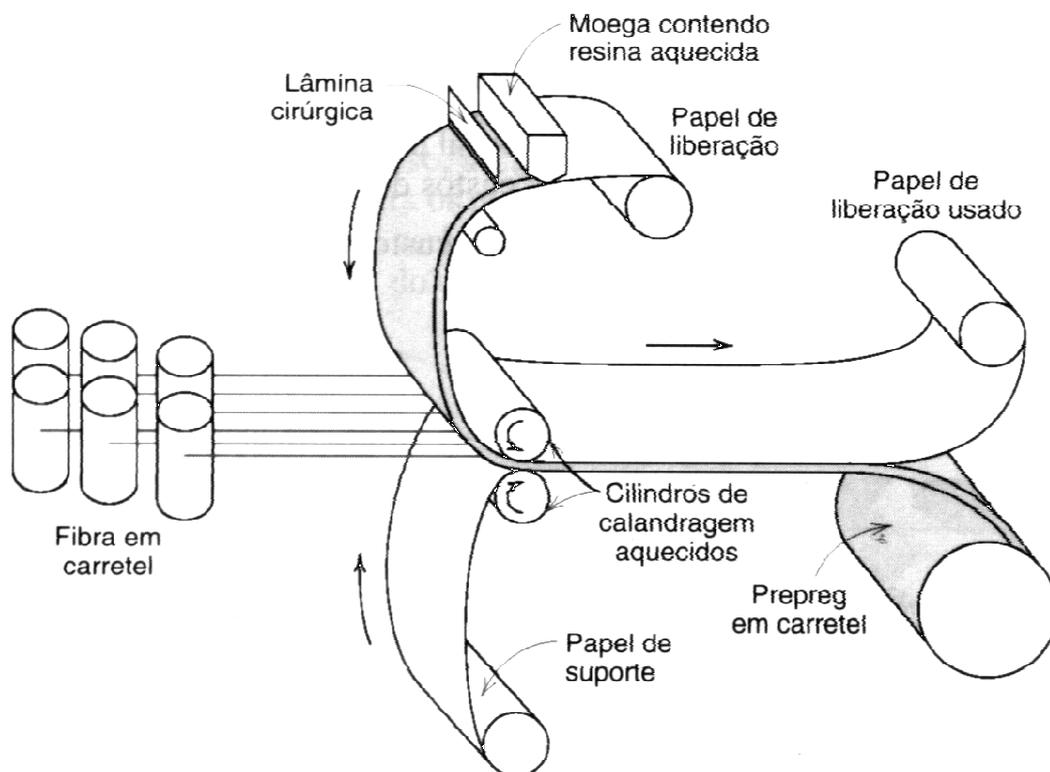


Figura: 4.12 Esquema de produção de um prepreg.

Fonte Callister 2000.

4.3.8 Tecidos tridimensionais e quadridimensionais

Esta categoria de tecido vem da necessidade de se evitar um efeito indesejado advindo da maneira como é produzido o compósito, através da superposição de camadas. Estas camadas tendem a se separarem quando solicitadas mecanicamente. Alguns fabricantes têm produzido tecidos tridimensionais, nos quais as fibras estão dispostas nos três eixos cartesianos, X,Y, Z. São trançadas fibras entre dois tecidos produzindo uma interligação e enchimento. A Foto 4.2 mostra o aspecto deste material. A figura 4.13 mostra o esquema de tecidos tridimensionais manufaturado com varetas de fibra de carbono.

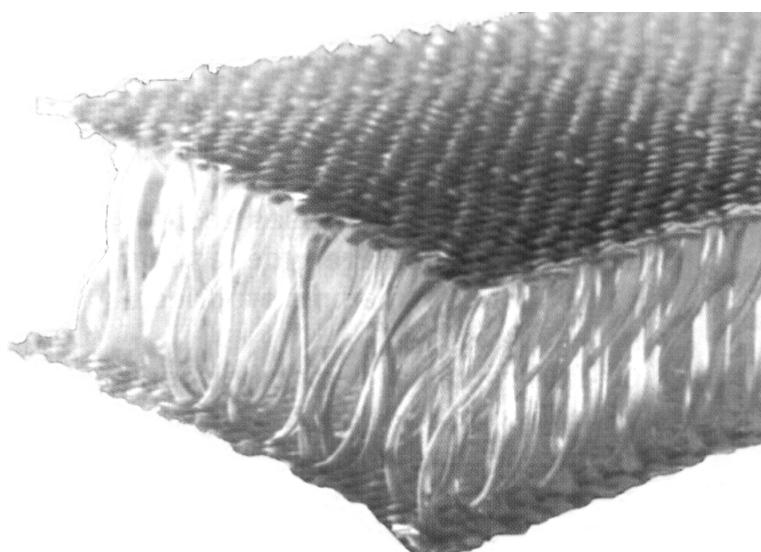


Foto 4.2 Tecido tridimensional.

Fonte: Revista do Plástico Reforçado (2000).

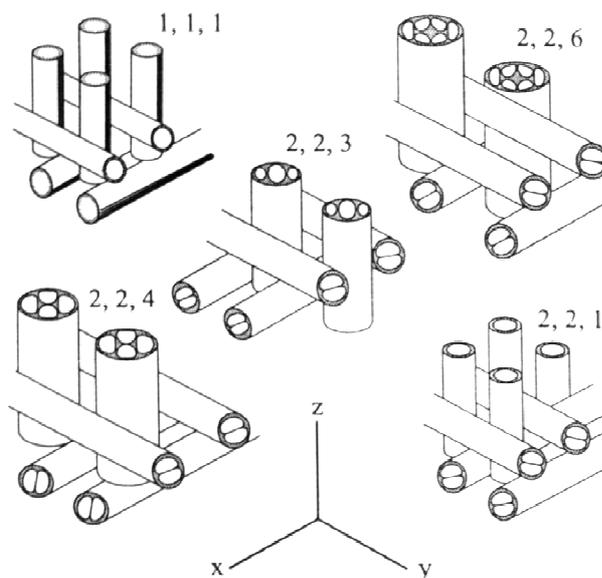


Figura 4.13 Esquema do tecido tridimensional manufacturado com varetas.

Fonte: Pardine (2000).

Ocorrem situações em que há a necessidade do uso de tecidos que apresentem reforço em quatro dimensões. As fibras destes tecidos são orientadas nas direções da diagonal do cubo. Para tal configuração os cabos são unidos em varetas por meio do processo de pultrusão. A Figura 4.14 (A) e (B) mostram esta configuração em corte e perspectiva.

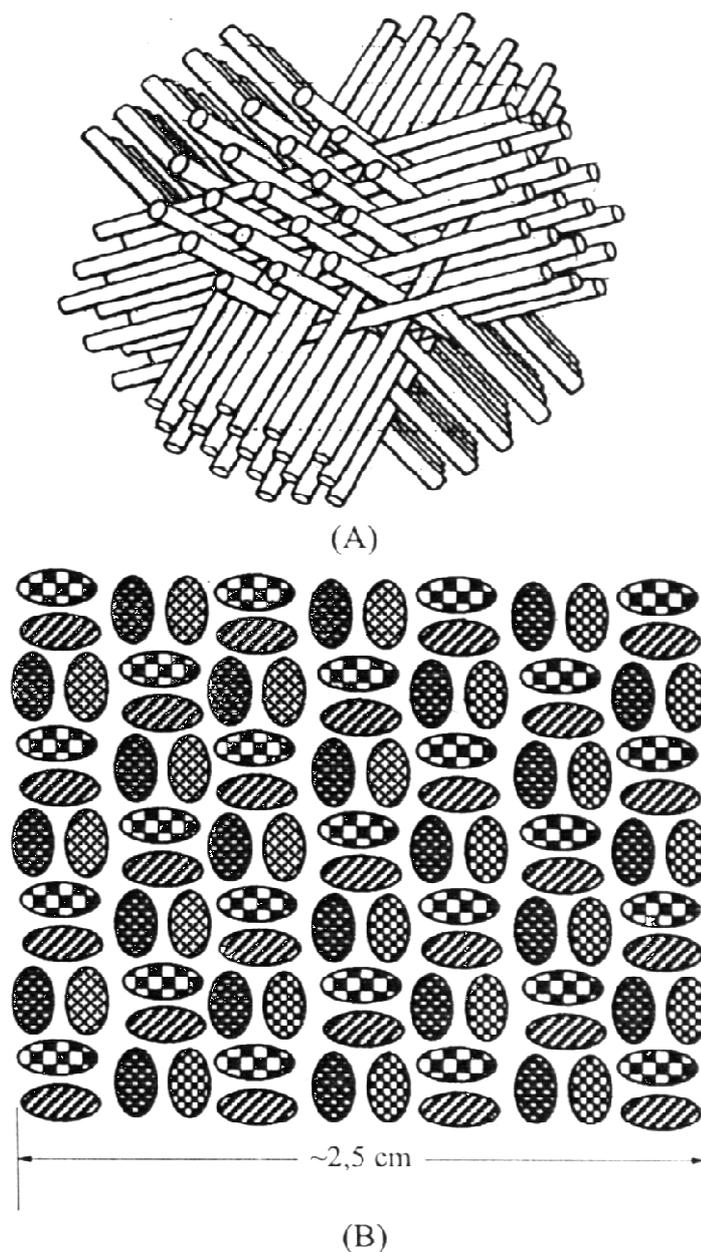


Figura 4.14 (A) Orientação do tecido quadridimensional / 4.14 (B) Corte do mesmo.
Fonte: Pardine (2000).

As configurações do reforço são muito variadas, sendo a sua escolha em função das solicitações e dos materiais disponíveis. As mais comuns foram estudadas neste trabalho. Para efeito de ilustração a Figura 4.15 mostra outras possibilidades de configurações.

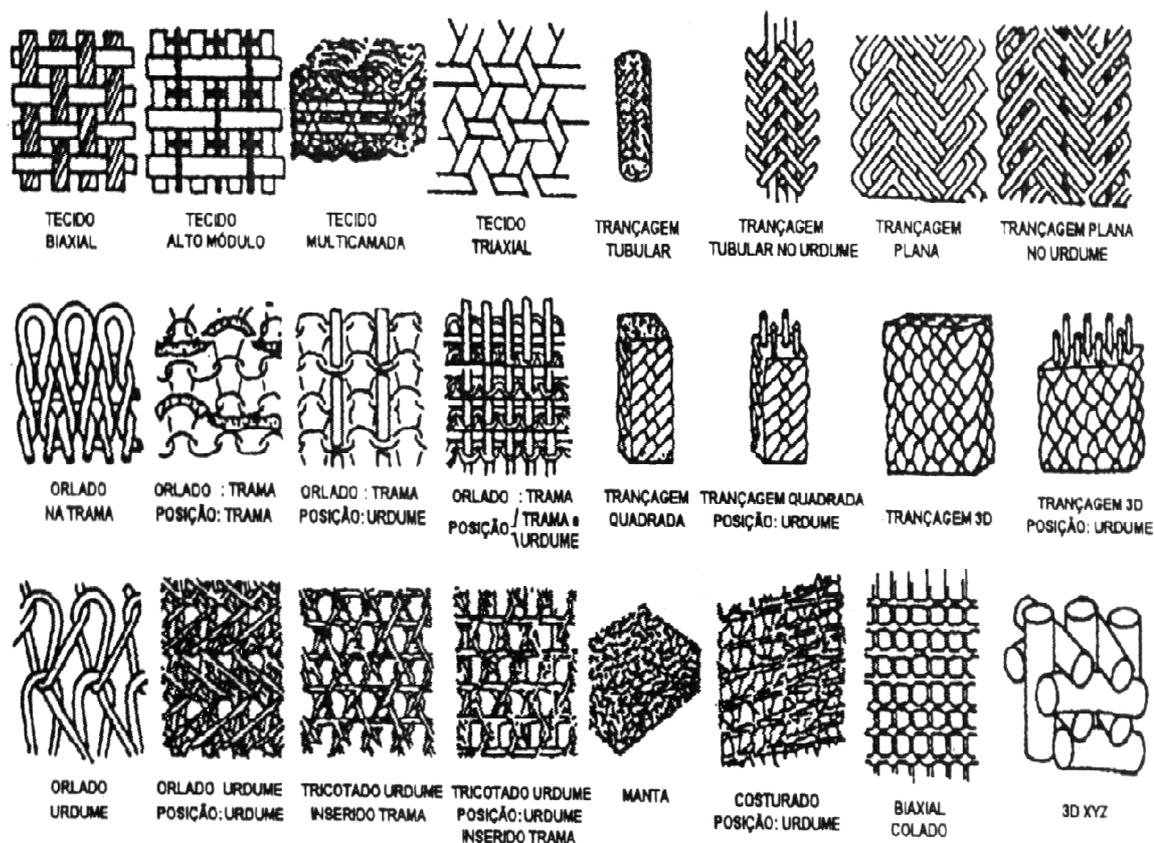


Figura: 4.15 Diversas configurações de reforço.

Fonte Pardini (2000).

4.3.9 Complexos de fibras

São produtos constituídos por camadas de mantas e tecidos, mantas com véu, e manta com miolo de termoplástico, que têm o objetivo de aumentar a produtividade, com economia de mão de obra e melhores característica mecânicas, em peças espessas. Estes materiais podem ser usados em processo de laminação manual, e automatizada.

5 MATERIAIS DE ENCHIMENTO

5.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Os materiais compósitos apesar das excelentes características mecânicas apresentam o inconveniente de precisarem de grandes espessuras para alcançar rigidez, o que os torna pesados e de custo elevado. As formas adequadas e o uso de nervuras em forma de “U” nos laminados melhoram esta característica. Porém estes reforços vêm dificultar a execução, aumentando a mão de obra, o tempo de execução do serviço e o peso das peças.

Com a intenção de aumentar a rigidez dos laminados sem aumentar significativamente o peso da peça, com um custo relativamente baixo, foram desenvolvidas peças tipo sanduíche, que usam os princípios já conhecidos e já utilizados nos perfis metálicos, de que extraindo parte da seção de uma peça se pode reduzir o seu peso sem a perda de rigidez.

Estes princípios foram aplicados aos compósitos, porém a alma utilizada nos perfis foi substituída por um núcleo de material pouco denso envolto por duas camadas de laminados finos.

Apesar do acréscimo da espessura, peso e preço do laminado, esta configuração veio solucionar a falta de rigidez e facilitar a construção, que se considerados os benefícios são positivos. A Figura 5.1 apresenta os comparativos entre espessura e o aumento de rigidez com a inclusão de núcleos de espessuras diversas.

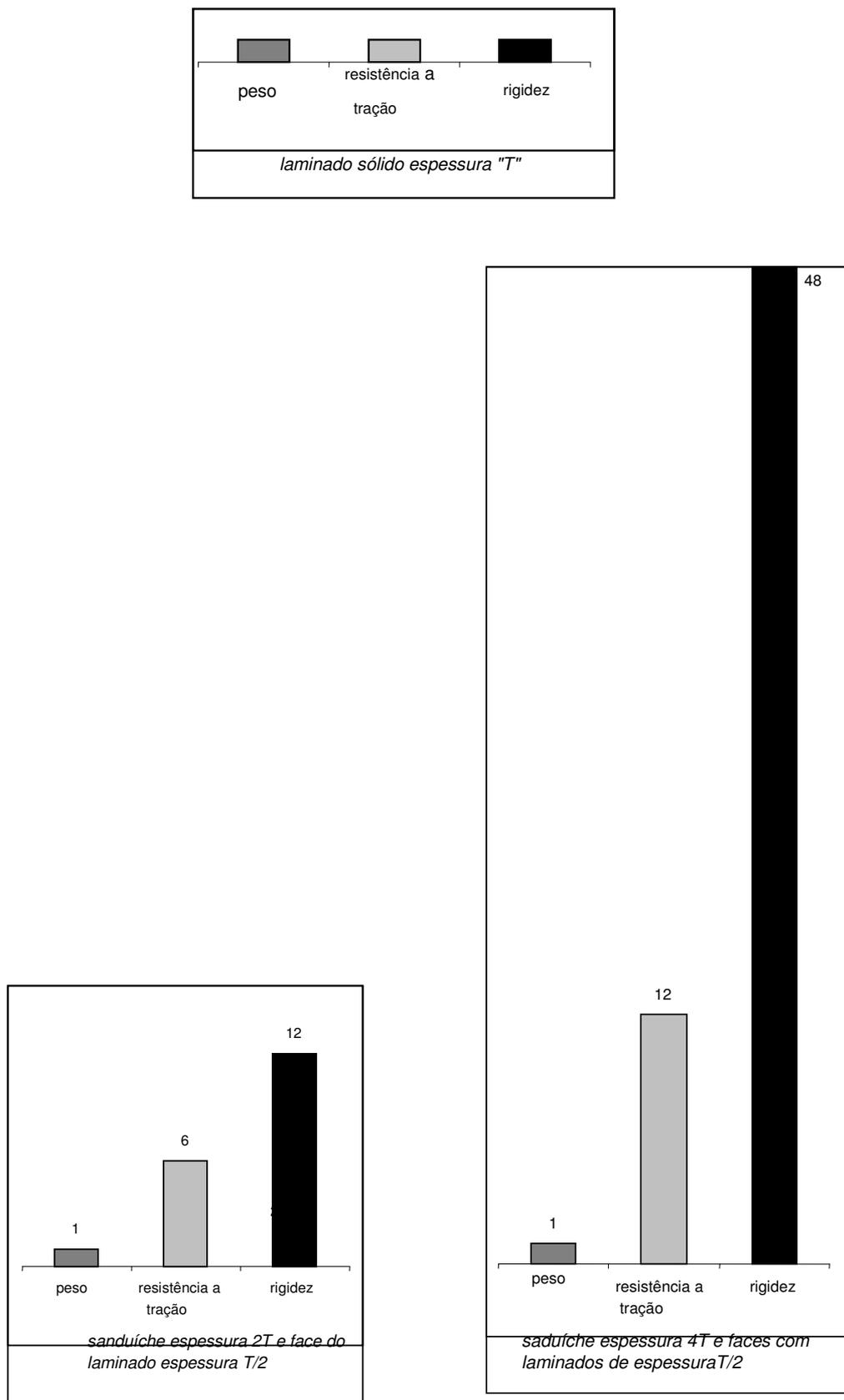
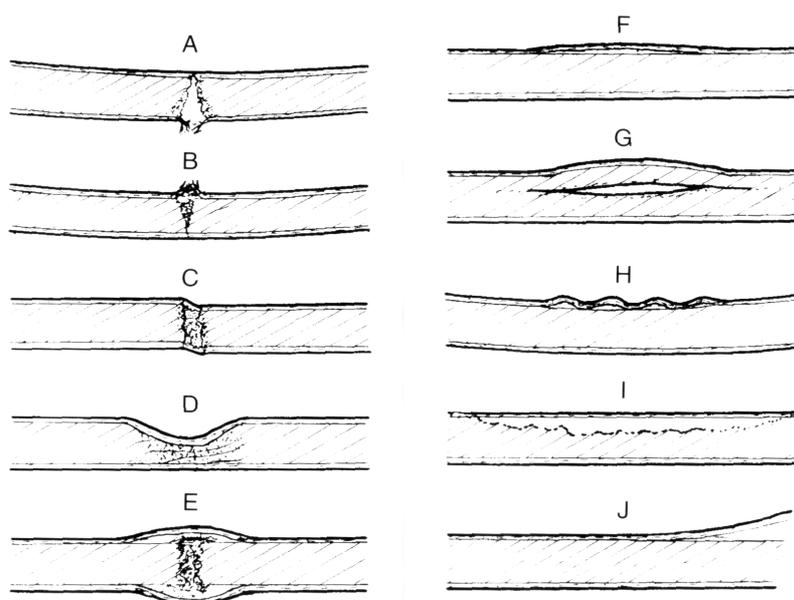


Figura 5.1 Comparativa de rigidez obtido com o uso de núcleo sanduíche.
 Fonte O autor adaptado de Nassed (2000).

As lâminas de compósito resistem às tensões de tração e compressão em faces opostas, oriundas da flexão. As faces devem ter espessura suficiente para resistir a flambagem e aos impactos.

A Figura 5.2 apresenta as maneiras como se comportam os laminados tipo sanduíche submetidos a esforços variados.



- A – Ruptura da face, a tração. F – Falência na adesão em peça sujeita a flexão.
- B – Ruptura a compressão de face, em peça sujeita a flexão. G – Fendilhamento do núcleo
- C – Cisalhamento. H – Enrugamento do laminado
- D – Ruptura de enchimento. I – Desintegração do enchimento com carga do concentrada ou impacto.
- E – Compressão axial nas bordas. J – Delaminação na borda

Figura 5.2 Comportamento do enchimento sobre cargas diversas.

Fonte: Du Plessis (1996)

Os esforços aplicados às peças com núcleo devem ser distribuídos para não provocar falência do material. Quando as solicitações são concentradas pode ocorrer o puncionamento do material provocando um dano concentrado, como mostra a Figura 5.3.

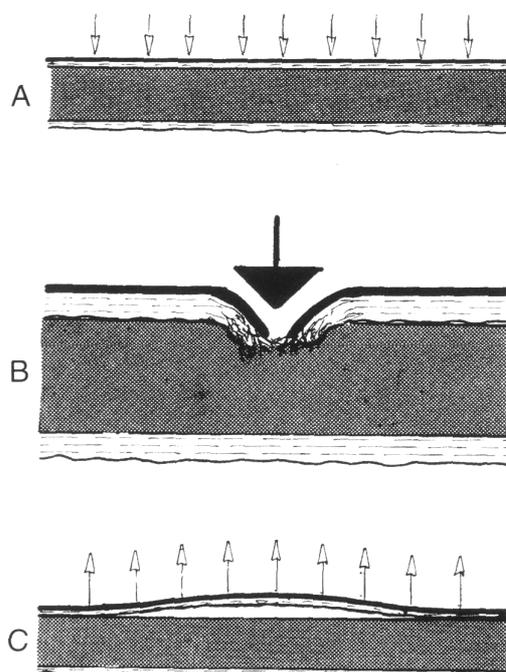


Figura 5.3 Danos típicos de materiais compósitos com enchimento.

Fonte Du Plessis, (1996).

Para resistirem às solicitações, as faces devem manter a sua posição original, o que é garantido pelo núcleo ao evitar que estas se deformem. Levando-se em consideração o exposto acima, os materiais destinados ao núcleo de um compósito devem apresentar uma série de características mecânicas, tais como: resistência à compressão, para evitar que as duas faces do laminado se aproximem e resistência ao cisalhamento, para que não haja deslizamento das faces dos laminados deixando de ser um corpo único.

O núcleo deve possuir baixa densidade, senão o seu uso seria desinteressante, vários materiais são utilizados para este fim, cada um apresenta vantagens e desvantagens a serem consideradas quando na etapa de projeto.

5.2 CARACTERÍSTICAS E TIPOS DE NÚCLEOS E ADESIVOS.

Os materiais usados em núcleos apresentam características variadas. Acontece de um mesmo material apresentar características mecânicas diversas em função da densidade.

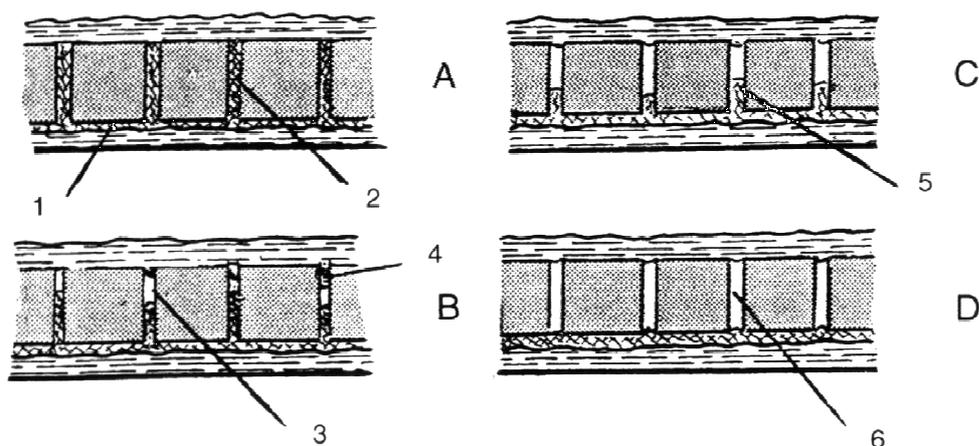
O material para núcleo deve possuir como características: leveza, resistência a compressão, resistência ao cisalhamento. O material para enchimento não deve

ser: friável (esfarelar-se com facilidade), quebradiço (evitando assim a delaminação sob impacto). Deve apresentar facilidade de colagem com adesivo ou resina de laminação, resistência à fadiga, corrosão e aos efeitos ambientais, resistir a fungos e a água, principalmente não absorver e reter água.

O material usado para adesão ao laminado deve ser compatível com o tipo de resina e material do núcleo, alguns materiais sanduíche são atacados por adesivos e solventes, quando expostos a estes e a altas temperaturas, durante a cura das resinas, apresentar boa aderência com os materiais do núcleo e do laminado, resistir ao cisalhamento, evitando delaminação e possibilitar a transferência das cargas. Os laminados sanduíche, quando sujeitos a solicitações, devem romper os núcleos antes do adesivo.

Os laminado tipo sanduíche apresenta além do aumento da resistência, a vantagem de serem isolantes termo-acústico, não necessitam de elementos de reforço estrutural e em caso de aplicações navais flutuabilidade positiva.

A adesão ideal ocorre quando as juntas do enchimento são completamente preenchidas com adesivo, porém é difícil de se conseguir sendo possível com o processo Vacuum bagging. Em geral não ocorre o preenchimento destas juntas, sendo adotada por alguns construtores a opção de não preencher estes espaços, ver detalhes Figura 5.4.



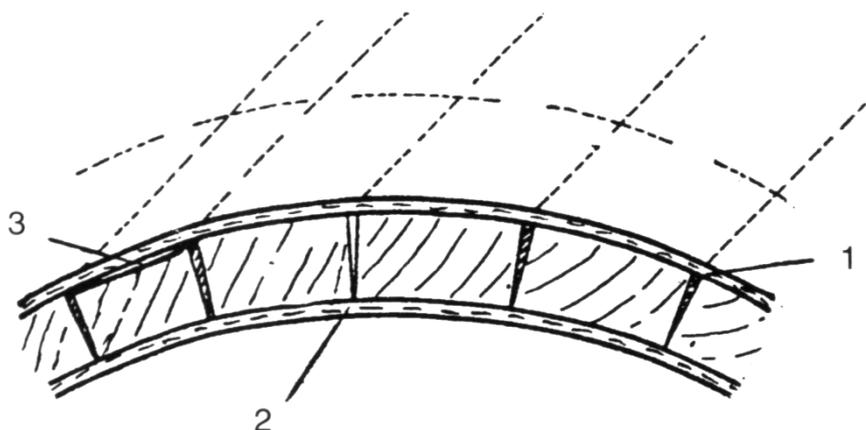
- A – totalmente preenchido com adesivo 1, 2.
- B – Peça com alguns vazios 3, resina penetrando no vazio com uso de vácuo.

- C – Peça a qual não foi aplicado vácuo.
- D – Peça sem preenchimento dos vazios.

Figura 5.4 Falhas na adesão.

Fonte: Du Plessis (1996).

Em peças curvas a aplicação do núcleo sanduíche esta sujeita a algumas falhas, sendo as mais comuns a falta de preenchimento entre os intervalos da espuma, falta de aderência entre o laminado e o núcleo e excesso de adesivo que aumenta o peso da peça. Na Figura 5.5 têm-se estes defeitos.



1. Adesivo.
2. Laminado.
3. Falha na interface laminado / enchimento.

Figura 5.5 Defeitos na aplicação de núcleo em peças curvas.

Fonte: Du plessis (1996).

5.3 NÚCLEO DE MADEIRA

A madeira balsa é a mais usada como núcleo sanduíche, devido a sua baixa densidade e o baixo custo.

A balsa é originária de florestas tropicais da América do Sul, sendo o Equador o maior produtor.

A madeira balsa possui resistência a compressão e ao cisalhamento, porém está sujeita ao encharcamento quando exposta a água. Com o objetivo de melhorar suas características mecânicas, passou-se a ser utilizada em cortes de topo, esta forma de corte reduz a absorção de água. As toras que apresentam diâmetro pequeno são cortadas em sarrafos de 4cm x 4cm coladas em blocos de 1 m³. A partir destes blocos são cortadas lâminas que apresentam formato de tabuleiro de xadrez. Com esta solução consegue-se obter uma maior uniformidade de sua densidade, já que as árvores variam de densidade entre 180 a 320kg/m³. A resistência do laminado é proporcional à densidade da placa. Materiais com menor densidade na faixa de 80 a 100kg/m³ são obtidos, porém, são difíceis de serem encontrados e quando são encontradas apresentam custo proibitivo.

Uma característica da madeira balsa é a facilidade de absorção de resina de laminação e de adesão, o que ocasiona um aumento indesejável de peso.

A madeira balsa pode ser fornecida em placas rígidas ou em placas formadas por quadrados colados a uma tela de fibra de vidro, que facilitam a adaptação a formas curvas dos moldes. Se considerar a relação resistência ao cisalhamento / densidade, o seu uso em certas aplicações é desaconselhado.

Devido à porosidade da madeira balsa, no momento da laminação pode ocorrer absorção de resina, principalmente em placas flexíveis, nas quais são usadas as colas ou as resinas para calafetar os espaços vazios entre os blocos. Um outro problema é a absorção dos gases de monômero da resina pelos poros da madeira, o que acarreta uma camada de adesão mal curada, que no futuro poderá ocasionar delaminação. Alguns construtores aplicam uma camada de resina com gelificação curta para selar a superfície. Deve-se considerar que este procedimento acarreta um aumento do custo do laminado. Existem fabricantes que produzem placas com camada selante feitas com resinas fotos-curadas. Outro fator que prejudica o resultado da colagem é a presença de umidade absorvida pela madeira, que inibe a cura da resina. A madeira balsa segundo Du Plessis (1996) quando exposta ao tempo e a umidade, se desintegra. A madeira balsa é bom material isolante térmico e resiste bem às elevadas temperaturas.

5.4 NÚCLEO DE ESPUMA

As espumas são uma categoria de materiais que apresentam baixa densidade e características específicas que podem ser favoráveis ou desfavoráveis as suas utilizações, serão analisadas a seguir estas características para cada tipo.

5.4.1 Núcleo de espuma de poliuretano

A espuma rígida de poliuretano é um material friável principalmente em baixa densidade, desintegra-se com facilidade e apresenta baixa resistência à compressão e ao cisalhamento. Não absorve bem o impacto. Sua densidade varia na faixa de 30 a 100kg/m³. Devido apresentar células abertas, seu coeficiente de absorção de água é elevado, sendo em alguns casos até seis vezes seu peso, segundo Nasseh (2000). Os usos dos CFC em sua fabricação tornam sua produção ambientalmente desaconselhável, apesar de já se ter notícias da utilização de produtos menos agressivos ao ambiente. As espumas são fornecidas em placas e em forma líquida para expansão no local. A grande vantagem da espuma de poliuretano é o seu baixo custo.

5.4.2 Núcleo de espuma fenólica

De custo equiparado à espuma de poliuretano, a espuma fenólica apresenta características semelhantes à espuma de poliuretano porém necessita de ser selada com resina epóxi para sua utilização, devido ao fato deste material ser degradado pelo monômero de estireno.

5.4.3 Núcleo de espuma de poliéster

A espuma de poliéster possui melhor resistência, que o poliuretano, era fabricada com gás Freon (CFC), porém na atualidade passou-se a utilizar o gás carbônico, o que causou um aumento no seu custo. Sua aplicação esta voltada para interiores sem compromisso estrutural e em peças de reforço, em locais de concentração de cargas de compressão, na densidade de 160kg/m³. As espumas de poliéster podem ser fabricadas nas densidades de 30kg/m³ até 600kg/m³.

5.4.4 Núcleo de espuma de poliestireno

A espuma de poliestireno apresenta densidade menor que o poliuretano e o poliéster e custo menor. Apresenta bom isolamento térmico. Suas propriedades mecânicas não são favoráveis a sua utilização como material sanduíche, além de ser atacada pela resina e pelo calor da reação exotérmica da cura. Para poder ser utilizada esta espuma deve ser isolada com resina epóxi ou confinada entre duas camadas finas de espuma de PVC.

5.4.5 Núcleo de espuma de PVC

A espuma de PVC pode ser fabricada em duas categorias, a semi-rígida e a flexível. A espuma de PVC flexível (linear), apresenta baixa resistência as resinas de poliéster e a temperaturas superiores a 45 °C, sendo seu uso cada vez mais restrito em áreas de grande deformação. A característica de deformarem-se excessivamente acarreta deflexões elevadas, causando ruína do laminado, não funcionando o laminado como um sanduíche. A outra categoria de espuma é a semi-rígida (cross linked), esta espuma foi a primeira espuma de plástico produzida, desenvolvida na Alemanha durante a Segunda Guerra Mundial, comercialmente denominada de *Klegecell*® e *Divinycell*®. Estas espumas apresentam elevada resistência a compressão e em algumas densidades apresentam deformação ao cisalhamento de até 40%, podendo chegar a suportar temperaturas na faixa de -200 a 84°C e resistem a produtos químicos. Estas espumas possuem as células fechadas, portanto não absorvendo água.

A espuma de PVC semi-rígida é produzida a partir de uma mistura de resinas, colocadas em formas metálicas submetidas à elevada pressão e temperatura, para se processar a expansão, através de vapor d'água, a cura ocorre em ambiente climatizado e estabilizado termicamente. Este processo de acordo com a densidade demora de três a quatro semanas podendo em caso de maior densidade chegar a oito semanas.

As espumas de PVC são fabricadas nas densidades de 45 a 250kg/m³, sendo cada densidade associada a uma cor. A de 45kg/m³, cor azul, a de 60kg/m³, cor verde, a de 80kg/m³, cor cinza e outras.

As espumas de PVC são fabricadas nas espessuras de 3 a 75mm em forma de chapas planas ou chapas composta de blocos de 40mm x 40mm colados sobre tela de fibra de vidro, conforme mostra a Figura 5.6. Estas espumas podem apresentar cortes designados por letras: DC, GSN, GSNS, ou GSH. Também podem ser fornecidas em ripas, tábuas, ou perfis (Nasseh 2000).

Estas espumas semi-rígidas são denominadas de série H, existe uma série denominada de série HPC (hydraulic crush point), para aplicações em grandes profundidades devido a alta resistência a compressão e uma outra categoria denominada HT (high temperature), utilizadas em peças para industria aeronáutica fabricadas em autoclave.

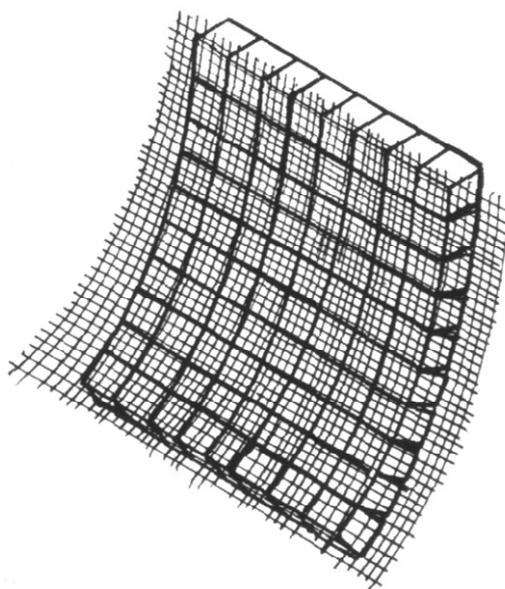


Figura 5.6 Espuma de PVC em blocos colado sobre tela.

Fonte: Du Plessis, 1996.

Uma categoria bastante em uso é o IMS para ser pós-curada a temperaturas de 100°C, que é produzida nas densidades de 80kg/m³ e 100kg/m³.

Quando a peça está sujeita a grandes deformações, a categoria HD (high ductility) é indicada pelo fato de apresentar deformação semelhante à espuma flexível, porém com alta resistência à compressão, cisalhamento e a temperaturas. Seu uso é adequado a locais sujeitos a impactos.

5.5 NÚCLEO TIPO COLMÉIA (HONEYCOMB)

Os núcleos tipo colméia apresentam características mecânicas de resistência à compressão e ao cisalhamento superiores a outros materiais de mesma densidade.

Este material é composto de células interligadas formadas por material fino lembrando os favos de mel. O material das células podem ser de: FRP (plástico reforçado com fibras), alumínio, aço, aço inoxidável, polietileno e papelão. Na Foto 5.1 tem-se o aspecto das colméias.

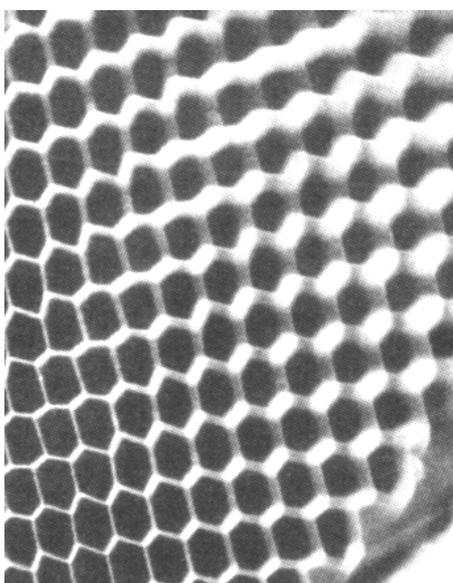


Foto 5.1 Aspecto do núcleo de enchimento tipo colméia de fibra aramida.

Fonte: Nasseh (2000).

O uso de colméia apresenta algumas peculiaridades construtivas, devido à pequena área de contato, a colagem da colméia no laminado, faz-se necessita que sejam aplicados pesos, a fim de garantir o contato entre a colméia e laminado, uma outra opção é a utilização de vácuo. Na segunda camada de laminado, não é possível laminar sobre a colméia da mesma maneira que nas espumas, devido ao fato da resina escorrer e se acumular nos alvéolos. Portanto é necessário o uso de dois moldes rígidos nos quais foram laminadas as faces, as quais aplica-se adesivo e procede-se à prensagem da colméia. Esta solução é bastante cara sendo viável apenas em algumas aplicações industriais, como aeroespacial. Um outro recurso usado é a aplicação de painéis prepegs, este material é curado sob calor e pressão o que evita que haja um excesso de adesivo, que escorreria para as paredes das colméias.

O adesivo utilizado para a colagem da colméia deve ser compatível com a colméia usada e a resina de laminação.

Na figura 5.7 tem-se o esquema de um laminado com núcleo de colméia

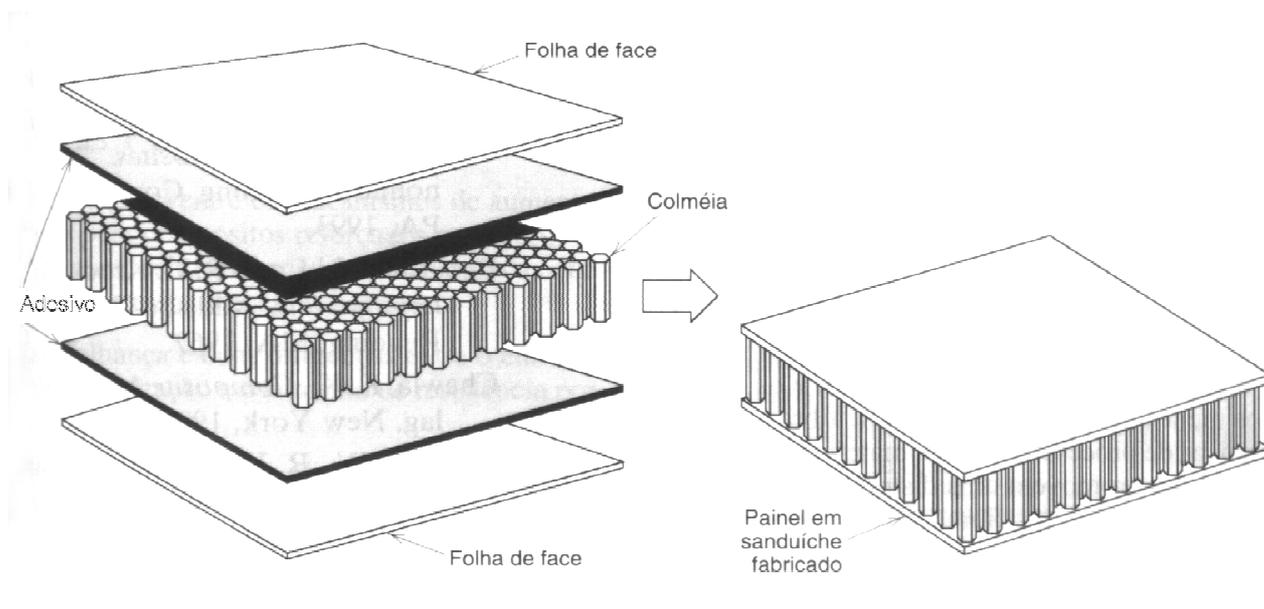


Figura 5.7 Laminado com enchimento de colméia explodido e montado.

Fonte: Callister (2000).

As colméias de papel apresentam menor rigidez e estão disponíveis em baixas densidades, apresentam baixas propriedades mecânicas, sua utilização é restrita a locais abrigados.

As colméias de alumínio têm boa resistência à compressão, ao cisalhamento, e rigidez, porém apresenta maior densidade e não possuem boa resistência ao impacto e a fadiga. Em ambiente agressivo, estão sujeitas à corrosão.

A colméia de fibras aramida apresenta excelentes propriedades mecânicas, baixa densidade, resistência ao impacto e a fadiga. Este material é resistente ao fogo, isolante térmico e acústico, e tem como temperatura limite de trabalho 150°C.

As colméias de tecido de vidro podem ser planas ou orientadas a $\pm 45^\circ$, esta orientação favorece a resistência ao cisalhamento. Estas colméias são produzidas em diversas densidades e tipos apresentando porém maior densidade que as colméias de aramida. Há uma redução em suas propriedades mecânicas quando submetidas a temperaturas superiores a 40°C.

As resinas de colagem para as colméias devem apresentar viscosidade suficiente para molhar as faces de adesão sem escorrer para as paredes das células e apresentando um tempo de gel curto.

As colméias são fornecidas em diversas espessuras e com dimensões de células e densidade variadas, o que oferece aos projetistas uma gama variada de propriedades mecânicas.

6 CARGAS E ADITIVOS

As cargas modificam as características da matriz, melhorando sua propriedade em função do tipo de aplicação a que se destinam, segundo Carvalho (1992).

Em virtude das pesquisas e do desenvolvimento industrial as cargas que tinham a função de baratear custos e enchimento, passaram a serem encaradas como benéficas agregando outros valores que conduziram a um segundo plano a premissa anterior.

As cargas produzem benefícios ao produto final, melhorando propriedades mecânicas, térmicas, óticas, dielétricas, tixotrópicas e físicas.

Para a adequada seleção das cargas em compósitos deve-se levar em conta a sua natureza química, textura, forma das partículas, distribuição granulométrica, estrutura cristalina e reatividade química. Não só as características do produto final, devem ser analisadas, também há de se considerar, o desgaste dos equipamentos, produtividade e consumo de energia. Estes fatores podem ter grande influência nos parâmetros de decisão, segundo Castilho (2000).

Devido às dificuldades encontradas em anos de trabalho com compósitos, que resultaram prejuízos e descrédito no material. Foram desenvolvidos estudos e soluções industriais para os problemas. Estas soluções buscavam melhorar as características físicas, químicas mecânicas e de trabalhabilidade dos materiais. Dentre estas soluções encontram-se os aditivos para resinas. Estes produtos foram incorporados acrescentaram uma série de características, tais como: facilidade de umectação das fibras, melhora da viscosidade da resina, redução de emissão de estireno na atmosfera, redutor de ar incorporado, entre outras.

6.1 CARGAS MINERAIS INDUSTRIAIS.

Os materiais usados como carga apresentam vantagens e desvantagens em relação ao tipo de utilização a que se destina o produto acabado, sendo importante o prévio conhecimento de suas características, para que seja feita a devida escolha.

Alguns materiais utilizados como carga serão analisados a seguir.

- Agalmatolito (silicato de alumínio hidratado): é usado em grande escala como material de enchimento. Comparado ao caulim, produz maior aspereza, dureza e abrasividade. Possui menor grau de hidratação, possui menor quantidade de moléculas de água em seu reticulado cristalino. Este material tem origem mineralógica diferente do caulim. No mercado é denominado também mercado de pirofilita.
- Caulim (silicato de alumínio hidratado), apresenta melhor acabamento superficial que o anterior possui características dielétricas. É menos abrasivo e, portanto produz menos desgaste nos equipamentos. Possui elevada inércia quimicamente. Sua densidade aparente relativa baixa dá origem a materiais mais leves, se comparados aos que utilizaram carbonato de cálcio.
- Mica (hidrosilicato de alumínio): Apresenta estrutura cristalina lamelar é rico em sódio e potássio, melhora a condutividade térmica. Aumenta a resistência mecânica com flexibilidade. É estável quimicamente e produz ótimo acabamento superficial.
- Sílica precipitada (dióxido de silício): sua obtenção é através de processo químico. Apresenta baixa densidade, não aumentando a densidade do produto acabado. Devido sua grande área superficial, funciona como agente reforçante. É utilizado como fosqueante e agente tixotrópico.
- Diatomila (sílica amorfa natural): Devido a sua estrutura cristalina amorfa, apresenta alto grau abrasivo. Este material apresenta em sua composição de 94 a 95% de dióxido de silício de origem fóssil, sendo o restante composto de óxido de ferro, possui alta porosidade e baixa densidade. É utilizado como agente fosqueante e tixotrópico. Devido a suas características tem uso semelhante à sílica precipitada, porém, apresenta desempenho inferior, não sendo sua substituta em algumas aplicações específicas. Seu custo é a sexta parte da sílica precipitada.

- Quartzo (dióxido de silício natural): o quartzo é um dióxido de silício natural, que apresenta 99,8% de sílica. Tem como característica alto grau de dureza mecânica associada a um alto poder abrasivo. Sua utilização está direcionada a produtos nos quais se deseja inércia química associada à resistência a abrasão. É substituto das sílicas.
- Carbonato de cálcio
 1. Carbonato de cálcio precipitado: É sensível aos ácidos, possui características tixotrópicas, funciona como reforçante. A sua adição aos polímeros gera um produto de baixo peso específico. O acabamento superficial das peças é melhorado.
 2. Carbonato de cálcio natural calcita: devido ao seu baixo custo e propriedades de moderada abrasividade, e facilidade de incorporação, é a carga mais utilizada. É de fundamental importância a sua granulometria ao produto, que poderá afetar não só o acabamento superficial como também o desgaste do equipamento utilizado.
 3. Carbonato de cálcio natural dolomita: É um carbonato natural duplo de cálcio e magnésio, que apresenta maior resistência mecânica, devido a presença do magnésio, em comparação com a calcita. Devido às dimensões dos grãos serem menores e por apresentar menor absorção de óleo, há uma maior incorporação em relação a mesma viscosidade.
 4. Carbonato de cálcio natural cretácico: é um carbonato de cálcio fossilizado de natureza orgânico, originário do período cretácico, que apresenta grau de pureza elevado, devido a sua estrutura cristalina apresentar baixa abrasividade. Como carga melhora a resistência mecânica e proporciona melhor acabamento superficial nas peças.
- Talco (hidrossilicato de magnésio): O hidrossilicato apresenta coloração branca, cinza, amarelo, seu custo está relacionado a sua coloração. A sua adição ao polímero proporciona reforço, rigidez, dureza, propriedades isolantes e eleva a temperatura de distorção. Devido à característica de unção, proporciona lubrificação em alguns tipos de processamento. O talco apresenta alta inércia química, se comparados às cargas anteriormente descritas.

- Barita (sulfato de bário natural): Apresenta peso específico alto. Sua estrutura cristalina facilita menor dimensão para o produto, ocasionando maior poder de absorção de óleo. Esta característica possibilita maiores percentuais de mistura. Apresenta maior inércia química com relação aos anteriormente relacionados.
- Alumina tri-hidratada (hidróxido de alumínio): É substituto de algumas cargas minerais de uso comum, confere ao laminado, baixa flamabilidade, em virtude da capacidade de absorver calor. A alumina inibe a decomposição térmica do polímero, que se inicia a 230°C. Reduz a emissão de fumaça ao queimar, devido a capacidade de desidratação endotérmica, atuando na decomposição térmica do polímero e reduzindo a emissão de gases. Inibe o trilhamento em aplicações elétricas, devido a sua capacidade de absorver calor gerado pelo sistema. Tem maior poder de enchimento devido a sua densidade. Podem se apresentar na forma moída e supermoída, sendo a supermoída indicada para aplicações que se exija além do efeito fogo-retardante, acabamento e resistência mecânica (Gallo, 2000).

6.2 CARGAS LEVES

Determinadas aplicações, demandam um tipo de carga que seja leve e apresente como característica específica à facilidade de lixar. Estes materiais podem ser maciços ou ocos. Sendo que os ocos apresentam menor densidade, não aumentando de forma indesejável o peso da peça acabada.

6.2.1 Microesferas de vidro

As microesferas de vidro são produzidas a partir do vidro tipo C. As esferas são produzidas em tamanhos variados. Suas partículas apresentam dimensão de partícula entre 40 e 80 microns. As microesferas ocas apresentam a vantagem de produzir uma massa mais leve, portanto preferida em aplicações que este fator seja preponderante, sua densidade esta em torno de 230 g / dm³. Seu custo é inferior aos outros tipos de cargas de microesferas.

6.2.2 Microesferas fenólicas

Este material é produzido com resina fenólica. Apresentam o inconveniente de serem atacadas pelo monômero de estireno, sendo, portanto seu uso restrito a

resinas que apresentem baixo teor de monômero, sua utilização com resina epóxi é mais garantida. Suas partículas apresentam dimensões em torno de 5 microns e densidade em torno de 250 g/dm^3 . A coloração é avermelhada e deve ser estocada em local seco devido à facilidade de absorver umidade.

6.2.3 Microesferas plásticas

As microesferas plásticas são produzidas com termoplásticos. As massas produzidas com este material são facilmente lixadas e apresentam densidade inferior às de vidro e fenólicas, podendo chegar a 20% menos. O tamanho de suas partículas está na faixa de 50microns e sua densidade é de 75 g /dm^3 .

6.2.4 Sílica

Este material é uma sílica coloidal sintética produzida a partir do dióxido de silício, possui partículas menores que as microesferas ocas. Seus nomes comerciais são: Aerosil® e Carbosil®. Sua densidade é de 50 g / dm^3 . A sílica coloidal quando usada com outras cargas, aumenta a dificuldade de lixar. É adequada a massas que necessitem de resistência estrutural, é ideal para massa de colagem. A sílica coloidal quando adicionada à resina melhora sua tixotropia, possibilitando o uso de resinas em superfícies verticais, sem apresentar o inconveniente do escorrimento. Este material é usado em gel coat para melhorar a tixotropia.

6.3 ADITIVOS

Em função do aditivo usado na resina, algumas propriedades são incorporadas tais como: redução de bolhas de ar incorporadas, redução da viscosidade, redução da emissão de estireno, aumento do gel time, aumento da capacidade de incorporação de cargas, absorvente de ultravioleta, segundo Santos (2001).

6.3.1 Aditivos inibidores

As resinas de poliéster são poliésteres insaturados dissolvidos em monômeros vinílico. Estas resinas devido à ação da temperatura, luz ou de peróxidos, têm a facilidade de produzir radicais livres. Os radicais livres reagem com as insaturações,

procedendo à interligação das cadeias. Esta interligação endurece a resina. A Figura 6.1 mostra esta reação, denominada cura.

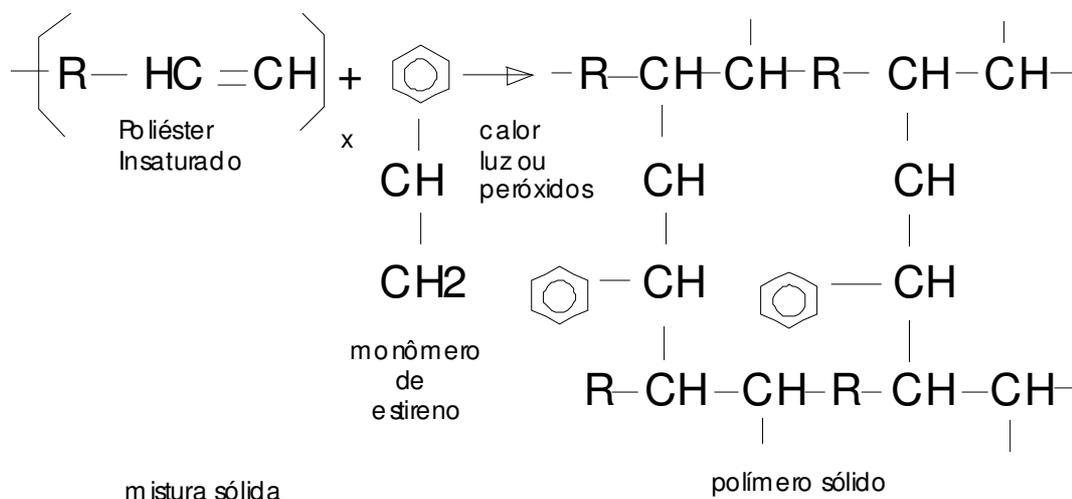


Figura 6.1 Processo de polimerização do poliéster

Fonte: O autor.

Devido à instabilidade da mistura poliéster com monômero são adicionados à resina aditivos inibidores. Os aditivos inibidores retardam a cura das resinas, possibilitando um tempo de gelificação maior, além de possibilitar o armazenamento da resina por um período mais longo. Os inibidores não acarretam perda de desempenho as resinas.

Os aditivos inibidores mais utilizados são o terc-butil catecol (TBC), a hidroquinona e a parahidroquinona.

Os inibidores são classificados em retardadores e estabilizantes. Os retardadores reagem com os radicais livres, em processo contínuo só permitindo a reação após todo o seu consumo, independente da temperatura. Este aditivo é usado para controle do *Pot Life*.

Os estabilizadores reagem com os radicais livres em temperatura de armazenamento. Quando há um aumento de temperatura devido à reação de polimerização, não mais apresentam esta característica inibidora. A ação inibidora é ideal quando aumenta o tempo de armazenamento e ajusta o pot life, sem influenciar na cura.

Em ensaios feitos por um fabricante de resinas para verificar a ação dos inibidores apresentou os seguintes resultados: determinada resina ortoftálica acelerada com 6 % de Naftenato de Cobalto e Peróxido de Metil-Etil-Cetona,

apresentou as seguintes curvas de polimerização com diferentes proporções de inibidores, conforme mostra a Figura 6.2.

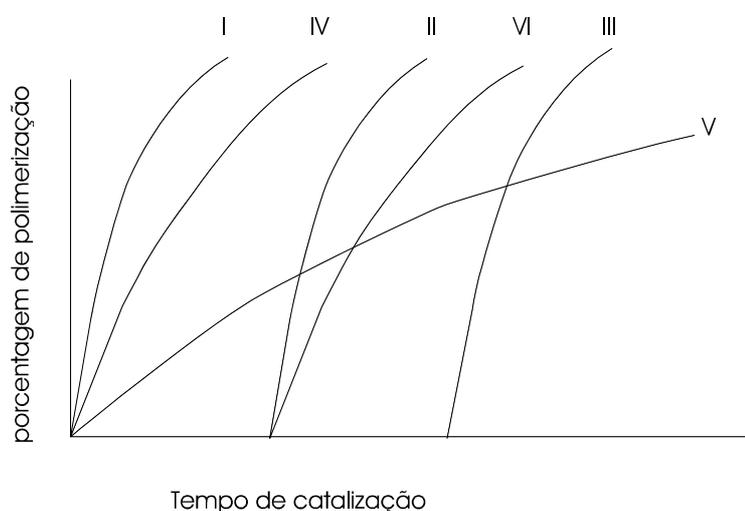


Figura 6.2 Polimerização do poliéster relacionada com os inibidores.

Fonte: O autor adaptado da revista Halo Química (1978).

A curva I representa a cura sem adição de inibidor, nesta situação a reação de polimerização é iniciada imediatamente após a adição do catalisador e do catalisador. As curvas II e III representam a polimerização com retardador, sendo a III com maior concentração, os dois gráficos mostram o retardamento do início da cura, porém apresentam as mesmas características. As curvas IV e V representam a reação de polimerização com a adição de estabilizante. Pode-se observar que o tempo de polimerização se inicia imediatamente, porém no caso da curva V devido a maior concentração, ocorre a polimerização incompleta. Na curva VI se verifica a polimerização ideal.

6.3.2 Aditivo absorvente de ultravioleta

Este aditivo tem a função de absorver as radiações ultravioletas e dissipá-las, de maneira que não afetem as camadas internas de resina. Geralmente seu uso está direcionado as camadas externas das peças sujeitas a esta radiação ou nas resinas para camadas externas de gelcolt. Este aditivo é ativo por um período de dois a três anos. Os produtos usados são o hidróxi-benzofenonas ou fenil salicilatos.

6.3.3 Aditivo desaerante

As bolhas de ar incorporadas em uma resina devido: à agitação pela adição de um acelerador, monômero de estireno, catalisador, carga ou através do sistema

de aplicação (com uso de rolo, pistola ou pincel) ou durante o processo de embalagem, apresentam-se estáveis na massa de resina, dificultando a sua retirada.

A função do aditivo desaerante é retirar estas bolhas a uma velocidade tal que, não permita a sua presença no momento de transformação da resina em gel.

Devido à estabilidade da bolha em sua interface este aditivo promoverá a sua desestabilização provocando o efeito de coalescência, que é a união das pequenas bolhas formando bolhas maiores que irão migrar para a superfície e desintegrando-se ao contato com o ar.

Quanto menor a viscosidade menor a quantidade de bolhas de ar, segundo a Lei de Stokes:

$$V = \frac{r^2}{n}$$

V = velocidade de movimentação da bolha de ar para superfície

r = raio da bolha de ar

n = viscosidade da resina

De acordo com a fórmula pode-se observar que a velocidade de migração para superfície aumenta com a redução da viscosidade.

Para que possa atuar na interface da bolha com a resina o aditivo precisa ser incompatível com a resina. Há uma gama variada de aditivos desaerantes, indo dos mais incompatíveis (de melhor aplicabilidade em gelcoat e resinas tixotrópicas), até os mais compatíveis (aplicáveis em resinas transparentes).

O aditivo desaerante assegura um laminado de alta qualidade, com bom acabamento superficial, e com boa umectação das fibras.

6.3.4 Aditivos umectantes e dispersantes

A utilização de aditivos umectantes e dispersantes propiciam o uso de cargas minerais e pigmentos em compósitos produzidos com termofixos, eles previnem a sedimentação e reduzem a viscosidade da mistura.

Estes aditivos são aplicáveis em processos de laminação manual, pistola, enrolamento filamental, pultrusão, SMC, BMC, e derivados RTM, injeção a vácuo, fundição, massas plásticas e mármore sintético.

Nos processos de laminação manual, pistola, enrolamento, pultrusão e fundição previnem a sedimentação e reduz a viscosidade. Já nos processos SMC e BMC reduzem a viscosidade, permitindo a incorporação de mais carga e facilitando o fluxo de resina. No processo RTM e injeção a vácuo diminuem a ocorrência de áreas secas, porosidade, melhorando o fluxo de resina, com a vantagem de diminuir drasticamente a filtragem da carga pelo reforço de fibras.

No mármore sintético reduz a viscosidade possibilitando maior incorporação de volume de carga, diminuindo também a ocorrência de bolhas e pontos secos.

A incorporação de carga a uma resina caracteriza-se em três fases:

- Umectação; que é a propriedade do aditivo de facilitar o envolvimento das partículas, sendo que parte do aditivo é compatível com a partícula e é absorvido em sua superfície, outra parte é compatível com a resina propiciando a incorporação da partícula a resina.
- Dispersão através do aditivo; havendo uma umectação uniforme da partícula reduz-se a energia necessária para a ruptura dos aglomerados de carga, reduzindo assim o tempo de dispersão.
- Estabilização; através da redução da força de atração das partículas os aditivos evitam a sua aglutinação, não permitindo o aumento da viscosidade.

Os aditivos estão agrupados em três famílias apresentando cada um características específicas, a opção é definida pelo processo usado, resina, catálise e o tipo de carga.

Os monofuncionais reduzem a viscosidade sem se preocupar com a sedimentação, são aplicáveis nos processos RTM, SMC, BMC, fundição e massas plásticas. Os bifuncionais reduzem a viscosidade e evitam a sedimentação, são usadas em laminação manual, à pistola e enrolamento filamental. Os aditivos multifuncionais apesar de não reduzirem, em alguns casos a viscosidade, evitam a sedimentação. Sua utilização na produção de pastas pigmentadoras se deve a capacidade de tingimento e a prevenção da floculação dos pigmentos.

6.3.5 Aditivos redutores de emissão de estireno

Devido à necessidade de redução de emissão de estireno, em alguns países tais como EUA, Canadá e alguns da Europa e Ásia, foram desenvolvidas resinas com baixos teores de estireno com aditivos, que reduzem em até 70% a emissão de estireno na fase não dinâmica do processo de cura.

O aditivo quando incorporado à resina cria uma barreira que impede a volatilização do estireno. O uso destes aditivos não reduz a aderência interlaminar devido à presença de promotores de aderência em sua formulação. O uso destes aditivos em gelcoat não é recomendado.

6.3.6 Aditivo nivelante

Os aditivos nivelantes reduzem a tensão superficial da resina ou do gelcoat e melhoram a umectação do substrato.

Em aplicações que se faz uso de desmoldante semipermanente, ocorre uma redução acentuada da tensão superficial do molde, sendo a tensão do gel maior, faz-se necessário a sua redução através do aditivo nivelante.

Devido ao fato dos aditivos serem à base de acrilatos e silicones, estes aditivos devem ser formulados de tal maneira a não afetar a aderência do gel ao laminado. Para isto é recomendado o uso de silicone de cadeia quimicamente modificada.

7 PROCESSOS DE MOLDAGEM

O material compósito tem que atender as solicitações mecânicas e resistir ao ambiente ao qual está exposto. Para atender as solicitações acima o projetista deve lançar mão de recursos construtivos que no conjunto oferecerão melhor solução.

Conforme Carvalho (1992) e Nasseh (2000), fazendo-se uma observação de um laminado, pode-se constatar que a primeira camada é constituída de gel ao qual se aplica um véu de superfície. Esta camada apresenta 90% de resina e 10% de fibras. Sua função é evitar a ação de agentes agressivos criando uma barreira de proteção para o laminado estrutural. O gelcoat é formulado de tal forma, que apresente baixa capacidade de absorção de água e seja resistente ao ambiente a que será exposto o produto.

A segunda camada é um laminado intermediário, composto por manta de fibras picadas, na qual o teor de resina é de 70%, para um teor de fibras de 30%. Esta camada pode sofrer leve deterioração em virtude do intemperismo e de agentes agressivos. Devido a sua espessura, na faixa de 2mm, forma uma segunda barreira de proteção para o laminado estrutural.

A terceira camada é o laminado estrutural. Este laminado cuja composição pode apresentar fibras contínuas associadas a fibras picadas, conforme projeto. Esta arrumação, ou melhor, dizendo arquitetura das fibras é projetada objetivando resistir às solicitações mecânicas. Esta camada pode apresentar um teor de fibras variando de 50% a 60%.

Uma quarta camada rica em resina é aplicada sobre o laminado estrutural numa espessura de 0,10 mm a 0,25 mm. Em situações nas quais possa ser submetida a agentes agressivos, é interessante a aplicação do véu de superfície, este véu evita a trinca da resina, o que facilitaria a degradação do laminado estrutural.

Os processos de fabricação de um laminado está diretamente relacionado a dois fatores determinantes: ordem técnica e econômica.

O projeto da peça, tipo de estrutura de reforço, e as possibilidades construtivas dos processos a serem utilizados, serão determinantes na escolha do tipo de processo construtivo.

Os processos manuais apresentam como vantagem a facilidade de produção, aliada a moldes de custo relativamente baixo. Considerando a escala de produção de até 500 peças. Nesta faixa de quantidade de peças o molde segundo Nasseh (2000) participa no custo final da peça em 4%, se forem construídas 100 peças, este custo passa para 16%.

No momento da concepção de um produto de FRP (plástico reforçado com fibras), o projetista deve considerar uma série de peculiaridades inerentes a cada processo, peculiaridades estas que serão determinantes na escolha do processo a ser adotado.

Com o projeto elaborado, serão analisados os processos construtivos e a partir de sua característica intrínseca, é possível uma escolha adequada do processo.

De acordo com o processo construtivo algumas limitações serão impostas as características do produto final. O teor de fibras, o excesso de resina, peso excessivo, custo elevado do produto final, presença de defeitos de laminação, tais como bolhas e superfícies irregulares.

Como descrito no início do capítulo, junto ao gelcoat deve haver uma camada rica em resina composta de manta leve, que devido à baixa espessura não irá afetar a camada de gel devido à baixa exotermia, o que não é conseguido com tecidos mais pesados ou mantas de elevada gramatura. Estes produtos necessitam de maior teor de resina para sua impregnação. A exotermia de uma camada espessa pode provocar o enrugamento do gelcoat, acarretando retrabalho na sua recuperação.

O uso de mantas leves no laminado intermediário possibilita a redução de defeitos, oriundos da dificuldade de impregnação. Estas mantas apresentam melhor desempenho se comparadas a outros produtos mais pesados. Com este procedimento evita-se a presença de micro bolha e a impressão das fibras de

reforço na face do gelcoat, que apesar de não constituir um problema mais sério, demonstra a dificuldade de controle do processo pelo transformador.

7.1 LAMINACÃO MANUAL (HAND LAY-UP)

Este processo é muito difundido devido ao baixo investimento inicial em ferramentas (roletes compactadores, facas espátulas, trinchas, tesoura rolo de pintura resistente a solventes, dosadores balança e pistola de caneco invertido, para aplicação de gelcoat e compressor), formas e moldes. Este processo pode ser executado em moldes tipo fêmea ou macho, em função da superfície acabada que se deseja obter, interna ou externamente.

A simplicidade construtiva, ausência de restrição de dimensões, possibilidade de alterações no projeto e laminação no campo, constituem algumas das vantagens do processo.

O procedimento inicial antes de iniciar a laminação é o corte das fibras, de maneira que atendam as especificações de projeto. Nesta etapa deve-se considerar que quando houver emenda no reforço, é necessário que se faça uma sobreposição de pelo menos 5cm, esta sobreposição segundo Nassed 2000, acarreta um aumento de 5% de peso na peça a ser laminada.

A aplicação de mantas na primeira camada é feita transversalmente, em função da facilidade de aplicação. As camadas subseqüentes devem ser aplicadas alternadamente. Há de se evitar a concentração das emendas, para uniformizar a espessura do laminado.

Devido à direção preferencial do tecido, ser a direção longitudinal, esta deve ser a escolhida para aplicação na peça, pois reduz o número de emendas e oferece maior capacidade de reforço.

O uso woven roving sem costura, ao serem cortados geram sobras, que não são aproveitadas, sendo, portanto a utilização de tecidos costurados a mantas, mais econômico.

Após o corte do reforço, deve-se cortar o núcleo sanduíche, para os locais em que seu uso for previsto, de forma a poder verificar sua dimensão e assentamento a forma, antes do início da laminação. O uso de placas planas em enchimento reduz o

peso, quando comparado ao uso de placa flexíveis, cujos interstícios devem ser colmatados com massa, a fim de evitar a condensação nestes espaços.

Há situações nas quais os painéis de espuma de enchimento são moldados através do calor aos moldes machos de grande curvatura, técnica usada com os preregs.

Os materiais devem ser marcados e pesados a fim de saber a quantidade de resina necessária a sua impregnação. Sua posição no molde deve ser marcada com o intuito de facilitar a sua posterior aplicação.

Após o corte prepara-se o molde com a aplicação de três camadas de cera desmoldante. A cera desmoldante deve ser de boa qualidade para facilitar a retirada da peça do molde e não dificultar a aplicação uniforme do gel em sua superfície. O molde deve ser polido superficialmente para retirada do excesso de cera.

Alguns laminadores aplicam sobre a cera uma camada de álcool polivinílico, por meio de rolo ou pincel. O álcool polivinílico deixa a superfície do molde ligeiramente áspera, o que será transmitida à peça. Pode-se também utilizar filme de poliéster saturado ou filme de celofane como desmoldante. Estes materiais têm restrição devido ao fato de não se acamar as formas complexas.

Aplica-se através de trincha, rolo ou pistola uma camada de gelcoat, em uma espessura de aproximadamente 0,4mm a 0,6mm, o que equivale a um consumo de 500 a 700g/m² de gelcoat.

Após a cura desta camada, que é constatada quando se toca na superfície e não fica impressa tinta no dedo (cura ao toque).

Esta camada apresenta pegajosidade superficial, que facilita a adesão das camadas subseqüentes de laminação. Durante a cura do gel substâncias solúveis em água podem ser formadas devido ao excesso de catalisador, excesso de glicol livre na resina ou pela inibição da cura do gel em contato com o ar. Estas substâncias facilitam a formação de bolhas, na interface do gel com a primeira camada de laminação, o que pode ocasionar o surgimento de células osmóticas (bolhas na interface entre o laminado de proteção com o laminado intermediário, em produtos expostos à água ou solventes).

Em aplicações que serão submetidas à presença constante de água e de produtos químicos é aconselhável após a aplicação do gelcoat, o uso de um véu de

superfície, que aplicado com o gel ainda molhado, permite a sua impregnação. Neste caso não há a necessidade de esperar a cura completa do gel, o que não permitirá a inibição da cura, além de proporcionar menor incidência de falhas de laminação na interface. Uma forma de evitar a incidência de glicos livres é a substituição da resina de poliéster por resina éster-vinílica.

Sobre a camada de gelcoat, no caso de haver sido curada, é aplicada uma camada de resina, sobre a qual é colocada a manta de 300g/m². A manta é então compactada através de rolo ou trincha conformando-se ao molde. Uma maneira de verificar a perfeita impregnação das fibras é a constatação de que as fibras encontram-se translúcida e não branca como é fornecida. Neste momento o ligante químico estará dissolvido e as fibras são mais facilmente impregnadas.

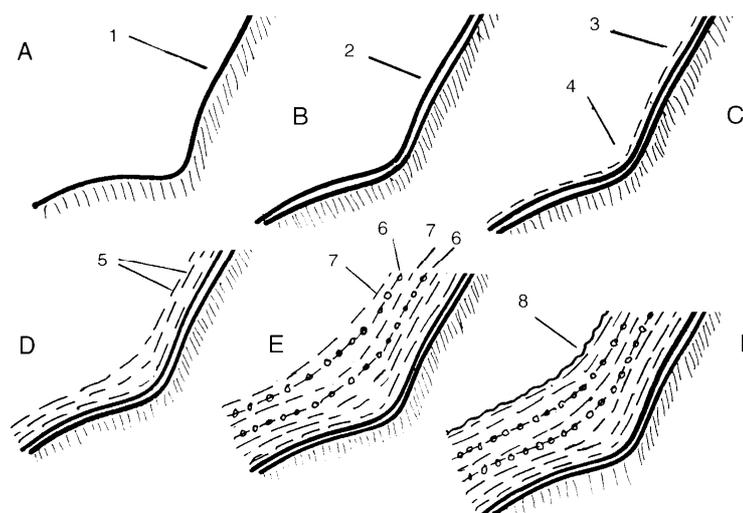
Após a impregnação o laminado deve ser roletado para que se expulsem os resquícios de bolhas, o rolete deve ser molhado em resina e aplicado em movimentos contínuo sobre o laminado.

Após a gelificação da resina não se deve continuar a roletagem, o que causará danos ao laminado.

As camadas subseqüentes poderão ser aplicadas com a resina molhada, o que facilita a laminação e reduz o consumo de resina. No caso do laminado estar curado e houver algumas arestas, estas devem ser lixadas antes do prosseguimento da laminação. No caso se passar mais de 48 horas, é necessário lixar toda a superfície a fim de promover aderência entre a camada antiga e a nova.

É importante observar o gel time da resina e o seu tempo de utilização, para não ocorrer à perda do material catalisado. Ao mesmo tempo evitar que haja cura da resina antes da conformação devida, impregnação e extração de bolhas do laminado.

A Figura 7.1 apresenta o esquema de um laminado padrão, segundo Du Plessis (1996).



A - molde polido com desmoldante 1.

B – molde com gel colt 2.

C – primeira camada de manta leve.3, 4.

D – camadas de manta sobre a primeira camada 5.

E – laminado estrutural, woven roving 6, manta 7.

F – camada de resina de acabamento 8.

Figura 7.1 Esquema de um laminado típico.

Fonte: Du Plessis (1996).

7.1.1 Aplicação de estrutura de reforço

Após a laminação nos locais previstos no projeto, deverão ser instalados os reforços, longarinas e no caso de construção naval, anteparas.

Estes elementos devem ser fixados antes da retirada das peças do molde e de preferência com o laminado ainda úmido, para não provocarem a deformação das peças devido à cura de seus fixadores.

Os reforços podem ser feitos com espuma, sobre a qual é procedida a laminação de fibra de vidro. Esta espuma funciona apenas como molde para laminação. Podem-se ainda utilizar perfis em fibra laminados anteriormente, que serão colados ao laminado, procedendo ao preenchimento de vazios entre as peças e posteriormente laminando-se camadas de fibra sobre as peças.

Para alma dos reforços podem-se usar outros materiais, como pedaços de madeira, perfis, metálicos, tubo de papelão cortado ou compensado. A escolha da alma para laminação do reforço está condicionada ao tipo de aplicação.

Algumas formas de aplicação da alma em reforços podem ser vistas na Figura 7.2.

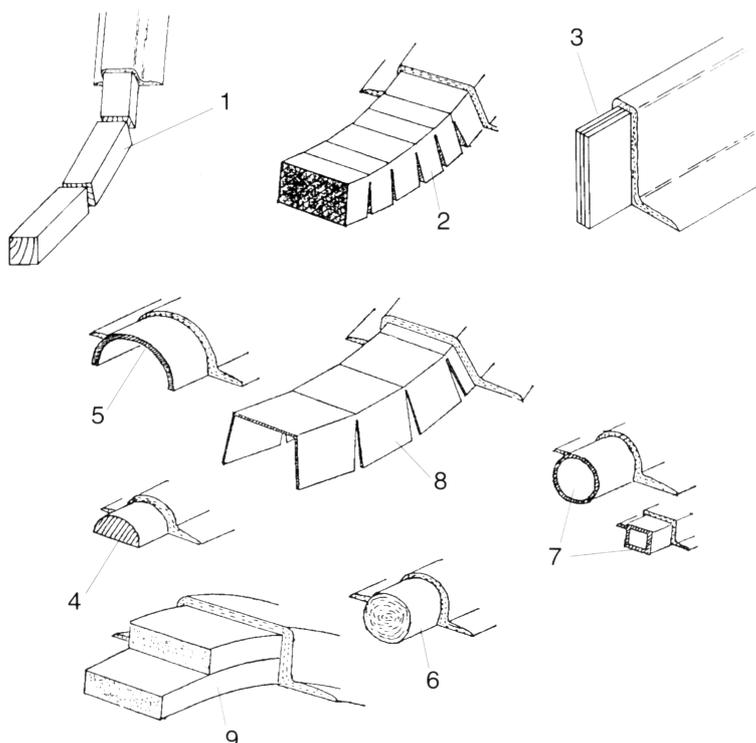


Figura 7.2 Reforços aplicados em laminados, 1 tarugos de madeira, 2 peças seccionadas, 3 compensado, 4 meia cana de madeira, 5 tubos de cartão cortado ao meio, 6 cordões de papel ou jornal enrolado, tubos ou seções de plástico ou alumínio, poliuretano flexível

Fonte: Du Plessis (1996)

7.1.2 Aplicação de núcleo sanduíche

Após a laminação de acordo com o projeto deverão ser fixados os materiais de núcleo. A fixação do núcleo é feita por meio de adesivo. Prepara-se o adesivo fazendo a perfeita homogeneização do produto com o catalisador, por meio de batedor de hélice. Deve-se ter o cuidado de avaliar a quantidade a ser consumida e o seu geltime. A catalisação deverá ser compatível com a temperatura e a área a ser trabalhada, na temperatura de 25°C, 1% de catalisador terá 45 min. de geltime, esta proporção não deve ser nunca inferior a 0,8% segundo Nasseh (2000).

Retirados os defeitos que dificultem a perfeita adesão do núcleo, aplica-se uma camada uniforme de adesivo com espátula, de modo a que o consumo esteja na faixa de 1kg/m². Após a aplicação do adesivo, acomodar o enchimento sobre este procedendo a sua união ao substrato, utilizando rolo compactador vibratório. O indicio da perfeita acomodação é o surgimento de adesivo na superfície da espuma (Nasseh, 2000).

Em superfícies que sejam utilizadas placas planas de espuma de PVC o uso do vácuo para perfeita adesão é adequado, em placas quadriculadas, é possível o uso do vácuo ou de vibração, sendo o melhor resultado obtido com o vácuo. Em enchimento de madeira balsa, o vácuo acarretará a penetração do adesivo nos poros da madeira, afetando a colagem, para evitar este inconveniente deverá ser usada balsa impregnada com resina para proceder à selagem dos poros da madeira.

A aplicação do enchimento sem o uso de vácuo pode gerar irregularidades na adesão, alguns laminadores usam pesos que não produzem uniformidade na adesão forçando determinadas partes para junto do laminado, expulsando o adesivo e deixando outras com uma camada espessa de adesivo. Outros usam sacos de areia que também não é o ideal, pelo fato de não distribuir uniformemente a pressão. O vácuo é a melhor solução, devido à uniformidade de distribuição de pressão o que produzirá peças mais bem acabadas e uniformes.

Após a fixação e cura do adesivo procederá ao chanfro das bordas a fim de propiciar uma transição suave entre os locais que receberam o núcleo e os outros. Após esta preparação procede-se a laminação sobre o núcleo com manta de fibra de vidro.

Quando a resina encontra-se em forma de gel (estado de cura intermediária) é possível proceder a rebarbação,(retirada de excessos de laminado das peças) usando-se uma faca para cortar junto ao molde. Se este procedimento não for executado e houver curado totalmente o laminado, sua execução só será possível com ferramenta de corte apropriada e cautela para não afetar o molde.

Deverão ser previstos os locais em de que serão aplicados os fixadores.Há a necessidade de se prever os devidos reforços nestas partes.

Após a cura dos materiais é feito o procedimento de desmoldagem.

Quando a peça laminada cura ocorre à retração em relação ao molde o que facilitará a desmoldagem. O ar comprimido injetado em locais previamente determinados, o uso de cunhas de madeira, ou plástico, entre o molde e a peça, tomando o cuidado para não danificar nenhum dos dois. O uso de martelo de borracha percutindo sobre o laminado e o molde, também auxilia a desmoldagem. Em casos em que haja dificuldade de desmoldar pode-se injetar água entre o molde e a peça.

Em moldes bipartidos o procedimento de desmoldagem é facilitado com a divisão da forma.

Em molde macho a desmoldagem é dificultada, pela retração da peça, o projeto do molde deve levar este fator em consideração.

7.2 LAMINAÇÃO A PISTOLA (SPRAY-UP)

Neste processo é feita a aplicação da resina e da fibra simultaneamente sobre o molde previamente preparado como no processo manual, sobre o qual já foi aplicada a camada de gelcoat.

Equipamentos laminadores específicos são utilizados neste processo, estes equipamentos picotam a fibra em dimensões pré-determinadas, projetando-as através de um aspersor de ar simultaneamente com a resina contra o molde. A Foto 7.1 apresenta uma pistola de laminação.



Foto 7.1 Pistola para processo de laminação spray up.

Fonte: Revista do Plástico Reforçado - Materiais Compósito.(2002)

Neste processo há uma variação no funcionamento do equipamento de acordo com o fabricante e o modelo.

Dois sistemas são utilizados. No primeiro a resina previamente acelerada, irá receber catalisador através de um injetor dosador, que possui válvula controladora de fluxo regulável pelo aplicador. A mistura do catalisador pode ser no interior da pistola, ou externamente.

Nos equipamentos em que a mistura é feita internamente devem ser limpos logo após o uso, para evitar o entupimento. Alguns equipamentos de mistura interna possuem dispositivo para injeção de solvente para limpeza.

Feita a mistura, esta é então injetada pelo bico do equipamento por meio de ar comprimido para sua atomização. Estes equipamentos não possuem precisão na dosagem de catalisador, além de introduzirem ar na mistura fibra resina.

No segundo sistema dois compartimentos pressurizados acomodam resina catalisada com o dobro de catalisador e pré-acelerada. A pressurização força a saída da resina dos dois compartimentos para a pistola. Em seu interior há uma câmara que mistura as duas, projetando-a com pressão e atomizando o material, produzindo um leque. Este processo é denominado airless.

Em outro compartimento da pistola nos dois sistemas, o fio roving contínuo é picotado e soprado para ser lançado no leque de resina, o que faz com que seja projetada juntamente com a resina sobre o molde.

As camadas aplicadas devem ser roletadas do centro para extremidade da peça, para retirar as bolhas do laminado. Segundo Nasseh (2000) uma camada fina de 1mm, corresponde a uma deposição de material na faixa de 450 a 600 g/m². As camadas subseqüentes devem ser aplicadas perpendicularmente de forma alternada e em espessura entre 2 e 3mm. Devem-se tomar os mesmos cuidados do processo manual, em relação à espessura de laminação, para evitar deformações devido a exotermia.

Estes equipamentos permitem a regulagem do fluxo de resina e fibra possibilitando o controle do teor de fibra e resina aplicado. Este teor varia de 20% a 30%.

A aplicação é feita em faixas paralelas que deverão se sobrepor em um terço a faixa anterior, segundo Nasseh (2000).

A vantagem deste processo é a rapidez imprimida ao trabalho se comparado ao processo manual. Este processo é considerado um processo manual mecanizado, sendo seu uso adequado a peças complexas cujas formas dificultem a aplicação de mantas e tecidos, devido às saliências e reentrâncias e possuam grandes dimensões. Devido à ausência de aglomerantes nas fibras estas são mais facilmente impregnadas.

O custo deste processo é menor devido ao custo das matérias primas utilizadas e a rapidez de confecção das peças.

Em termos de equipamentos há um pequeno acréscimo se comparado com o manual; pistola e compressor.

Alguns cuidados devem ser tomados para se obter produtos de melhor qualidade:

- Manter limpos os equipamentos.
- Substituir as lâminas gastas do picador.
- Regular o rotor picotador.
- Procurar regular o cortador para projetar em posição adequada em relação ao leque de resina.
- Regular o soprador de fibras para evitar o desfibramento e a deposição irregular.
- Usar olhais de cerâmica para guia do fio roving.
- Manter os olhais limpos.
- Evitar contaminação do fio roving
- De acordo com o tex da bobina pode-se reduzir a velocidade do roving, se for utilizada bobina de 2400 usar duas, se usar 4000 usar uma, com esta bobina consegue-se aplicar 6 kg de laminado por minuto.
- Evitar eletricidade estática usando rolos cortadores de borracha branca, e instalar olhal de latão aterrado, fixo em uma extensão de 30 a 50 cm no braço do equipamento.
- Se ocorrer má dispersão das fibras devido a sua aderência (ribonização) deve-se instalar barras paralelas na saída da bobina que irão ajudar a separação.

A calibragem do equipamento é feita através da coleta dos materiais em separado durante 15 segundos, procedendo à pesagem dos mesmos e calculando suas porcentagens. A vazão é calculada, multiplicando por 4 o peso dos dois componentes sendo obtido a vazão em quilos por minuto.

Deve ser evitado teor de fibra alto, acima de 32%, com resinas sem carga.

Corrigir o teor de fibras aplicando resina sobre o laminado dificulta a extração de bolhas.

Atomizadores de resina através de ar comprimido introduzem mais bolhas no laminado e poluem mais o ambiente de trabalho quando comparados com sistema airless.

Este processo pode ser usado em laminação com núcleo sanduíche.

O processo a pistola depende da experiência do operador para o controle da espessura e da uniformidade da peça.

Os procedimentos de rebarbação e desmoldagem são semelhantes aos usados na laminação manual.

7.3 LAMINAÇÃO EM MOLDES MACHO

Este processo desenvolvido por construtores de barcos de regata vem sendo difundido com o uso de moldes macho de madeira.

Há casos em que são usadas estruturas de madeira recobertas com espuma de PVC. Sobre esta cobertura lamina-se a superfície externa. Após a cura é retirada a estrutura e sobre a espuma lamina-se a superfície interna.

Em aplicações de alto desempenho, substitui-se a espuma por um forro de madeira fina que recebe um laminado de tecido de fibra de vidro fina em uma ou duas camadas, para receber uma camada de massa de acabamento.

Sobre esta superfície é procedida a laminação, devido a impermeabilidade do molde é usado o sistema de vácuo em todas as etapas conseguindo-se assim um excelente acabamento e consolidação do laminado e do núcleo.

Sobre a camada de PVC de núcleo é aplicada uma camada de resina pigmentada que será lixada para posterior aplicação de tecidos triaxiais ou quadriaxiais que evitam superposições de laminados tornando o produto mais leve.

Os construtores de barcos de regata aplicam sobre esta superfície acabada massa de microesferas que devido à baixa densidade permite o acabamento da superfície sem grandes acréscimos de peso. Segundo Nasseh (2000), um barco de 15 m consome 10kg de massa para um acabamento impecável.

7.4 LAMINAÇÃO COM UTILIZAÇÃO DE PRESSÃO

7.4.1 Laminação vacumm bagging

Este processo devido ao custo, simplicidade e não necessitar de mão de obra muito qualificada é muito utilizado.

O método consiste em aplicar sobre o laminado um filme, que deve ser vedado nas bordas, neste filme então se aplica vácuo com uma bomba de vácuo, que gera uma zona de baixa pressão. Esta diferença de pressão em relação ao exterior provoca a sucção de ar e a aderência do material à forma. O processo está esquematizado na Figura 7.3.

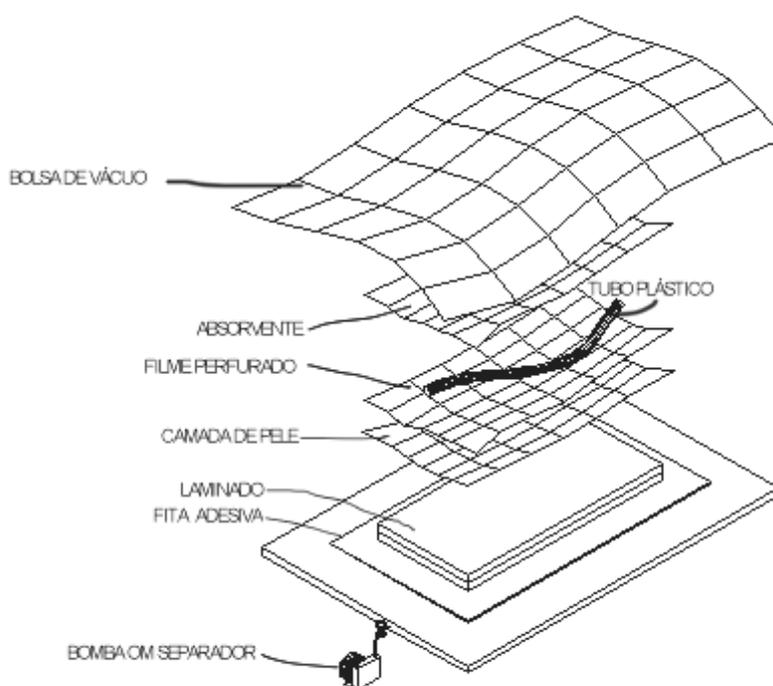


Figura 7.3 Processo de moldagem vacumm bagging.

Fonte: O autor

Este processo pode ser usado em laminados sólidos, ou em laminados com enchimento. O uso em laminados sanduíches proporciona melhor adesão do núcleo ao laminado propriamente dito. Em laminados maciços este processo reduz os vazios com o aumento do teor de fibras.

O filme plástico transparente pode ser rígido ou ligeiramente elástico com espessura entre 0,2 a 0,4 mm.

De acordo com a dimensão da peça, tipo de forma (macho ou fêmea) se produz à forma para facilitar a aplicação da bolsa de vácuo.

A bomba de vácuo deve ser capaz de gerar sub-pressão suficiente mesmo havendo pequenos vazamento de ar. As bombas de vácuo podem ser elétricas ou pneumáticas. Estas bombas devem ser municiadas de filtro para reter partículas sólidas e vapores de monômero.

É necessária a instalação de um sistema de retenção de resina extraída na aplicação vácuo, para proteção da bomba. A tubulação de vácuo deve possuir um manômetro, para registro de pressão com registro. O conduto de vácuo deve ser feito com mangueira transparente, resistente a pressão para permitir a observação de possíveis corpos estranhos, ou resina em seu interior.

O acoplamento da tubulação a bolsa é feito através de um flange que poderá ser rosqueado. No local de acoplamento é necessário prever reforço de filme em duas a três camadas segundo Nassed 2000. O bocal de tomada não deve tocar o molde, para prevenir é utilizado um cabo de polipropileno em espiral junto à tomada. Este procedimento evita o contato com o laminado e a sucção de resina.

Para que haja uma distribuição de sucção, são usadas mangueiras de plástico em “S”, ligadas a tomada. A distribuição de pressão deve ser uniforme. É necessário antes da aplicação de pressão testar o molde vazio para verificar possíveis irregularidades. A pressão aplicada deve situar na faixa de 0,7 atm.

Em áreas maiores que 6m² devem-se ter duas a três tomadas, interligadas por união em “Y”, para permitir a distribuição da pressão de forma uniforme.

Quando for aplicado núcleo sanduíche, devem-se testar os enchimentos antes da aplicação do adesivo, para certificar do íntimo contato com o molde, caso contrário há de proceder aos ajustes necessários.

Quando for aplicado núcleo de PVC ou madeira balsa em forma de placas planas, há de se tomar o cuidado de furar o material a cada 150mm, com diâmetro de 3mm para facilitar a aplicação do vácuo.

O procedimento de laminação é semelhante ao anterior, após a cura é aplicado o núcleo e posteriormente o vácuo. A verificação da adesão será feita observando o afloramento do adesivo através dos furos de passagem de ar. Após a cura do adesivo, é feita a laminação sobre o núcleo. A aplicação de vácuo é opcional nesta camada, sua utilização proporcionará melhor qualidade ao laminado.

Neste processo não há a necessidade de se fazer à laminação de todo núcleo em uma etapa, podendo ser dividido em várias etapas.

7.4.2 Autoclave

A autoclave é um recipiente grande que após o fechamento hermético é possível ser aquecido e aplicado pressão. A pressão pode chegar a 6,8 atm. A peça laminada é posta no interior da autoclave, que é pressurizada e aquecida gradualmente, até os níveis desejáveis para o tipo de resina. Este procedimento propiciará a retirada de vazios do laminado e sua cura. Após a cura procede-se novamente o aquecimento da peça para se fazer a pós-cura, logo após é resfriada rapidamente. Neste processo podem-se obter produtos com teor de fibras de até 70% (NASSEH, 2000).

Este tipo de laminado transfere ao produto melhores características mecânicas, além de reduzir o tempo de laminação. É um processo que demanda alto investimento inicial e materiais descartáveis.

A laminação do produto pode ser feita manualmente ou com o uso de prepegs. Sendo o prepegs mais adequado ao processo.

7.4.3 Processo RTM

No processo RTM (resin transfer molding) o reforço de fibra é depositado sobre um molde fêmea, sobre este molde acopla-se um molde macho, que deixa o espaço correspondente ao produto acabado, podendo o molde pinçar o reforço ou não. Na parte inferior do molde fêmea localiza-se um bico de injeção. A figura 7.4 mostra o esquema do molde com o bico de injeção e o respiro.

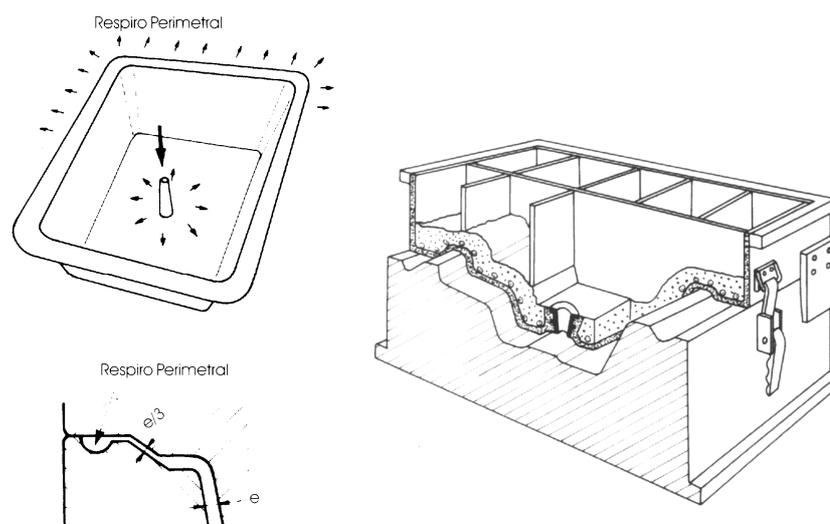


Figura 7.4 Molde para o processo RTM, e a posição do bico de injeção e dos respiros.
 Fonte: Revista RTM Vetrotex.

Através do bico é injetada resina, de tal maneira que os espaços entre as fibras são preenchidos com resina, expulsando o ar intersticial existente. Na parte superior do molde existem respiros localizados estrategicamente de forma a permitir a impregnação de todo o material de reforço, sem que ocorra espaço não impregnado. A pressão de injeção que pode alcançar de 4 a 6 Bars, esta pressão exerce uma força de 40 a 60 toneladas, em um laminado de 1 m².

A construção dos moldes pode ser feita com plástico reforçado com fibras, superfícies eletroformadas, materiais metálicos usinados pelo método CNC (alumínio, aço), metais de baixo ponto de fusão, metais por projeção, fundido, chapas soldadas, de cimento.

Estes moldes podem ser dotados de sistema de aquecimento para cura da resina, por meio de óleo ou água, aquecida, que circula em condutos inseridos nos moldes. De acordo com a temperatura, determinados tipos de materiais para molde são desaconselhados.

É importante que no projeto dos moldes seja levado em consideração à pressão aplicada ao sistema, para prever o sistema de fixação do molde ao contra-molde, o sistema de desacoplamento do molde e contra-molde (talha, prensa), tipo de prensa ou molde prensa.

São usados diversos tipos de equipamentos para injeção da resina.

Os equipamentos pressurizados, são compostos de um tanque pressurizado que possibilita uma pressão de injeção de 5 a 7 bars no qual é depositada a resina preparada. Este sistema deve ser limpo imediatamente após a injeção. O sistema de polimerização escolhido deve adequar-se ao tempo de utilização.

No sistema de injeção com bomba de mistura 50/50, duas bombas de mesma capacidade injetam resina com catalisador e acelerador que produz a mistura em um misturador estático e a conduz ao bico de injeção, neste sistema devido à dobra do estireno reativo, há o limite da vida útil da resina no reservatório de 24 horas.

Já o sistema de injeção com bombas dosadoras é composto de uma bomba principal que dosa e transfere a resina, podendo ser acelerada e conter carga. A esta bomba encontram-se acopladas bombas secundárias, que complementam o sistema de polimerização complementar. Os constituintes dosados são misturados em um misturador estático ou em uma câmara existente na pistola de injeção. Neste equipamento existe sistema de purga e limpeza com solvente sob pressão.

As resinas aplicadas em RTM possuem baixa viscosidade, entre 1 e 10 poises, o que permite a incorporação de até 100 partes de carga.

Os tecidos e complexos de fibras devem facilitar a acomodação aos moldes propiciando reforços na ordem de 50% em volume. Devem possuir boa permeabilidade sem sofrerem arrasto, devido à pressão de injeção.

Em algumas aplicações é utilizado vácuo nos respiros para auxiliar a impregnação.

As mantas e os véus de superfície devem possuir boa molhabilidade, boa deformabilidade e volume aparente que permita impregnação com proporção de vidro de 5 a 10%.

Este processo tem a vantagem de produzir peças com superfície acabada nas duas faces, rapidez de moldagem e alta produtividade de peças.

Apresentam limitações para pequenas séries, exigindo investimento elevado em preparação de moldes e equipamentos.

7.4.4 Laminação com auxílio de vácuo sistema VARTM

O método VARTM (vacuum assisted resin transfer molding), usa pressão positiva para injeção e pressão negativa para sucção. O laminado é previamente aplicado ao molde seco. Sobre este é aplicado um filme que proporciona uma perfeita selagem. Aplica-se uma pressão negativa de 0,8 atm que irá acomodar o reforço e o núcleo que é previamente cortado em direções ortogonais com sulcos finos para permitirem a penetração da resina.

Os tecidos utilizados devem ser multiaxiais, possuir excelente permeabilidade e facilidade de acomodarem-se perfeitamente a superfícies complexas.

A resina de poliéster não é muito adequada a este processo devido ao seu baixo tempo de geltime. As resinas epóxi formuladas para este tipo de aplicação são adequadas, devido ao ajuste no endurecedor. As resinas estervinílicas são de uso mais corriqueiro devido a sua baixa viscosidade. Nestas aplicações segundo Nasseh (2000) a viscosidade da resina deve estar na faixa de 350 cps, sendo a viscosidade da resina de poliéster entre 450 a 600 cps na temperatura de 25°C pouco adequada ao processo.

7.4.5 Sistema SMC

O processo SMC é um processo de moldagem por compressão a quente. Sobre molde metálico é colocada uma manta composta de fibras, resina, aditivos cargas, previamente preparada. Sobre esta manta é sobreposto um contramolde, ao qual se aplica pressão, através de uma prensa, o molde é aquecido à temperatura de aproximadamente 150°C. O produto é mantido determinado tempo a esta temperatura, que pode variar de dois a quatro minutos. Devido ao ciclo de moldagem curto é possível se obter a produção de até 15 peças / hora.

Neste processo em função do produto, há possibilidade de formulações distintas do material de moldagem, auto-extinguível, acabamento superficial excelente, baixa contratibilidade, elevada resistência mecânica, pigmentação da massa e rigidez dielétrica.

A produção do compósito a ser prensado é feita em forma de mantas contínuas com o uso de equipamento específico, que possibilita o controle das características e uniformidade do produto. A pasta de impregnação é formulada de

acordo com a aplicação, sendo composta de resina, aditivos, cargas, pigmentos. A produção do compósito para SMC é produzida entre dois filmes plástico, que facilitam seu manuseio e evitam a evaporação do monômero de estireno. Sua embalagem é em forma de bobinas.

O processo começa com o corte com dimensões de 30 a 40% menor que a superfície do produto a ser fabricado. O material é pesado e disposto no molde. Fecha-se a prensa, é aplicada pressão e temperatura, ficando por determinado tempo o material no molde. O molde feito em aço "P20" possui sistema de fechamento e vedação que evitam a saída do material e a presença de rebarbas no produto acabado. O molde para SMC pode produzir mais de quatro milhões de peças com baixa manutenção.

Concluído o processo é feita a extração da peça do molde, encontrando se pronto já completamente polimerizado. Não havendo necessidade de esfriamento, devido a sua baixa contração.

Este processo possibilita a construção de formas complexas, com variação de espessuras, nervuras, previsão de locais para insertos, e aplicação de insertos durante o processo de moldagem.

Devido ao fato de suportar temperaturas de até 150°C podem ser pintadas na linha de pintura de produtos metálicos.

Para a pintura das peças produzidas em SMC deve-se lavar a peça com água e sabão alcalino a 80°C, posterior lavagem com água a 80°C e finalmente lava-se com água desmineralizada a temperatura ambiente. A peça é seca em corrente de ar quente. A solução alcalina evita a necessidade de prévio lixamento da peça devido à extração do desmoldante ser feita através de agente químico alcalino.

As peças produzidas pelo processo SMC apresentam vantagens em relação a outros produzidos em termoplásticos ou materiais metálicos. Algumas destas vantagens são: flexibilidade de desenho, resistência a corrosão, resistência dielétrica, baixo custo de moldes, acabamento superficial, auto-extinguibilidade, resistência a solventes e baixo custo.

7.4 6 Laminação com o uso de Prepegs

No processo de laminação com o uso de prepegs, as fibras pré-impregnadas são aplicadas sobre o molde, a aderência do material mantém em sua posição. Várias camadas são aplicadas de acordo com o projeto. Sobre o material é colocado um tecido de Nylon, que funciona como um desmoldante. Após este tecido é aplicado um filme de plástico perfurado que fixa a quantidade de resina a ser removida pela compactação, segundo Nasseh (2000), esta quantidade não ultrapassa 3 % em sistemas bem executados.

No processo prepegs normalmente usa-se resina epóxi curável acima da temperatura ambiente. O material é guardado a temperatura de -18°C , o que garante uma vida útil de meses. Existem prepegs fabricados com matriz poliéster ou estervinílicas.

Este processo foi desenvolvido para aplicações na indústria aeronáutica, onde eram curados a 3 atm de pressão, em temperatura de 120°C a 150°C . Na atualidade os materiais curam a temperatura abaixo de 84°C e pressão de 1atm.

O equipamento para a produção do prepgs impregna o tecido na proporção requerida em projeto. O processo consiste em passar pelo impregnador o tecido seco juntamente com um filme de papel ou plástico, para receber a resina que depois é rebobinado novamente. A resina utilizada cura a temperatura superior a ambiente.

Para que haja cura é importante manter constante a temperatura de toda a peça. Ao atingir 60% da temperatura de cura ocorre a gelificação. Então se eleva de forma progressiva a temperatura, até 84°C em intervalos regulares para manter o fluxo constante de resina durante a cura. O que não ocorrerá se em algum ponto a resina apresentar menor temperatura, não havendo fusão e não permitindo que esta escoe de forma uniforme por toda peça. É importante fazer com que a resina alcance a temperatura de fusão ao mesmo tempo. O que implica em ter a mesma viscosidade.

Termopares instalados sobre o laminado e no seu interior auxiliam o controle de temperatura. No interior do forno a circulação de ar é constante para impedir o aquecimento irregular da peça. Este processo é feito por intermédio de computador.

A construção do forno, em aplicações que necessitem pressão, é feita em chapa de aço, com reforços. Em aplicações que utilizem pressão de 1 atm são usadas chapas metálicas, isoladas termicamente com material que suporte temperaturas elevadas.

Atingida a temperatura de fluidez da resina em poucos minutos esta será curada, devendo-se resfriar a peça rapidamente. Os produtos feitos com tecidos pré-impregnados apresentam características superiores se comparadas com os outros processos de laminação.

Em laminado sanduíche deve-se tomar cuidado na escolha do núcleo em virtude da temperatura. As colméias de alumínio, de aramida e as espumas de PVC semi-rígidas tipo HT, são mais indicadas.

A indústria aeronáutica usa forno de tubulão de 2m de diâmetro com 20 metros de comprimento, para caber uma asa no seu interior.

A necessidade de forno, e um controle preciso de temperatura dificultam o processo, porém com o seu domínio há um ganho em produtividade, qualidade em termos mecânicos e redução de mão de obra utilizada no processo.

7.5 LAMINAÇÃO DE PLACAS PLANAS

Este processo é muito utilizado para construção de grandes peças planas, processo conhecido como BFPC (Basic Flat Panel Construction). O processo utiliza a pré-fabricação de grandes painéis para a posterior montagem no produto.

São preparadas placas planas e peças curvas, que servirão de transição construindo blocos, que unidos formarão um bloco maior. Peças com planos complexos não são muito adequados a este processo construtivo.

Em construção naval um processo adaptado deste sistema é o processo *Constant Camber* desenvolvido por um projetista australiano, no qual através de uma superfície com curvatura constante são produzidos todos os painéis do barco.

Para execução dos painéis é necessária a construção de mesas de laminação, que poderão ser planas curvas de pequena e média curvatura. Estas mesas têm grandes dimensões, para que se possam construir diversos elementos da peça. As mesas são construídas sobre uma estrutura de perfis metálicos ou madeira, nivelada. Sobre esta estrutura são aplicadas chapas de compensado, de

tal maneira que fiquem perfeitamente planas. Sobre os compensados são aplicadas chapas de fórmica para dar acabamento liso, no caso de se necessitar dar a peça acabada textura, esta textura deve ser incorporada ao revestimento da mesa. É necessário selar as juntas da mesa para evitar que não penetrem resina e solvente, o que poderá ocasionar danos futuros à mesa.

A escolha dos materiais aplicados à laminação em mesa deve ser resistente e leve. Para face normalmente são usados tecidos multiaxiais. Para material de enchimento a espuma de PVC de baixa densidade segundo Nasseh (2000), na faixa de 60 a 80kg/m². De acordo com o processo de laminação utilizado o material de enchimento poderá ser fornecido com cortes mais adequados.

Os núcleos de colméias ou de madeira balsa podem ser utilizados, tomando os devidos cuidados requeridos para cada material de núcleo. A balsa precisa ser impermeabilizada para não absorver resina, a colméia demanda o uso do processo a vácuo. Os produtos obtidos são resistentes e apresentam pouco peso, segundo Nasseh (2000), painéis de 60 a 80m² apresentam peso de 6kg/m² relativamente baixo quando comparado a chapas de aço de 6mm de espessura, que possuem peso de 42 kg / m².

Os processos de laminação empregados em placas planas são: laminação manual, laminação a vácuo (vacuum bag) e laminação a vácuo via seca (sistema VARTM).

Os processos são semelhantes aos processos com uso de moldes, porém apresentam algumas peculiaridades. No processo de laminação manual após aplicação do núcleo, deve-se aplicar um rolo vibrador para comprimir a espuma e promover a penetração da cola entre as juntas da espuma de PVC que é quadriculada. A confirmação do preenchimento destas frestas pode ser feita observando-se as juntas, que deverão ter cola no quadriculado. No caso de ocorrerem falhas, deve-se proceder a colmatação destas com massa, procedimento evitável, quando o trabalho é bem feito no momento da colagem.

Um recurso que facilita e acelera o trabalho é a utilização de um impregnador de tecidos, que são de custo relativamente baixo e propiciam economia de mão de obra. Com este equipamento os tecidos multiaxiais são impregnados na medida

certa e dispostos sobre a mesa, sendo a sua consolidação feita através de roletes de metal. Segundo Nasseh (2000) dois operários impregnam 3 toneladas de laminado em uma hora.

O uso de impregnador mecânico em processo vacuum bag melhora a compactação do laminado e possibilita a extração de excesso de resina produzindo um laminado com maior teor de fibras, mais resistente. Neste processo o uso de placas planas de núcleo com furos em espaços regulares ou cortes para retirada do ar é ideal.

No sistema VARTM o uso de resina de poliéster não é adequado, sendo possível seu uso em painéis de no máximo 2 m², devido ao seu tempo de gel time, ser insuficiente a completa impregnação do laminado.

As placas planas podem ser unidas de diversas maneiras. Sendo as mais usuais, por meio de perfis metálico, plástico, fibra de vidro, que podem ser encaixados, colados, aparafusados, ou rebitados.

7.6 PULTRUSÃO

Este processo é um processo de produção contínuo em que os reforços compostos de fibras contínuas, véu de superfície, mantas e tecidos são impregnados e forçados a passar em moldes com a seção do perfil.

Os moldes possuem um sistema de aquecimento que promove a cura do perfil. Após o molde estão posicionados rolos tratores que puxam o perfil. Daí advém o nome do processo, que significa puxamento. Este processo lembra o processo aplicado aos metais de extrusão, porém ao invés de empurrar o material é puxado. A Figura 7.5 apresenta o desenho esquemático do processo.

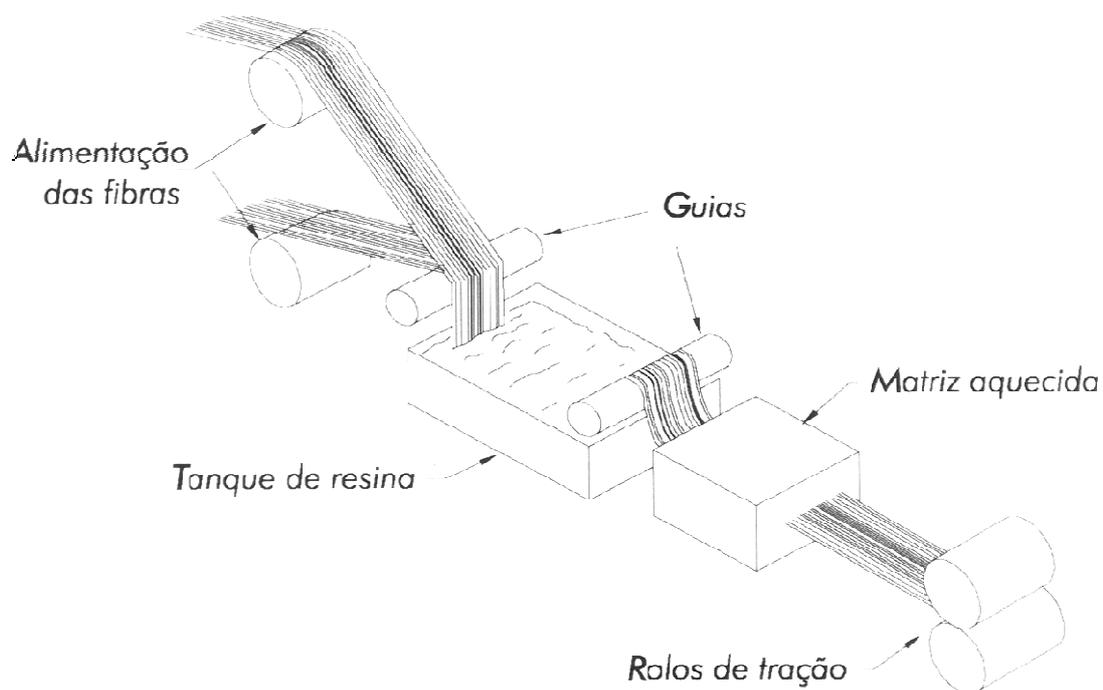


Figura 7.5 Esquema do processo de pultrusão.

Fonte: Callister 2000.

Os materiais de reforço encontram-se dispostos sobre suportes específicos, em bobina previamente cortadas, compatíveis com a seção do material a ser produzido. Guias conduzem o reforço ao tanque de impregnação, após a impregnação passam em guias conformadoras, que ajustam o reforço ao perfil do molde. Ao passar no molde o excesso de resina é retirado da fibra. Durante o tempo de passagem no molde o perfil vai sendo aquecido e a resina curada. O molde tem um comprimento de aproximadamente 1 m. A passagem do perfil pelo molde produz muito atrito. Para diminuir o atrito e reduzir o desgaste, os moldes são revestidos internamente com cromo duro e posteriormente polidos. Na Figura 7.6 têm-se dois modelos de cabeçotes de ejeção.

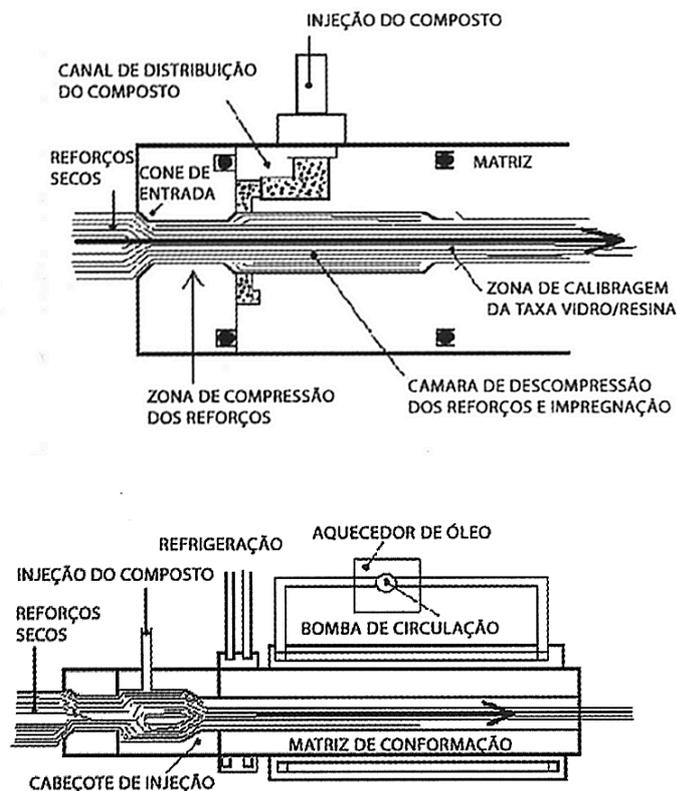


Figura 7.6 Modelos de cabeçotes de injeção.

Fonte: Revista do Plástico Reforçado – Materiais Compostos (2001).

Após o puxamento sobre mesa plana o perfil é cortado em comprimentos pré-definidos, sendo possível a sua produção com dimensões comerciais e dimensões especiais, havendo restrição apenas quanto à capacidade de transporte das peças.

Os perfis podem ser confeccionados com resina previamente pigmentada na cor especificada pelo cliente.

Os pultrudados são amplamente usados em estruturas que demandem resistência, as intempéries, química e mecânica. Podem ser produzidas peças maciças, em forma de tubo, perfis com seções complexas e seções planas.

Estes perfis associados e unidos com cola, rebites e tarugos formam estruturas complexas.

7.7 ENROLAMENTO FILAMENTAR

Este processo consiste na aplicação de fibras contínuas sobre fôrmas cônicas ou cilíndricas, denominados mandris, ao qual é impresso um movimento rotativo. Em função da maneira como é enrolado o reforço tem-se enrolamento circunferencial, helicoidal ou polar. A Figura 7.7 mostra o esquema de cada um deles.

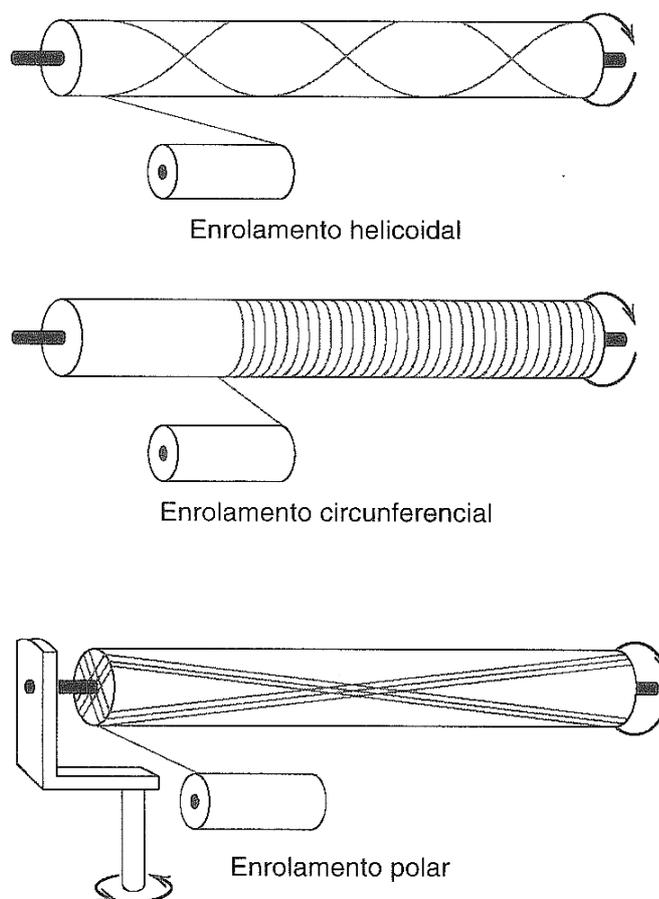


Figura 7.7 Diversos tipos de forma de enrolamento.

Fonte: Callister (2000)

O movimento simultâneo do mandril e do cabeçote alimentador gera uma hélice de passo constante sobre o mandril.

As fibras alojadas em suportes são conduzidas a uma banheira de impregnação e desta passam pelo cabeçote alimentador. Há equipamentos em que a fibra é enrolada seca e impregnada posteriormente por gravidade ou por aspersão com pistola. O equipamento para o processo é visto na Foto 7.2.

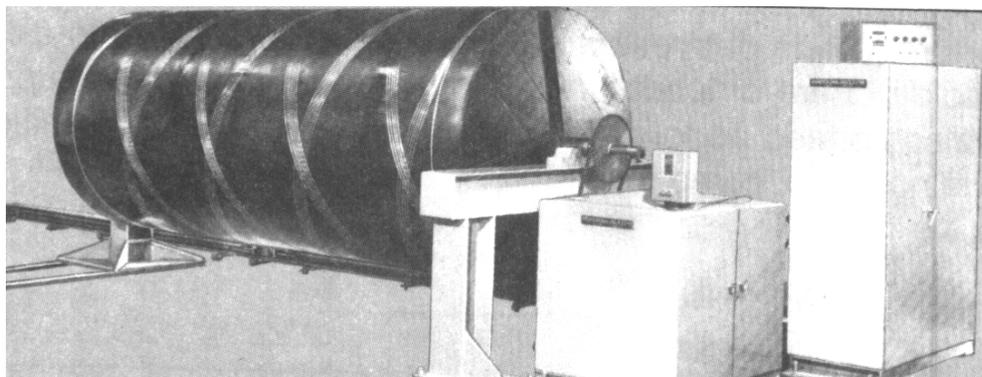


Foto 7.2 processo de enrolamento filamental

Fonte: Carvalho (1992).

Sobre o mandril é aplicado o desmoldante que pode ser cera (em peças de pequeno diâmetro) ou filmes de (mylar, melinex ou terphane), segundo Carvalho1992. Sobre a camada desmoldante é aplicada uma resina acelerada e catalisada. Sobre esta resina aplica-se o véu de superfície que pode ser manualmente ou por enrolamento. Sobre esta camada é aplicada uma camada intermediária com fibras picadas, promovendo a roletagem para retirada de ar.

O processo de enrolamento é executado então, com a impregnação das fibras contínuas em banheiras de impregnação, passando ao cabeçote alimentador que estão fixos em um carro. Este carro desloca paralelamente ao mandril, devido ao movimento de um fuso com velocidade uniforme acoplado ao movimento do mandril. O processo lembra o processo de usinagem de uma rosca em um torno mecânico.

A cada passada do cabeçote uma faixa é coberta pelas fibras, descrevendo uma hélice ângulo determinado. No retorno o cabeçote descreve uma hélice simétrica em ângulo semelhante, porém negativo. Para cobrir o mandril todo, são necessárias n passadas do cabeçote de maneira que as fibras fiquem justapostas as anteriores, sem haver superposição. Desta forma são depositadas duas camadas de fibras no mandril.

A espessura do laminado é obtida com diversas passagens do cabeçote. Quando o cobrimento do madril ocorre em uma única passada este processo de enrolamento é denominado de enrolamento circunferencial. No caso de peças com diâmetros grandes há a necessidade de se cobrir uma faixa larga, sendo impraticável devido as limitações do equipamento e a restrição quanto ao ângulo de

enrolamento, que não deve ser menor que 70°, para atender ao módulo de elasticidade axial mínimo de 50.000 kg/m².

Um artifício para ângulos de enrolamento menores é a aplicação de fibras picadas juntamente com as fibras contínuas, denominado de “hoop chop” usando o enrolamento circunferencial. As fibras picadas aumentam as propriedades circunferenciais da estrutura e as contínuas as solicitações axiais.

O ângulo de enrolamento helicoidal deve ser otimizado para atender as solicitações. Como a solicitação circunferencial é o dobro da axial há de se dispor às fibras em um ângulo tal que ocorra o equilíbrio.

Tem-se:

$$\sigma_c = 2\sigma_a$$

$$\sigma \sin 2\theta = 2\sigma \cos 2\theta$$

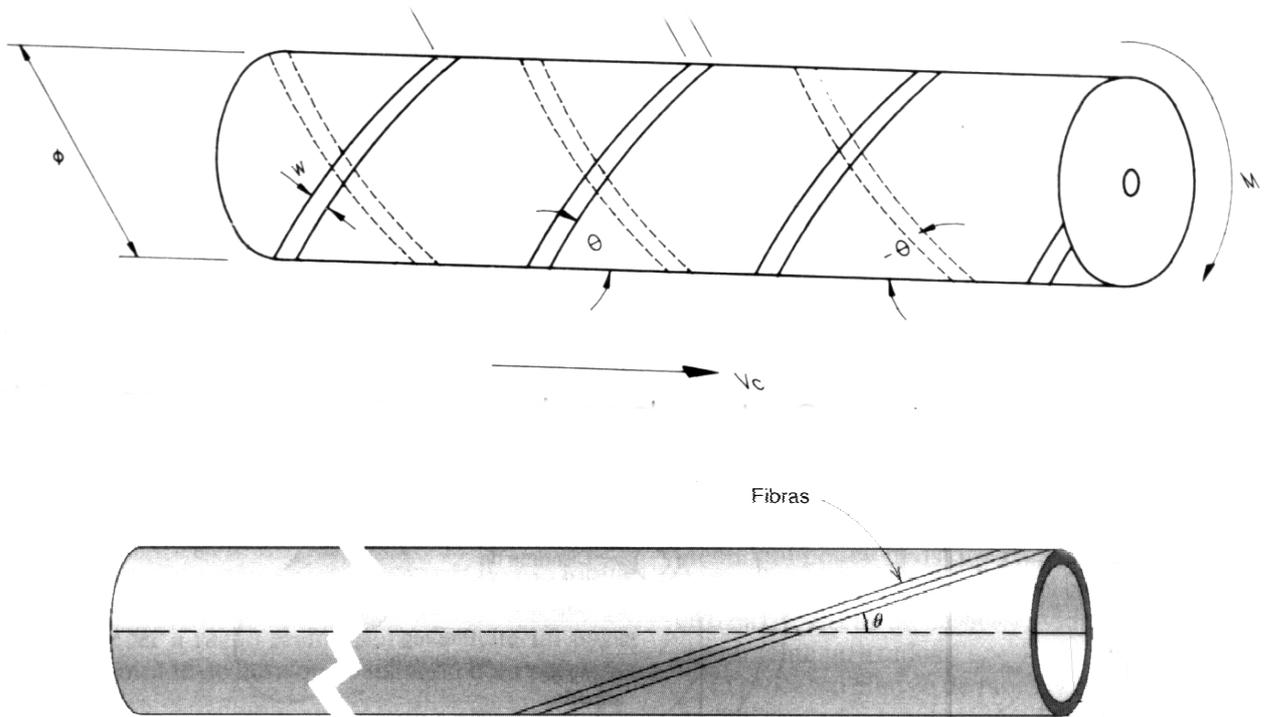
$$\operatorname{Tg} 2\theta = 2$$

$$\theta = 54,75^\circ$$

Esta premissa é válida para estruturas cilíndricas fechadas e com pressão interna, que não possua laminado interno ou intermediário, não considerando as propriedades mecânicas das resinas.

Quando a estrutura for solicitada circunferencialmente (reservatórios verticais e tubulações pressurizadas com extremidade aberta) a carga axial é igual zero. Nestes casos o ângulo de enrolamento ótimo é 90°. Nestes casos específicos adota-se enrolamento circunferencial com ângulo mais próximo possível de 90°. Na prática usa-se ângulo de 70° ou o processo “hoop chop”, sendo neste caso atendidas as solicitações de manuseio e montagem.

Algumas variáveis do processo são mostradas na Figura 7.8.



Figuras 7.8 Variáveis do processo de enrolamento.

Fonte: O autor, adaptado de Carvalho (1996) e Callister (2000).

8 PROCESSOS DE MONTAGEM E UNIÕES

Os produtos compósitos podem ser fabricados em partes para a posterior união destas partes, dentro de um conjunto maior. São diversos os fatores que determinam a necessidade de haver uniões entre peças de compósitos. Limitações de ordem construtiva, de ordem técnica, transporte e econômicas.

As uniões devem ser capazes de transmitir os esforços entre peças ligadas, sem que haja ruptura destes elementos. As ligações podem transmitir esforços de tração, compressão, flexão, cisalhamento. As ligações são verificadas em relação aos estados limites. Deve-se considerar a deformabilidade que estará sujeita a ligação. Deverão ser comparados os cálculos dos esforços resistentes aos valores dos esforços atuantes. Conforme é preconizada para elementos pré-moldados, as uniões deverão apresentar resistência superior.

Vários processos são aplicados para união entre elementos de compósito. União através de adesivo, com uso de parafusos, com uso de rebites, união com mantas e tecidos de fibras laminadas com resinas.

As ligações podem ser classificadas segundo Castro (2003), de acordo com o grau de liberdade em: ligações articuladas e ligações de continuidade. As ligações articuladas não são capazes de transmitir momentos fletores, podendo se deformar de forma infinita, estas podem ser, ligações articuladas, que transferem esforços normais e transversais ou ligações simplesmente apoiadas, que transmitem esforços transversais.

Ligações de continuidade transmitem esforços normais, transversais, e momentos fletores. Classificam-se em ligações de continuidade total (ou rígidas), aquelas que possuem resistência e deformabilidade semelhante a elementos contínuos. As ligações de continuidade parcial (semi-rígidas), apresentam certo grau de monolitismo porém permitindo deformabilidade rotacional.

A ductilidade a flexão das ligações de continuidade em peças submetidas a carregamentos cíclicos alternados, segundo Castro (2003) deve ser considerada. Estas ligações são classificadas em ligações dúcteis, que sofrem deformações elásticas sem perdas de resistência significativa e dissipam facilmente energia e ligações frágeis, que submetidas a sua capacidade de carga máxima, quando há um aumento de sua deformação têm sua resistência drasticamente reduzida, devido a baixa capacidade de dissipar energia.

Em peças estruturais as ligações podem ser ligações de pilar / pilar, pilar / viga, viga / viga, laje / viga. A Figura 8.1 mostra estes tipos de ligações.

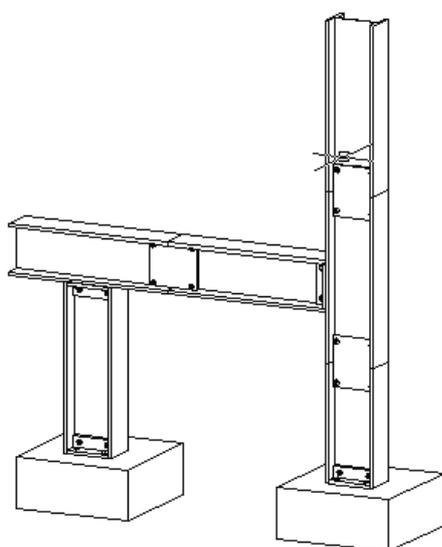


Figura 8.1 Tipos de ligações para estruturas pré-moldadas.

Fonte: O autor adaptado de Castro (2003).

8.1 LIGAÇÃO COM USO DE ADESIVOS

O adesivo é usado como ponte de aderência entre os materiais a serem unidos. Com o desenvolvimento de produtos capazes de oferecer boa união entre dois elementos, devido a sua capacidade de adesão, novas possibilidades construtivas foram criadas com a utilização deste sistema de união. Os adesivos mais populares são de base acrílica, epóxi, poliuretano e poliéster.

O uso de adesivo para união propicia a distribuição das tensões em toda a linha de adesão, não havendo concentração de tensões, propiciando selagem e das juntas. Além disso, não acrescentam peso às estruturas.

Nas peças de compósito, que serão unidas através de adesivo, deve-se prever no projeto flanges para sua colagem. Estes flanges são lixados e limpos para

posterior aplicação do adesivo. Estas são unidas com pressão até sua completa cura. A Figura 8.2 mostra as diversas possibilidades de adesão entre elementos planos.

Para se obter união entre placas planas lisas, são usados pedaços de material com superfície plana para alinhar as superfícies, aos quais aplica-se pressão com grampos, material que será posteriormente removido. Um filme de papel celofane é colocado entre a superfície de contato das peças a serem coladas e o material de alinhamento, para obter-se um melhor acabamento e não aderir.

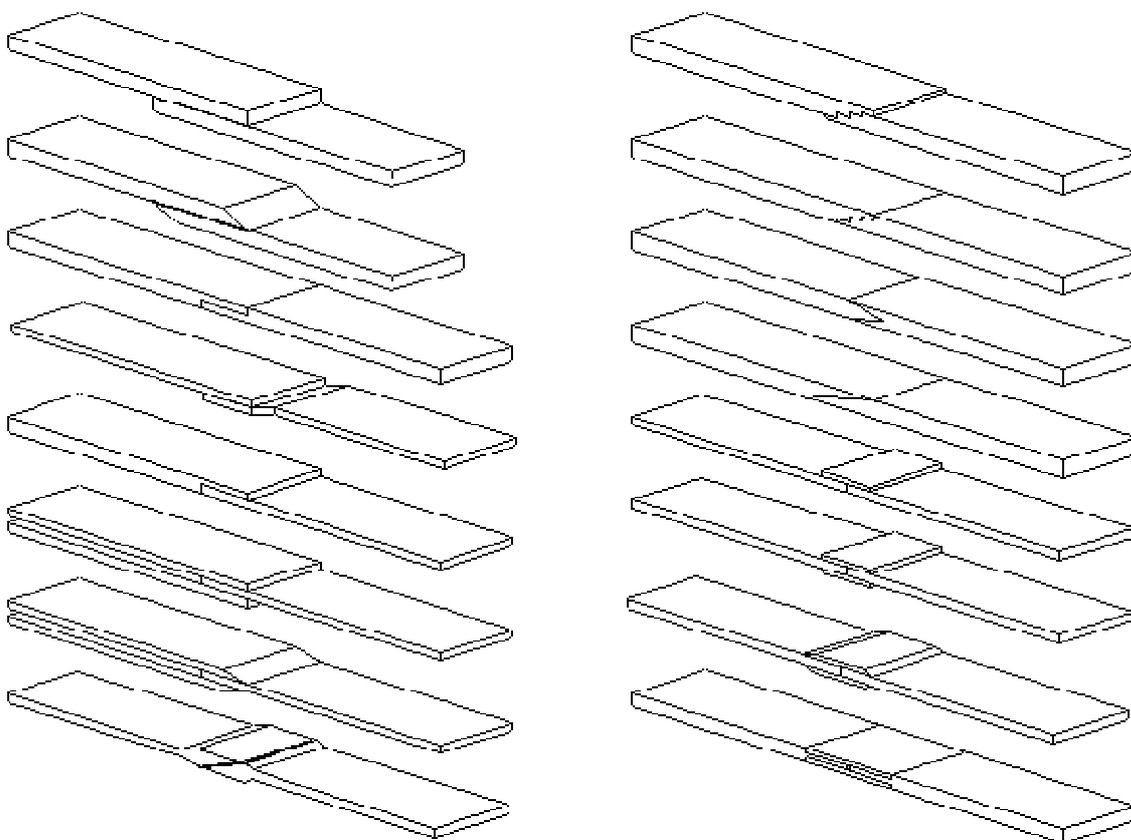


Figura 8.2 Diversos tipos de união de peças planas.

Fonte: O autor adaptado de manual de laminação Owens Corning (1992).

As fixações de topo a 90° e em ângulo reto, não produzem bons resultados, devido a pouca área de união entre o adesivo e o laminado. Na Figura 8.3 A e 8.3 B são exemplificados estes tipos de junta mais adequadas e as não aconselhadas.

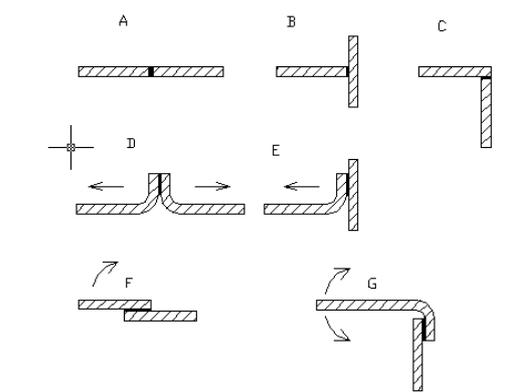


Figura 8.3-A Juntas inadequadas.

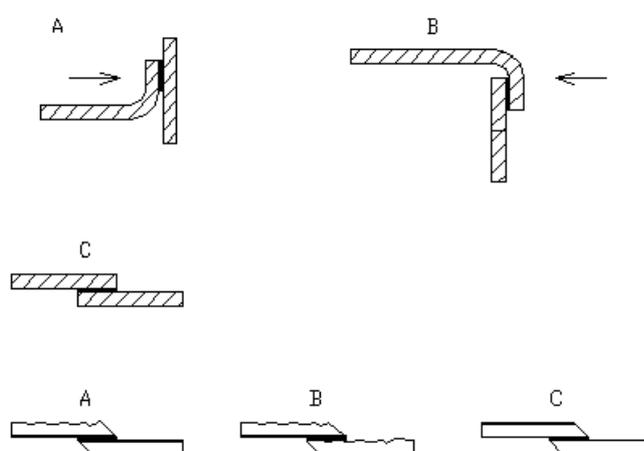


Figura 8.3-B Juntas adequadas e junta plana sobreposta com face com gel coat
Fonte: Plessis (1996).

Em peças que não possa aparecer à união; caso típico da união entre peças planas pré-moldadas é usual a utilização de juntas coladas com chanfro das partes a serem unidas, para haver o aumento da superfície de adesão.

De acordo com a solicitação a que será submetida à peça, procede-se à laminação de camadas de manta e tecido nas áreas internas não acabadas do laminado. Nas peças que não haja preocupação com acabamento é possível proceder à laminação de reforço nas duas faces. Estas áreas deverão ser previamente preparadas através de lixa e limpas com solvente, para o desengraxe da superfície. Várias configurações são possíveis de serem adotadas como se pode ver na Figura 8.4.

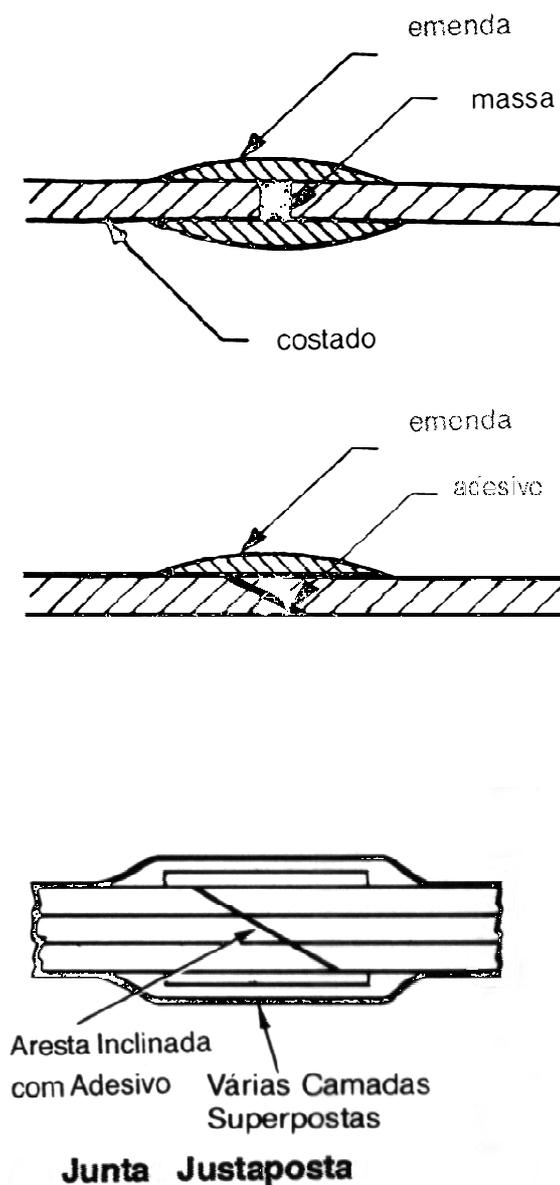


Figura 8.4 Juntas superpostas.

Fonte: O autor adaptado de Manual de laminação Owens Corning.(1992).

A superfície de adesão deve ser lixada, para a retirada de materiais nocivos a adesão, limpas com produto desengraxante e secas. É processada a mistura e homogeneização dos componentes do adesivo, resina e endurecedor. Sobre as superfícies de contato é aplicada uma camada uniforme de aproximadamente 1 a 2mm, sendo então as peças unidas e submetidas a pressão para se obter o íntimo contato, não permitindo a presença de vazios, até a cura total do adesivo. As peças só devem ser submetidas a esforços após a plena cura do adesivo.

Os adesivos são caracterizados pela elevada resistência à tração e compressão, porém não resistem satisfatoriamente ao esforço cortante.

As altas temperaturas afetam o desempenho característico. Devido a sua origem polimérica.

Os adesivos estruturais existentes no mercado são formulados com resinas epoxídicas, devido a sua grande capacidade de adesão e a elevada resistência mecânica. Estes adesivos são formulados com dois componentes, um é a resina e o outro é o endurecedor. De acordo com a formulação do endurecedor e das resinas, diversas configurações de gel time, viscosidade, e cura com a presença de umidade são possíveis de serem obtidas.

8.2 LIGAÇÃO COM PARAFUSOS

As ligações com parafusos para peças estruturais são semelhantes às realizadas em estruturas metálicas, com a utilização de elementos de ligação.

Segundo Castro em aparafusamento normais ao eixo dos elementos há a necessidade de se preencher as folgas entre os furos e os parafusos. Os parafusos aplicados em sistema de união podem ser de três tipos: comuns, ajustados e de alta resistência.

Os parafusos comuns são produzidos pelo processo de forja em aço carbono de médio teor. Ao serem aplicados os parafusos produzem aperto na chapa. Devido à intensidade de aperto ser variável, o cálculo de suas dimensões é feito baseado em tensão de apoio e cisalhamento.

Os parafusos ajustados apresentam maior rigor em suas dimensões produzindo melhor acoplamento aos furos, com menores folgas. Seu uso é oneroso devido ao elevado custo.

Os parafusos de alta resistência são fabricados em aço temperado, os esforços de tração que resistem são controlados. Podem ser calculados para resistir ao deslizamento das chapas através de coeficiente de segurança contra deslizamento, produzindo uma ligação por atrito. Quando pequenos deslizamentos são admitidos, devem ser majoradas às tensões admissíveis, resultando em uma ligação tipo apoio.

Alguns critérios são adotados em juntas com parafusos, como os mostrados na Figura 8.5.

Espessura do laminado	A Min.	B Min.	C Min.
Até 3 mm	3 x •	2 x •	5 x •
3 a 5 mm	2,5 •	1,5 x •	5 x •
Mais de 5mm	2 x •	1,25 X •	5 x •

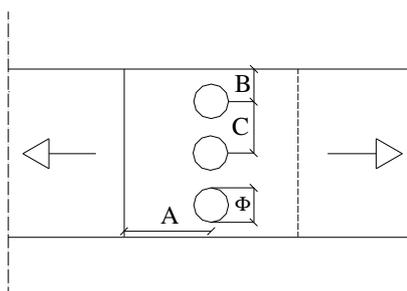


Figura 8.5 geometria de juntas mecânicas.

Fonte: Guia de laminação a pistola Owens Corning (1992).

Devem ser analisadas as orientações das fibras, deformações, e temperaturas a que serão submetidas às peças.

Em peças de forma irregular, o uso de parafuso para união pode ser por meio de flange ou sobreposição. Quando houver necessidade de acabamento são usados perfis. Como é mostrado na Figura 8.6.

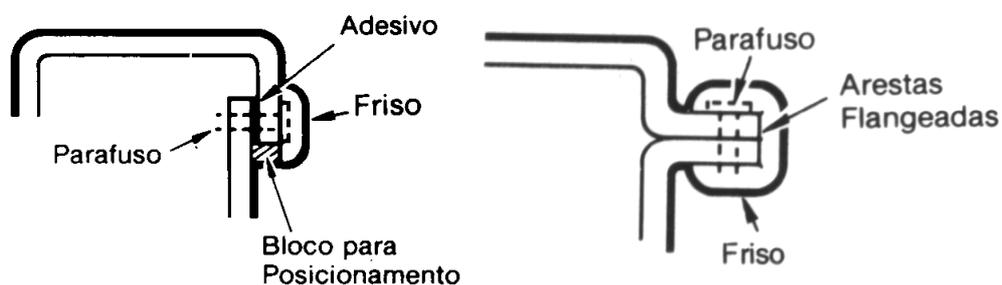


Figura 8.6 Junta sobreposta e junta flangeada com fixação com parafuso.

Fonte: Manual de laminação Owens Corning (1992).

Em peças estruturais é comum o uso de elementos de ligação, que podem ser chapas, cantoneiras, perfis "T", conforme projeto. Na Figura 8.7 são mostrados alguns exemplos.

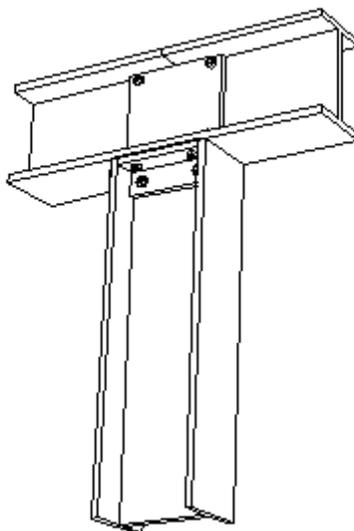


Figura 8.7 Ligações em peças estruturais com parafusos.

Fonte: o autor adaptado de Castro (2003).

Segundo Castro alguns procedimentos devem ser adotados:

- Lubrificar porcas e parafusos
- Alinhar as peças a serem unidas
- Aplicar torques adequados aos parafusos, assegurando perfeita união entre as peças.

As ligações entre materiais compósitos ainda carecem de estudos devido a fatores que devem ser considerados no projeto tais como: orientação das fibras, deformações e os efeitos das temperaturas elevadas.

9 ENSAIOS EM COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

Os materiais compósitos podem ser submetidos a diversos tipos de ensaios, que podem ser: de desenvolvimento, de qualificação, de aceitação. Os ensaios de desenvolvimento procuram certificar a exeqüibilidade de determinado produto, item ou componente. Ensaio de qualificação procura determinar a capacidade de um processo produzir itens, componentes e produtos conforme especificação e verificar se estes resistam a condições de operação especificadas. Os ensaios de aceitação avaliam o produto, item ou componente, a fim de verificar a conformidade com os requisitos de projeto.

Os ensaios são classificados em: destrutivos (mecânicos), semidestrutivos e não destrutivos segundo Castro (2004).

9.1 ENSAIOS MECÂNICOS (DESTRUTIVOS)

Os ensaios mecânicos danificam a peça aos quais submetem, impossibilitando o posterior uso da estrutura, segundo Castro (2004). Como exemplo, ensaio de compressão, tração, impacto, resistência à propagação de chama.

Estes ensaios apresentam como desvantagens:

- Não são aplicáveis à mesma amostra;
- As áreas ensaiadas não podem ser colocadas em serviço;
- Não são exeqüíveis em qualquer componente;
- São de custo proibitivo para alguns elementos;
- Necessitam preparo de corpo de prova;

- Em determinadas situações os corpos de prova não podem reproduzir fielmente o comportamento do produto final.

Apresentam as seguintes vantagens:

- Obtêm medições diretas;
- Fornecem resultados quantitativos;

Os ensaios aplicáveis aos compósitos são: tração, flexão, impacto, absorção de água e umidade, envelhecimento acelerado, delaminação, teor de fibras, abrasão, resistência ao ataque químico.

9.2 INSPEÇÃO VISUAL

Algumas anomalias podem ser constatadas pelo exame visual. Importantes elementos são obtidos, tais como: fissuras, deformações, bolhas e oclusões de ar no laminado, quando não houver acabamento superficial. A inspeção visual serve de indicio indicativo de áreas que deverão ser inspecionadas mais apuradamente através de outros métodos.

9.3 ENSAIOS EM PLACAS DE SINALIZAÇÃO EM POLIÉSTER REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO

A associação brasileira de normas técnicas (ABNT), através da NBR 13275 estabelece norma para ensaio e recebimento de placas planas de poliéster reforçado com fibra de vidro, produzidas por processo de laminação contínua ou prensagem a quente, para sinalização viária.

A norma acima tem como referência as normas ASTM D 638, ASTM D 790, ASTM D 570, ASTM D 2583, ASTM D 256, ASTM C 177, ASTM D 11930, ASTM D 696, ASTM D 648, ASTM D 1499.

O ensaio executado nesta dissertação foi o de resistência à tração. Este ensaio segundo estabelece a NBR 13275 tem como base a norma ASTM D 638.

O ensaio de resistência à tração fornece os valores do limite de resistência, módulo de elasticidade, alongamento percentual e razão de Poisson à temperatura ambiente, opcionalmente.

O teste determina as propriedades de tração de plásticos reforçados e não reforçados, em corpos de prova padronizados a temperatura, umidade e velocidade de deslocamento das garras definidas.

Este teste é usado em materiais com espessura de até 14 mm, sua utilização é adequada ao controle e especificação de material plástico para projeto de engenharia. Seus resultados devem ser expressos no Sistema Universal (SI) de unidades.

A preparação dos corpos de prova influencia nos resultados dos ensaios devendo haver uma uniformidade na preparação. Outro fator que influencia no resultado é a velocidade de deslocamento das garras e as condições ambientais, fatores que devem ser controlados cuidadosamente.

Os corpos de prova são obtidos a partir de placas dos materiais, sendo a sua conformação as dimensões normalizadas, executada por intermédio de máquina de corte de mármore provida de disco diamantado ou calçadas com widia. Durante o corte deve-se proceder à refrigeração da ferramenta, para evitar o superaquecimento do material e conseqüente modificação de suas características.

A garantia da fixação às garras da máquina universal de ensaio é conseguida com o uso de enchimento nas duas faces do espécime com camadas do mesmo compósito. Este procedimento também evita a ruptura do corpo de prova junto à garra fato de ocorrência indesejável segundo a norma.

Os equipamentos usados para o teste são: máquina de ensaio a tração com deslocamento da garra a velocidade constante, paquímetro e termômetro.

Para o material do estudo em questão, o corpo de prova deve ser do tipo I.

O procedimento de ensaio consiste na medição da largura e da espessura do corpo de prova, com o uso de paquímetro em diversos pontos ao longo de seu comprimento. Se fixa o corpo de prova às garras alinhado com a linha imaginária que une da fixação das garras a máquina. Coloca-se o extensômetro na região de ruptura, zerando se o relógio comparador.

Aplica-se a carga a velocidade de deslocamento de 50 mm / min. Anotam-se as cargas correspondentes a variações constantes da deformação, no caso do ensaio aplicado fixou-se em 0,02mm a deformação. A precisão é função da quantidade de pontos plotados.

Para se obter o valor da tensão divide-se as respectivas cargas pelas áreas das amostras.

O material compósito sinaliza por meio de vibração o momento da primeira trinca, neste instante retira-se o extensômetro, em prossegue-se a aplicação de carga até a ruptura total. A ruptura total é confirmada pelo manômetro, cujo ponteiro cai rapidamente à pressão.

O módulo de elasticidade é obtido plotando as tensões com as respectivas deformações. Sendo o módulo expresso pelo coeficiente angular da reta ajustada aos pontos plotados.

O cálculo da tensão máxima é obtido dividindo-se a carga máxima em Newton, pela seção mínima do espécime em metro quadrado sendo o resultado expresso em Pascals.

A norma NBR13275 estabelece que as placas que não atenderem as características deverão ser rejeitadas. O Quadro 9.1 apresenta os valores prescritos na NBR 13275.

Característica	Unidade	Processo de fabricação	
		Laminação contínua	Prensagem a quente
Alongamento (ASTM D 638) mínimo	%	1,7	0,55
Resistência à tração (ASTM D 638), após 300 h de intemperismo artificial (mínimo)	MPa	85,00	65,00
ASTM 1499, Método1-Variação máxima.	%	10,0	10,0
Resistência à flexão (ASTM D 790) (mínimo)	MPa	130,00	130,00
Módulo de elasticidade à tração (ASTM D 638), após 300 h de intemperismo artificial (mínimo).	MPa	5000,00	5000,00
ASTM D 1499, Método 1- Variação máxima.	%	50,0	50,0
Módulo de elasticidade a flexão (ASTM D 790)	MPa	5000,00	5000,00
Absorção de água (ASTM D 570) (máxima).	%	1,0	1,0
Dureza Barcol(ASTM D 2583) (mínimo)	%	35	35
Impácto- Ensaio Izod (ASTM 256) (mínimo)	Kj/m ²	24,5	24,5
Condutividade térmica (ASTM C 177) (máximo)	W/m ³	3,5	3,5
Massa específica (NBR 11936)	Kg/m ³	1250 a 1350	1800 a 2000
Coeficiente de dilatação linear (ASTM D 696) (máximo)	M/m °C	36 x 10 ⁻⁶	36 x 10 ⁻⁶
Resistência à temperatura (ASTM D 648)	°C	60	60

Quadro 9.1 Características de chapas de FRP para sinalização.

Fonte: ABNT, NBR 13275.

Alem destes ensaios deverão ser submetidos ao ensaio de teor de vidro em conformidade com os procedimentos constantes na norma NBR 13275.

10 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi elaborado para desenvolver placas de sinalização viária em compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de origem vegetal. Neste sentido foram realizados ensaios preliminares com os dois tipos de reforço de fibras: sisal e piaçava.

O processo de laminação manual foi utilizado para confeccionar placas de dimensões reduzidas. A dificuldade de conseguir o picotamento das fibras em picotadores existentes no mercado, utilizados para os fios sintéticos foi o principal obstáculo para o processo de laminação manual. As fibras não são picadas devido à flexibilidade.

Outra dificuldade encontrada foi à impregnação das fibras, devido à pequena absorção de resina. Esta característica provoca a flutuação das fibras de sisal, não havendo uma adequada dispersão na matriz, isto é as fibras ficam segregadas na superfície da matriz. As Fotos 10.1, 10.2 mostram os resultados dos ensaios preliminares.



Foto 10.1 Fibras segregadas da resina na superfície da matriz

Fonte O autor



Foto 10.2 Fibras de piaçava segregadas na superfície do laminado

Fonte O Autor

Em virtude dos resultados dessa primeira etapa de experimento, foi executada uma outra série de testes, picotando as fibras manualmente com uma tesoura. As fibras picotadas eram adicionadas a matriz, procedendo-se à mistura manualmente. Este composto de fibras e matriz foi lançado em uma fôrma de plástico e em seguida aplicou-se pressão para a conformação do material. Desta forma o processo mostrou-se mais adequado à produção de placas, resultando em um compósito mais homogêneo.

Entretanto, na produção de placas de maiores dimensões foi constatado que o processo não se mostrava adequado. Neste caso, a alta concentração de resina, resultou em fissuração devido à retração, como se observa na Foto 10.3.



Foto 10.3 Fissura devido à retração da matriz.

Fonte: O autor

Para combater a fissuração conforme visto na revisão bibliográfica capítulo VI sobre cargas, foi adicionada a matriz carga de talco industrial na relação 1:1, esta

adição melhorou substancialmente a qualidade do produto facilitando a produção do compósito. A carga reduz a contração da matriz e evita à fissuração.

Foram testados dois tipos de carga o talco industrial, material de uso comum em compósito, e o rejeito de corte de pedras ornamentais. Desta forma, era possível comparar os dois tipos de cargas minerais e estudar a viabilidade da substituição do talco pelo rejeito adotado no estudo.

O processo escolhido foi o de prensagem à temperatura ambiente. Esta escolha foi baseada nos estudos experimentais acima resumidamente descritos.

O estudo baseou-se em processo mais simples de execução devido ao fato dos processos mais elaborados demandarem equipamentos e adequação dos processos aos materiais em estudo.

10.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAS

Foi realizada a caracterização dos materiais como descrito a seguir.

10.1.1 Fibra de sisal

As fibras de sisal segundo Akil (1992) apresentam as seguintes características físicas e mecânicas:

- Massa específica (kg/m³) : 1270
- Absorção de água em peso (%) : 239
- Resistência a tração (MPa) : 458
- Módulo de elasticidade (MPa) : $15,2 \times 10^3$
- Alongamento na ruptura (%) : 4,30

O tecido usado como reforço foi obtido da empresa FIBRASA S.A. oriundo de dois lotes diferentes. Destes lotes foram retiradas amostras com dimensões de 250mm x 20 mm para serem preparados corpos de prova a serem ensaiados a tração.

Para transferir a carga da garra ao corpo de prova, foi executada uma “zona de transição”. Desta forma, evitou-se a “mordida” e conseqüente ruptura do corpo de prova na seção da garra.

Esta zona de transferência foi executada com lâminas de compósito em cada face. Foi usado tecido impregnado com matriz polimérica e carga. A Foto 10.2 mostra o corpo de prova fixado as garras da máquina, a Foto 10.3 mostra o corpo de prova rompido.



Foto 10.2 Corpo de prova fixado a máquina de tração.

Fonte: O autor



Foto 10.3 Corpo de prova de tecido rompido a tração.

Fonte: O autor

Estes corpos de prova foram ensaiados a tração em máquina universal com velocidade de deslocamento das garras de 1mm/min. a temperatura ambiente de 27,3°C e umidade do ar de 68%. Os resultados obtidos nos ensaios são os apresentados na tabela 10.1.

Foi realizada a análise estatística de homogeneidade nos valores da Tabela 10.1. O teste de hipóteses indicou que a amostra é homogênea.

A aplicação do teste de hipótese indica com probabilidade de 95%, que a média da carga de ruptura da amostra é de 59,68 MPa.

Tabela 10.1 - Resultados de ensaio de tração do tecido.

Ensaio de tração TECIDO	
Identificação da amostra	tensão de ruptura Mpa
1	53,469
2	54,348
3	56,536
4	59,463
5	60,530
6	73,735
média	59,680
s	7,419
t _{0max.}	1,894
t _{0min}	0,837
t _{0,05; 5}	2,571

$t_{max} < t_{(0,05;5)}$ aceita-se a hipótese principal média= 59,68 MPa

Fonte: O autor

10.1.2 Resíduo de corte de pedra ornamental

Foram coletados dois lotes de resíduo de corte de pedra ornamental em depósito de uma indústria colhidos de maneira aleatória. Os resíduos se apresentavam endurecidos devido a sua retirada de tanques de decantação. O uso do material como carga necessitava de um beneficiamento prévio, para desagregação e retirada de grão de dimensões inadequadas ao uso. Na Foto 10.4 observa-se a variação de tonalidade do material colhido.



Foto 10.4 material colhido em forma de torrões.

Fonte: o autor

Foram executados os seguintes tratamentos:

- Destorreamento por prensagem através de rolo metálico.
- Secagem em estufa a temperatura de 110^o C por um período de 48 horas
- Peneiramento do material em peneira 100 #.

A Figura 10.1 apresenta o fluxograma do processo.



Figura 10.1 Fluxograma do processo de tratamento do rejeito.

Fonte: O autor

O material retido na peneira foi descartado. O material remanescente do processamento apresentou a forma puerolenta, muito semelhante a carga de talco industrial, porém com coloração variando em tonalidades de cinza claro ao escuro, Foto 5. Esta característica é devido a composição química da rocha de origem do material cortado.



Foto 10.5 Resíduo colhido e tratado

Fonte: O autor

10.1.3 Resina de poliéster

A resina utilizada nos ensaios foi a resina ARAZYN 4.9, de poliéster tereftálica, de reatividade média, pré-acelerada com octoato de cobalto.

10.1.3.1 Especificações do produto

A resina de poliéster ARAZYN 4.9 apresenta as seguintes especificações técnicas fornecidas pelo fabricante AR QUÍMICA, conforme certificado de análise:

- Intervalo simples, min. : 8,05
- Pico isotérmica °C : 178,0
- Viscosidade BKFD 25°C SP 2/30 RPM, CP : 315,0
- Gel Time a 25°C (min.) : 11,60 min.
- Tixotropia a 25 ° sp 2/6-60 rpm : 1,56 .
- Aspecto : Turvo
- Índice de acidez (mg KOH / g) :17,0
- Teor de sólidos % P :57,6

Fonte: BANDEIRANTE QUÍMICA / MAUÁ

10.2 PRODUÇÃO DE PLACAS DE COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADO COM FIBRAS VEGETAIS.

Os padrões dimensionais de placas de sinalização obedecem as normas do DNER, de acordo com o tipo de local a ser afixado, e conteúdo informativo a ser transmitido.

O tamanho escolhido foi de 1,00 m x 0,50 m, padrão utilizado pela CETE-RIO, no município do Rio de Janeiro para ensaio de campo, conforme Foto 10 6.



Foto 10. 6 - Padrão usado no ensaio de campo, para placa de sinalização.

Fonte: O autor

10.2.1 Fôrma para moldagem da placa

Para a moldagem da placa há a necessidade de uma fôrma que possa manter a estabilidade dimensional e não sofra deformações.

O material escolhido foi o compensado de 20 mm de espessura, ao qual foi aplicado um revestimento de laminado melamínico para dar acabamento superficial e capacidade de resistir aos produtos de laminação.

Duas placas de compensado foram preparadas, medindo a primeira 1,10 m x 0,53 m e a segunda, 0,99 m x 0,49 m. Procedeu-se o revestimento em uma das faces com laminado brilhante usando cola de contato produzida pela indústria ALBA, adquirida em casa comercial de produtos para madeira, de acordo com as especificações do fabricante.

Na chapa de maior dimensão, foi fixada bordas limitadoras para não extravasar do material polimérico, conforme se pode observar na Figura 10.2.

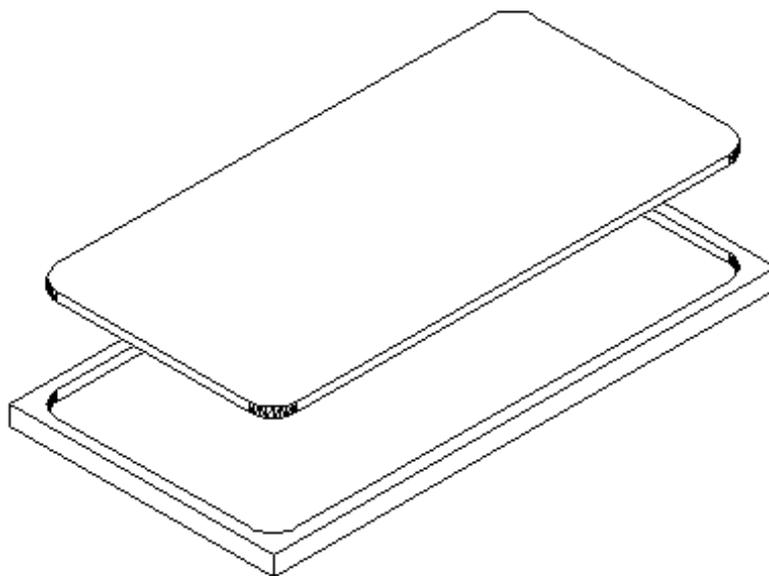


Figura 10.2 Perspectiva da forma para produção da placa.

Fonte: O autor

Nestas bordas foi aplicada, massa produzida com resina de poliéster e talco industrial, para prevenir algum vazamento e isolar a madeira. Procedimento semelhante ao adotado na construção de moldes.

A placa de prensagem foi revestida com o mesmo laminado na face de contato com o compósito, sendo seus topos chanfrados em ângulo de 5° e arredondada as arestas. Posteriormente foram impermeabilizados com resina de poliéster.

10.2.2 Prensa para moldagem

A prensa para moldagem foi construída com peças de madeira de lei com as dimensões de 1,00m x 0,075m x 0,075m. Foram utilizadas quatorze peças, oito para a prensagem funcionando aos pares e três em cada face da fôrma de tal maneira que houvesse uma distribuição uniforme de pressão. Entre as peças de prensagem foram posicionados quatro parafusos de diâmetro 30 mm, fixado a uma placa de aço de 5mm de espessura medindo 0,20 cm x 0,15 cm. Nos parafusos junto à porca foi colocado um flange, para distribuir a pressão nas peças de prensagem que irão

transmitir as peças de distribuição de carga, possibilitando uniformidade de pressão na superfície de moldagem, como, mostra as Figura 10.2 e 10.3.

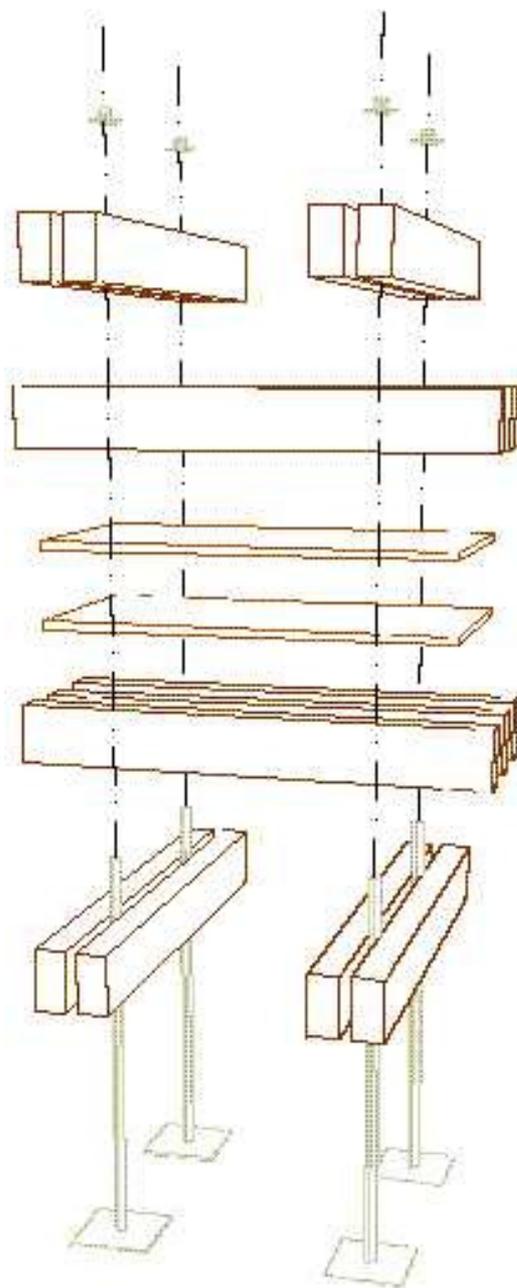


Figura 10.2 esquema explodido da prensa usada para moldagem da placa.

Fonte: O autor.

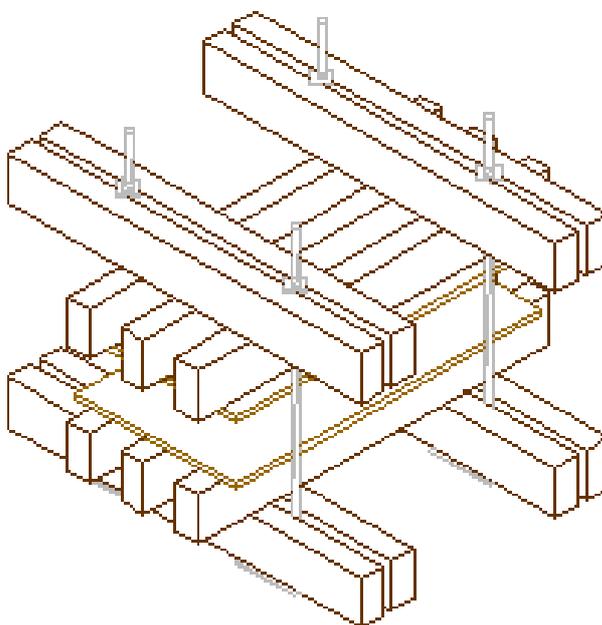


Figura 10.3 prensa montada.

Fonte: O autor

10.2.3 Equipamentos utilizados

Os seguintes equipamentos foram utilizados para a moldagem:

- Recipientes de plástico para mistura.
- Haste de madeira para homogeneização.
- Becker graduado para dosagem de catalisador.
- Furadeira de coluna dotada de misturador helicoidal.
- Balança para pesagem dos materiais.
- Espátulas de aço

10.2.3 Materiais utilizados:

- Tecido de sisal.
- Mistura de rejeitos de fiação de sisal.
- Resina de poliéster.
- Rejeito de corte de pedra ornamental.

- Talco industrial.
- Catalisador.
- Pigmento disperso em pasta não reativa de poliéster.
- Cera desmoldante de carnaúba.
- Álcool polivinílico

10.2.4 Formas e dimensões das placas

O modelo adotado para produção das placas foi o de 1,00m x 0,50m x 0,003m. Com os cantos arredondados com raio de 5 cm. Este padrão de placa adotado na empresa CET-RIO para ensaios de campo.

A placa a ser fornecida ao laboratório da CET-RIO para os ensaios foi produzida com a adição de pigmento preto na matriz polimérica a pedido do engenheiro responsável pelos ensaios.

10.2.5 Dosagem dos materiais para a laminação

Com base em dados obtidos de Bigno (2002), foi adotado a formulação básica de uma parte de resina, para uma parte de carga em peso.

Foram preparadas placas, com talco industrial e rejeito de corte de pedras, provenientes de duas partidas distintas, coletadas em períodos defasados de 30 dias para que se houvesse modificação nas rochas de origem, fosse possível verificar a variação nos resultados dos ensaios.

A resina e a cargas foram pesadas e misturadas. A formulação com talco apresentou viscosidade adequada, porém a formulação com rejeito apresentava menor viscosidade, havendo necessidade de ajuste.

Preparou-se uma terceira, formulação com rejeito, com o acréscimo de 25% em peso. O acréscimo melhorou a viscosidade da massa adequando-a ao processo utilizado. Nesta terceira formulação a proporção de carga foi para 60%.

10.2.6 Preparo da fôrma

A fôrma foi lixada nas bordas e juntas calafetadas com massa, para retirada de toda irregularidade e limpa, com redutor.

Após a limpeza foram aplicadas três camadas de cera desmoldante em camadas cruzadas, não permitindo a secagem completa e retirando o excesso em cada operação.

Polida a cera, aplicaram-se duas camadas cruzadas de álcool polivinílico com trincha. Esperado o tempo de secagem do álcool para consolidação do filme desmoldante. Com o filme seco, procedeu-se a moldagem.

10.2.7 Moldagem das placas

Estando a forma preparada e montada sobre a prensa, iniciou-se a preparação da massa, pesando-se separadamente os componentes e processando a mistura através inicialmente de bastão e para perfeita homogeneização usou-se um misturador acoplado a uma furadeira de bancada por um período de três minutos, visto em detalhe na Foto 10.7.

As misturas preparadas com resina pré-acelerada foram acondicionadas em recipientes de plástico, para o posterior uso.



Foto 10.7 Misturador acoplado a furadeira de bancada

Fonte: O autor.

Procedeu-se o corte do tecido em dimensões de tal forma que tivessem folga em relação as laterais da forma, e posterior procedeu-se à pesagem do material Foto 10.8.



Foto 10.8 tecido cortado.

Fonte: O autor

Foi calculado o volume necessário à moldagem da placa, considerando a espessura da placa acabada de 3,5 mm. Da quantidade necessária ao completo enchimento do molde foi descontando o volume ocupado pelos diferentes tipos de material de reforço, tecido e rejeito de rebarbação de fio.

Para moldagem a mistura foi catalisada com MEKP na proporção de 1 % em peso e misturada por 1 minuto. A massa foi dividida em duas partes iguais, sendo a primeira parte vertida na forma e distribuída em camada homogênea, sobre esta camada foi depositado o tecido e acamado a mistura, com o uso de espátula.

Sobre este substrato foi aplicada, a mistura remanescente e procedida a distribuição de forma homogênea.

Sobre o material foi colocada a placa de prensagem, sobrepostas a esta, as peças de reforço e aplicado carga através do aperto dos quatro parafusos uniformemente, proporcionando uma distribuição da carga uniformemente em todos os pontos da placa. Não foi medida a carga aplicada.

Quando foi verificado o afloramento da resina entre o molde e a placa de prensagem suspendeu-se o aperto dos parafusos e deixou-se curar a resina.

Para a desmoldagem foi observado o tempo de gel time, a exotermia e cura. A cura foi confirmada por meio de testemunho moldado com massa retirada da partida de moldagem e posta em uma pequena forma.

Estes procedimentos foram adotados para a moldagem das placas que utilizaram o tecido como reforço.

Para as placas moldadas com rejeitos de fibras de fiação Foto 10.9, foi aplicado outro procedimento.



Foto 10.9 - Rejeito de fibras de sisal.

Fonte: O autor

A massa previamente preparada foi adicionada uma quantidade de fibras em peso correspondente a 10% da massa, esta relação foi a adotada como base para o início da moldagem sendo feito posteriormente ajustes se necessário em função da trabalhabilidade e qualidade do produto. Após a mistura manual com o uso de bastão de madeira, procedeu-se a mistura com misturador mecânico em baixa rotação até a completa homogeneização. A esta mistura acrescentou-se o catalizador MEKP em peso no teor de 1%, relativo à quantidade de resina. Procedeu-se à mistura com o misturador mecânico durante o tempo de 2 minutos para perfeita homogeneização.

A massa resultante foi distribuída no molde de maneira uniforme e prensada como no procedimento anterior para a manta, sendo deixado curar por doze horas.

Os produtos resultantes das diversas moldagens apresentaram-se uniformes e com o acabamento superficial liso. As placas feitas de partidas diferentes de rejeito apresentaram coloração variando do cinza escuro ao cinza claro, devido à procedência da pedra de origem.

As placas a serem usadas em ensaio de campo e testes pela CETRIO foram pigmentadas de preto fosco como solicitado. Na Foto 10.10 é visto o aspecto da placa pronta.



Foto 10.10 Placa pronta para ensaio de campo.

Fonte: O autor

10.3 PREPARO DE CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO

Os ensaios em materiais compósitos apresentam peculiaridades, devido ao fato de nos processos convencionais de ensaios de tração em materiais metálicos quando usados em compósitos, apresentam o inconveniente de concentrar tensões junto à garra. Técnicas de preparação específica têm sido utilizadas, de maneira a transmitir de forma indireta as tensões. Alguns processos têm sido desenvolvidos para padronização dos ensaios. O procedimento adotado foi o de colar uma chapa de cada lado do corpo de prova para propiciar proteção e possibilitar a fixação na garra.

Este processo em ensaios preliminares não se mostrou eficiente, devido ao fato de não se conseguir perfeito paralelismo entre placas metálicas. Esta dificuldade de fixação acarretava o giro da peça na garra tornando o ensaio não confiável.

Como opção ao método anterior foram laminadas duas camadas de compósito em cada face de contato com a garra, de maneira a ser obtida uma espessura final de 10 mm.

Das placas produzidas com as diversas formulações e reforços, foram extraídos corpos de prova com as seguintes dimensões: 250 mm x 20 mm x 3 mm, conforme Figura 10.5 com base em ASTM D 638-98.

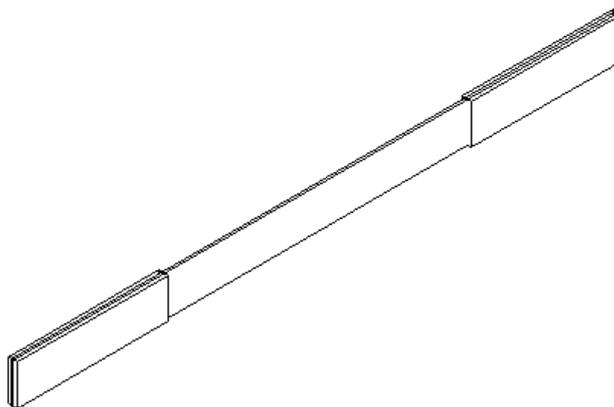


Figura 10.5 Corpo de prova para ensaio de tração.

Fonte: O autor.

Para execução desta transição a placa foi cortada na medida do comprimento do corpo de prova com largura de 0,50 m e feito o reforço em toda a sua largura.

Preparou-se então um gabarito e procedeu-se o corte dos corpos de prova com máquina de corte de mármore, provida de disco diamantado. O corte foi executado com refrigeração de água corrente.

Para cada formulação foram ensaiados seis corpos de prova escolhidos aleatoriamente em universo de dez.

10.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

O equipamento utilizado para o ensaio de tração foi um a maquina universal para ensaio, marca Losenhausenwerk com três escalas, sendo a escala utilizada de 300 MPa conforme mostra a Foto 10.11.

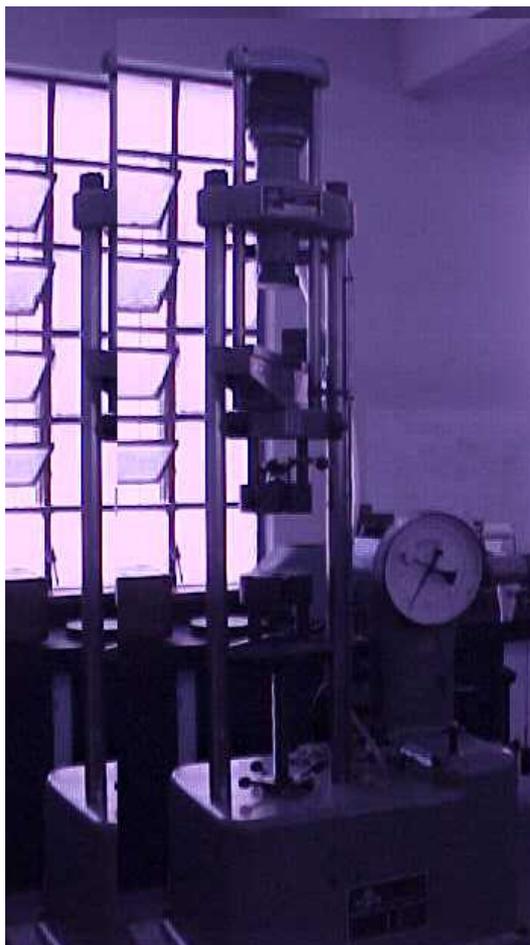


Foto 10.11 Equipamento universal de ensaio a tração utilizado.

Fonte: O autor.

A temperatura no dia do ensaio era de 27,3°C com umidade relativa do ar de 68%.

O extensômetro usado para medição da deformação possui precisão de 0,01mm, com abertura entre garras de 100 mm.

A Foto 10.11 mostra um corpo de prova sendo ensaiado a tração.

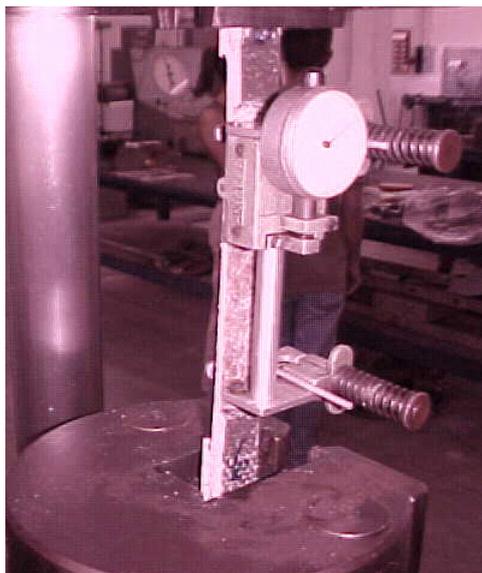


Foto 10.11- Corpo de prova fixado a máquina

Fonte: O autor

Os dados foram tratados estatisticamente de maneira a serem desconsiderados os valores discrepantes.

Foi adotado o seguinte sistema de abreviação das diversas composições de massa de moldagem e tipo de reforço:

- RcrC-Tec _ carga de rejeito de corte de rocha claro – reforço de tecido sisal.
- RcrE-Tec _ carga de rejeito de corte de rocha escuro – reforço de tecido de sisal.
- Tal-Tec _ carga de talco industrial – reforço de tecido de sisal.
- RcrE-RRs _ carga de rejeito de corte de rocha escuro – reforço de rejeito de rebarbação de fio de sisal.
- Tal-RRs – carga de talco _ rejeito de rebarbação de fio de sisal.

Os resultados dos ensaios dos diversos tipos de formulações com o uso de tecido como reforço estão nas tabelas 10.2, 10.3, 10.4.

Tabela 10.2 Tratamento dos resultados de amostra de RcrC-Tec

Resistência a tração amostra de RcrE-Tec	
amostra	Resistência à tração MPa
1	117,97
2	175,12
3	175,98
4	210,23
5	225,15
6	262,02
média	194,41
s	49,64023801
t max	1,361947848
t min	1,539849057
t(0,05; 5)	2,570577635

t max < t(0,05;5) a amostra é homogênea média= 194,41

Fonte: O autor

Considerando que os valores máximos e mínimos não são discrepantes, ao risco de 5%, pode-se considerar que a amostra é homogênea.

Tabela 10.3 Tratamento de resultados de ensaio a tração de RcrE-Tec

Resistência a tração amostra de RcrE-Tec	
amostra	Tensão de ruptura em MPa
1	70,528
2	74,797
3	78,695
4	78,755
5	86,866
6	89,623
média	79,877
s	7,207
t max.	1,352
t min.	1,297
t0(0,05;5)	2,571

t max < t(0,05;5), a amostra é homogênea, média=79,88 Mpa

Fonte: O autor

As variações nos resultados dos ensaios estão dentro dos limites estabelecidos, ao risco de 5%. Por esta razão, a amostra pode ser considerada homogênea.

Tabela 10.4 Tratamento de resultados de ensaio a tração de Tal-Tec

Teste t para Tal-Tec	
amostra	Resistência à tração MPa
1	86,580
2	93,049
3	103,535
4	105,682
5	112,233
6	123,582
média	104,110
s	13,24828369
t max	1,469733556
t min	1,323196783
t(0,05; 5)	2,570577635
t max < t(0,05;5) a amostra é homogênea, média= 104,11 Mpa	

Fonte: O autor

Os resultados dos ensaios indicam que a amostra é homogênea, ao nível de 95% de probabilidade.

Os resultados dos ensaios das diversas formulações com o uso de rejeito de sisal como reforço e seu tratamento estão nas Tabelas 10.5, 10.6.

Tabela 10.5 Tratamento dos resultados de ensaio a tração de RcrE- RRS

Teste t para RcrE-RRs	
amostra	Resistência à tração MPa
1	53,469
2	54,348
3	56,536
4	59,463
5	60,530
6	73,735
média	59,680
s	7,41904299
t max	1,894442847
t min	0,837189844
t(0,05; 5)	2,570577635
t max < t(0,05;5) a amostra é homogênea, média= 59,68 Mpa	

Fonte: O autor

Levando-se em consideração os limites estabelecidos para os resultados dos ensaios, ao nível de 5% de risco, a pode ser considerada homogênea.

Tabela 10.6 Tratamento dos resultados do ensaio a tração das amostras Tal-RRS

Teste t para Tal-RRS	
amostra	Resistência à tração MPa
1	111,924
2	118,577
3	121,367
4	126,667
5	132,686
6	140,205
média	125,238
s	10,17962587
t max	1,470291062
t min	1,307845131
t(0,05; 5)	2,570577635
t max < t(0,05;5) a amostra é homogênea, média= 125,24 Mpa	

Fonte: Miguel

De acordo com os resultados dos ensaios a amostra pode ser considerada homogênea ao nível de 95% de probabilidade.

Fazendo-se a análise da variância com um fator controlado, dos resultados obtidos com RcrC- Tec e Tal-Tec, que apresentavam mesmas proporções de carga/matriz obteve-se os resultados da tabela 10.7.

Tabela 10.7 Análise de variância RcrC-Tec / Tal-Tec

Anova: fator único Tal-Tec / RcrC-Tec

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Coluna 1	6	624,661	104,1102	175,517
Coluna 2	6	1166,468	194,4113	2464,153

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	24462,86	1	24462,86	18,53479	0,001549	4,964591
Dentro dos grupos	13198,35	10	1319,835			
Total	37661,21	11				

Fonte: O autor

Como o $F > F$ crítico existe influência o uso de rejeito de RcrC em substituição ao Talco.

Foram traçados diagramas para tensão deformação baseado nas médias a cada deformação em termos de percentual de deformação em 0,01 mm e tensão MPa. Foram ajustadas retas a estes diagramas. O coeficiente angular destas retas corresponde ao módulo de elasticidade do respectivo compósito.

Na Figura 10.6, 10.7, 10.8 pode-se observar a variação deste valor.

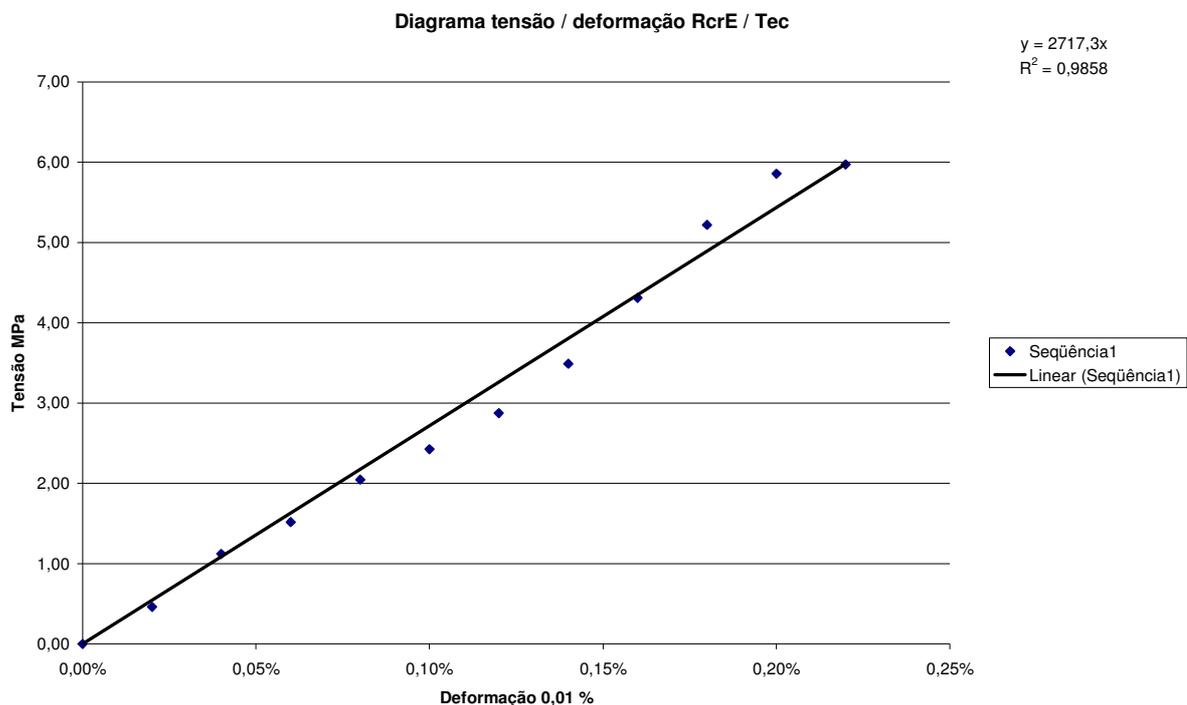


Figura 10.6 Diagrama tensão / deformação RcrE-Tec

Fonte: O autor

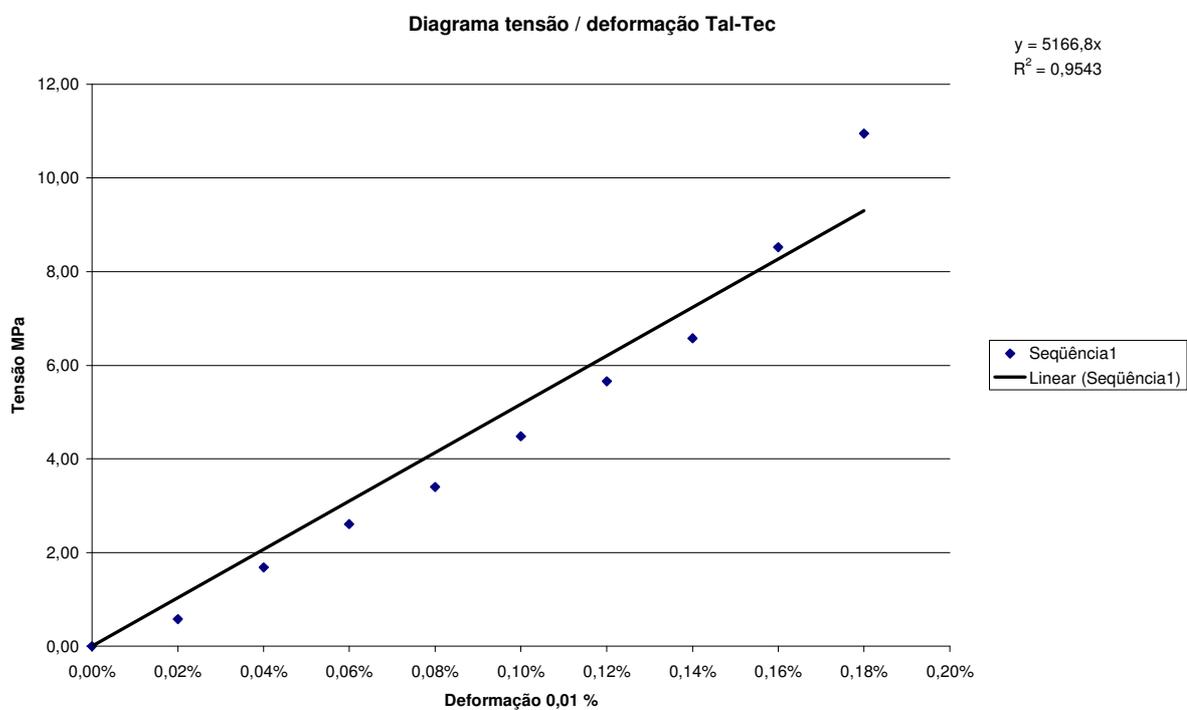


Figura 10.7 Diagrama tensão / deformação Tal-Tec

Fonte: O autor

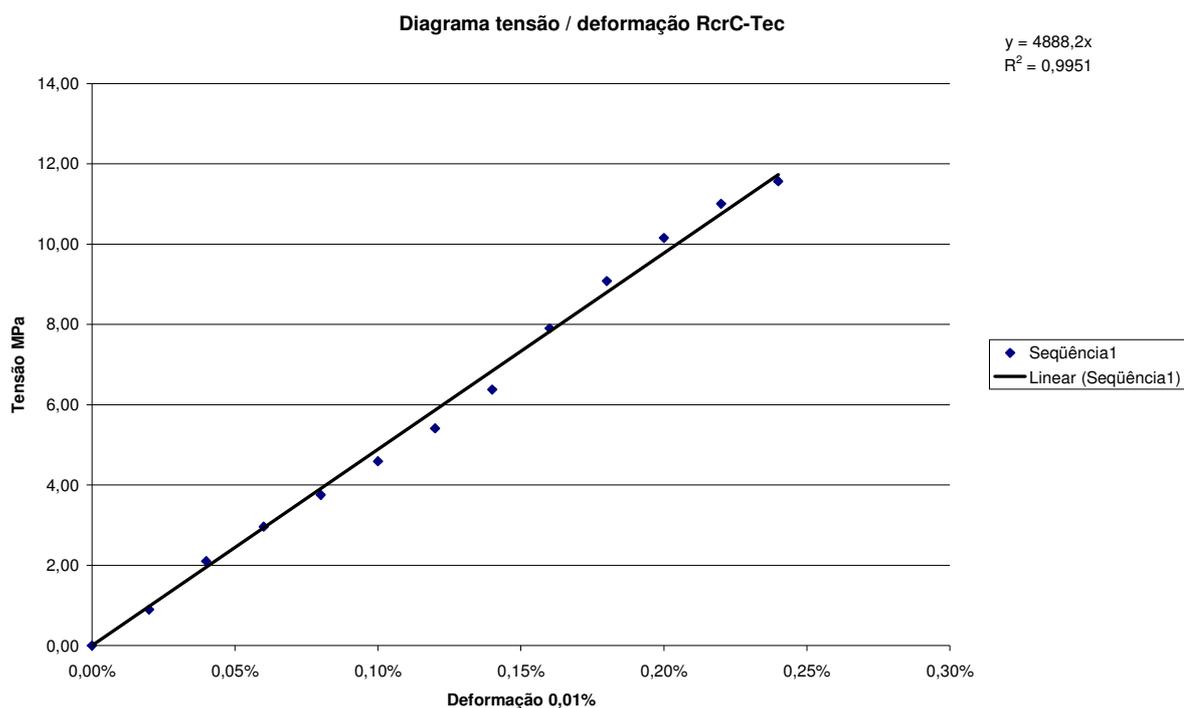


Figura 10.8 Diagrama tensão / deformação RcrC-Tec.

Fonte: O autor.

Nas três Figuras para compósito reforçado com tecido o que utiliza talco e rejeito claro apresentam módulos aproximadamente iguais. Já o que usou rejeito escuro da segunda partida de carga ficou inferior, porém há de se observar que a proporção de rejeito aumentou em 20%.

Observando-se as Figuras 10.9 e 10.10 para os compósitos com rejeito de sisal, pode-se notar a variação pouco significativa no módulo de elasticidade apesar da relação carga matriz haver sido modificada de 50% / 50% para 40% / 60% em peso.

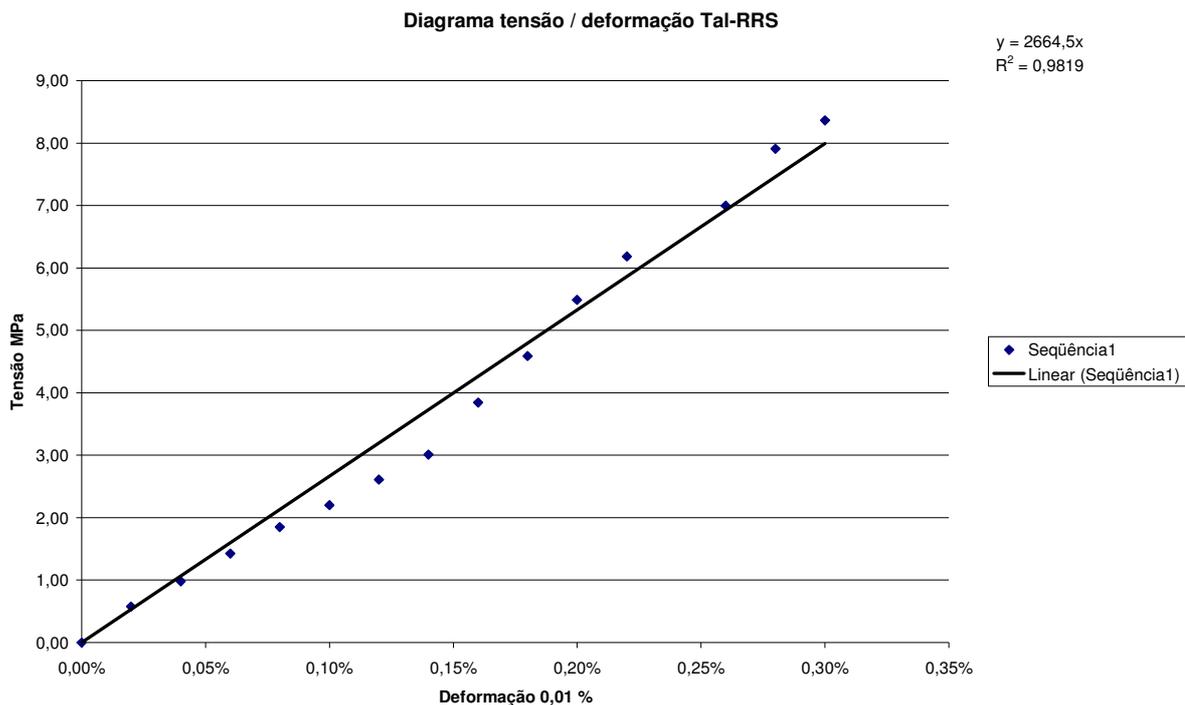


Figura 10.9 Diagrama tensão / deformação Tal-RRS

Fonte: O autor

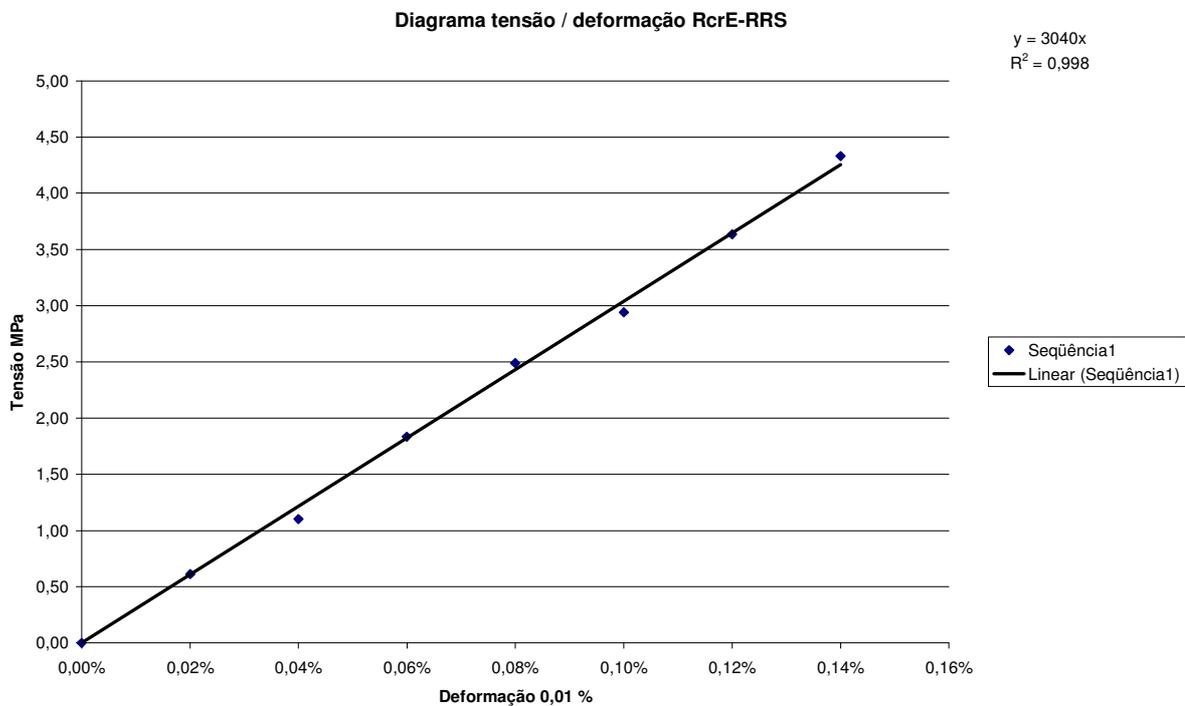


Figura 10.10 Diagrama tensão / deformação RcrE-RRS.

Fonte: O autor

Resumidamente as amostras apresentaram os seguintes módulos de elasticidade:

- Tal-Tec = 5166,80 MPa.
- RcrC-Tec = 4888,20 MPa.
- RcrE-Tec = 2717,30 MPa.
- Tal-RRS = 2664,50 MPa.
- RcrE-RRS = 3040,00 MPa.

Segundo a norma NBR 13275 / DEZ 99 o módulo de elasticidade de placas fabricadas por prensagem devem ter módulo de 5.000 MPa com variação de 50%. As placas produzidas apresentam módulo de elasticidade dentro destes limites. O valor do módulo da placa produzida com rejeito de corte de rocha escuro reforçado com tecido (RcrE-Tec) ficou inferior aos outros, com o mesmo tipo de reforço devido o aumento na proporção de carga.

Nas placas reforçadas com rejeito de sisal, a placa na qual foi usado carga de rejeito de corte de pedra ornamental (RcrE-RRS), apresentou maior módulo de elasticidade quando comparada a placa produzida com carga de talco (Tal-RRS).

11 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta inicial e o objetivo desta dissertação foi verificar a aplicabilidade dos compósitos poliméricos com adição de carga de rejeito industrial, reforçados com fibras de sisal em placas de sinalização.

Com base na pesquisa desenvolvida e nos ensaios mecânicos de tração verificou-se que as placas produzidas atendem às exigências de tração, módulo de elasticidade e alongamento para o fim proposto e os resultados demonstram que:

- A resistência à tração das placas foram superiores ao valor recomendado pela norma NBR 13275 que é de 65 MPa com variação de 10%, sendo em resumo os seguintes valores:
 1. RcrC-Tec = 194,41 MPa.
 2. Tal-Tec 104,11 MPa.
 3. RcrE- Tec = 79,88 MPa.
 4. , Tal-RRS = 125,24 MPa.
 5. RcrE-RRS = 59,68 MPa.
- O uso de rejeito de corte de pedras ornamentais em substituição ao talco é viável.
- Quando se usa a mesma proporção de resina-carga, para o talco e para rejeito de corte de rocha ornamental, as placas com rejeito apresentam maior resistência à tração.
- A substituição do talco por rejeito de corte de rocha ornamental influencia na resistência a tração.
- Os processos de produção são relativamente simples, possibilitando o desenvolvimento de produtos com baixo investimento inicial.

- A modificação na proporção de rejeito de 50 % para 60 % de carga implicou em uma redução de 23,27 % na resistência a tração, porém estes valores estão dentro dos limites recomendados pela NBR 13275.

Os testes demonstraram que é viável a produção de placas utilizando equipamentos simples e está ao alcance de pessoas com pouca formação tecnológica, o que pode ser uma boa opção para produção sustentável das placas em comunidades de baixa renda. Outras aplicações devem ser estudadas com o material objeto do estudo.

Para o aprofundamento no estudo e potencialidade do material avaliado, é sugerido que sejam desenvolvidos trabalhos futuros que:

- Estude a aplicação de outras relações de reforço com o uso de rejeito de fibras de sisal.
- Façam avaliação de compósitos com matriz polimérica reforçado com outras fibras vegetais (naturais), para compará-las com as placas reforçadas com sisal.
- Avaliem a resistência à flexão, impacto, absorção de água, deflexão sob carga, dureza superficial, densidade e temperatura de deflexão sob carga.
- Estude outros rejeitos como carga em substituição ao talco.
- Verifique a viabilidade de processos acelerados de verificação de resistência ao intemperismo.
- Estude outros processos de moldagem, que reduzam a ocorrência de vazios.
- Estude a aderência fibra / matriz.
- No caso do estudo anterior indicar a necessidade de melhora na aderência da fibra a matriz, desenvolva-se o estudo de tratamento na fibra para melhorar a aderência a matriz.

BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA

AKIL, Pedro Paulo Voto. **Potencialidade dos compósitos de cimento Portland reforçados com fibras vegetais**. 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, Niterói. 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 256 - 97: Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics.

_____. ASTM D 570 – 98: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics.

_____. ASTM D 638 – 98: Standard Test for Tensile Properties of Plastics.

_____. ASTM D 648 – 98c: Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastic Under Flexural Load in the Edwise Position¹.

_____. ASTM D 2583 - 95: Standard Test for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor¹.

_____. ASTM D 790 – 98: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials¹.

_____. ASTM D 792 – 98: Standard Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement¹.

AQUINO, Regina Coeli Martins Paes, **Desenvolvimento de compósitos de fibras de piaçava Espécie ATTALEA FUNIFER MART e matriz de resina de poliéster**, Tese submetida ao corpo docente do centro de ciência e tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense para obtenção do título de doutor(Dsc) em Engenharia e ciência dos materiais, Agosto de 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NB 13275: Chapas planas de polyester reforçado com fibras de vidro, para confecção de placas de sinalização - Requisito e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1999.

_____. NBR 11936: Determinação do peso específico de plásticos com o uso do picnômetro- Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1977.

BIGNO, Izabella Castro, Aproveitamento do resíduo de corte de rochas ornamental como fíler mineral em compósitos de matriz polimérica e cimentícias, Dissertação de mestrado, UFF, Niterói 2002.

CALLISTER, Jr, William D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, tradução Sergio Murilo Stamile Soares, 5^o ed, Rio de Janeiro, LTC-Livros Técnicos e Científicos Editores S.A., Rio de Janeiro, 2002.589 p.

CASTRO, Protasio Ferreira, **Casa pré-fabricada em elementos de poliéster reforçado com fibras de vidro**, dissertação de mestrado em engenharia civil, UFF, Niterói 1993.

CASTRO, Protasio Ferreira, **Anotações da aula de Materiais Compósitos** (Curso de mestrado em Engenharia Civil), Univesidade Federal Fluminense, Niterói, 2004.

ESAU, Katherine, 1898, **Anatomia das plantas com sementes**; tradução: Berta Lange de Morretes, São Paulo, Edgard Blüncher, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1974.293 p.

FURTADO, André Perroni, Processo eficiente e eficaz d recuperação de vigas de concreto através do uso de manta de fibra de vidro, dissertação de mestrado, UFF, Niterói 1998.

GOMES, Raimundo Pimentel, **Fruticultura brasileira**, 9^o. ed, São Paulo Nobel, 1983.445 p.

Guia de laminação manual e a pistola Owens Corning fiberglass. São Paulo 1992.

MANO, Eloísa Biasotto, **Introdução a polímeros**, 2^o.ed rev. e ampl., São Paulo: Edgard Blüncher Ltda, 2004.191 p.

NASSEH, Jorge, Manual de construção de barcos Booklook.2000

PARDINE, Luiz Carlos **Preformas para Compósitos Estruturais**. Polímeros Ciência e Tecnologia, v 10, n^o2, p 100-109, 2000.

PIAÇAVA, Fibra baiana. Disponível em <http://www.ceplac.gov.br/piaçava.htm>. Acesso em jun. 2005.

PLESSIS, Hugo du, **Fiberglass boats**, Adlard Coles Nautical, London, 1996.

Revista do Platico Reforçado. Materiais Compostos. Mar./abr 1999, p 22,23,24.

____.Mar/Abr 2000, p.28, 29, 30.

____.Set/Out 2000, p.58, 59, 60, 62.

____.Mar/Abr 2000, p.28, 29, 30.

____.Jul/Ag 2001, p.61, 62, 63.

____.Set/Out 2001, p.93, 94, 95, 96, 97.

____.Nov/Dez 2001, p.56, 57.

Vetrotex , RTM Resin Transfer Moulding. Cia Vidraria Santa Marina-Divisão Vetrotex capivari São Paulo, volume único 34 p.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AQUINO, Regina Coeli Martins Paes, **Desenvolvimento de compósitos de fibras e piaçava.**, Disponível em <http://www.nit.ufscar.br/cbecimat/resumos/composit/TC201-008.htm> acesso em jan 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11936: Determinação do peso específico de plásticos com o uso do picnômetro-Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1977.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica Materiais de Construção Mecânica.** 3º Volume .2ª edição São Paulo Editora Mc Graw Hill

Composite in Offshore Oil, A design and Application Guide, Ray Publishing, Inc, Vol 1, pag. 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19., 2002.

BROOKES, Alan, **Cladding of Building**, E&FN SPON. London 1998.

MARTIN, Adriana Silva , **Estudo do Comportamento Térmico de Fibras de Sisal e seus Componentes através de DSC.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DOS MATERIAIS, 14., 2000, São Pedro-SP Anais

PAIVA, Jane M.F., **Compósitos de Matriz Termofixa Fenólica Reforçada com Fibras Vegetais.** Disponível em www.teses.usp.br/tese/disponiveis88/88131/tde-10062005184350/publico/tesericardo.pdf. Acesso em: 15 Set. 2005.

SILVA, R.V., **Comportamento Mecânico do Compósito Sisal/Poliuretano Derivado de óleo de Mamona.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DOS MATERIAIS, 14., 2000, São Paulo-SP Anais

VAN VLACK, Lawrence **Hall, Princípios de ciência dos materiais.** tradução Luiz Paulo Camargo Ferrão, São Paulo, Edgard Blüncher, 1970. 427 p.

ANEXO 1

Termos Técnicos Aplicáveis

ABSORÇÃO DE ÁGUA – Razão do peso de água absorvido em comparação ao do material seco.

ABSORÇÃO DE UMIDADE – Capacidade de um material absorver vapor de água do ar, é diferente de absorção de água por imersão, que resulta em ganho de peso.

ADERÊNCIA – Pegajosidade de um prepeg não curado.

ADESÃO - Grau de aderência entre superfícies coladas, força necessária para separar camadas de um laminado.

AFLORAMENTO - excesso de resina líquida que migra para superfície, principalmente no processo de enrolamento filamental.

AGENTE DE CURA OU ENDURECEDOR – Catalisador ou agente reativo que desencadeia a polimerização, ao ser adicionado a resina.

AGENTE DESMOLDANTE – Material aspergido ou pincelado na superfície de moldagem para prevenir a adesão da matriz ao molde.

AGENTE UMECTANTE – Produto que facilita o umedecimento das fibras, baixando o grau de coesão de um líquido.

ÂNGULO DE ENROLAMENTO – Ângulo entre os filamentos paralelos e a referência estabelecida no processo de enrolamento filamental.

ALONGAMENTO acréscimo no comprimento de um material sujeito à tração. Quando expresso em percentagem do comprimento original é denominado de alongamento percentual.

AQUECIMENTO INTEGRAL – Sistema no qual o elemento de calefação esta inserido na ferramenta, no caso não se utiliza a autoclave.

ÁREA RICA EM RESINA – Região com excesso de resina comparada a proporção de fibra/resina do restante das peça.

ÁREA NÃO IMPREGNADA – área pobre em resina ou com fibras secas.

ARQUITETURA DAS FIBRAS – Arranjo das fibras de reforço para suportar determinadas solicitações de projeto usando mantas, tecidos tramados, não tramados, fios roving, de fibras de vidro, aramida ou carbono.

BMC (bulk molding compound) – Processo de fabricação no qual uma mistura de resina, reforço, aditivos, cargas e catalisador são aplicados a um molde fechado por injeção ou pressão.

BROMO – aditivo fogo retardante que reduz ou elimina a queima.

BOBINADEIRA – Equipamento que enrola bobinas de fio roving.

BAIXA RETRATIBILIDADE - Resina formulada para sofrer baixa contratibilidade durante a moldagem.

CABO – união de filamentos contínuos.

CÂNTARA – Suporte de bobinas de fio roving, mantas e tecidos, para serem desenroladas e conduzidas ao equipamento de fabricação, ex. pultrusão.

CARGAS – Materiais de baixo custo, misturado a resina para reduzir o custo final do produto sem interferência acentuada nas propriedades.

CATALISADOR - Substância que promove ou controla a cura de um composto, sem ser consumido na reação.

COESÃO – Aderência de uma substância simples a ela própria. Propriedade de união de uma substância simples.

COEFICIENTE DE DILATAÇÃO – Variação do comprimento e volume de um objeto.

CPS (centipoise) – Unidade de medida de viscosidade (a 70°F a água tem viscosidade de 1 CPS, a manteiga tem viscosidade 250.000 CPS).

COMPÓSITO – Material que associa fibra e matriz para obtenção de determinadas propriedades.

COMPÓSITO HÍBRIDO – Compósito produzido com mais de um tipo de fibra de reforço.

COMPOSTO ORGÂNICO VOLÁTIL – compostos de carbono que evaporam rapidamente a temperatura ambiente (solventes e estireno).

CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO – tensão concentrada em determinada área de um compósito.

CONDENSAÇÃO – Reação de polimerização que dois produtos são formados, sendo um deles água.

CONDUTIVIDADE TÉRMICA – Característica de um material conduzir calor.

CONSOLIDAÇÃO – Etapa de processamento em que são comprimidas as fibras e a matriz, para remover o excesso de resina, retirar vazios e consolidar a densidade apropriada ao laminado.

CONTAMINANTE – Impureza ou substância estranha que afetam uma ou mais propriedades do material compósito, em particular a adesão.

CORROSÃO sob tensão (stress corrosion) – ataque de corrosão em locais sujeitos a tensão, em ambientes altamente corrosivos.

CORTE COM JATO DE ÁGUA – Processo de corte que usa jato de água de alta pressão para corte de compósitos poliméricos.

CRAQUELAMENTO – Região de finas fissuras sobre ou sob a superfície da resina.

CURA – Reação química que muda a estrutura molecular e as propriedades físicas das resinas termoplásticas. O processo ocorre através de calor, catalisador ou associação deste sob pressão ou não.

DELAMINAÇÃO – Separação de camadas de laminação de tecido ou manta da estrutura.

DESMOLDANTE – Material que facilita a desmoldagem de uma peça do molde.

DESMOLDAR Retirar um produto laminado de um molde, remoção de peça de uma ferramenta.

DESENHO BALANCEADO – É o padrão de enrolamento projetado para se obter tensões iguais em todos os fios no processo de enrolamento filamentar.

DEPRESSÃO DO ENCHIMENTO – Corte ou goivagem do enchimento sanduíche.

DIELÉTRICO – Material não condutor de eletricidade, capacidade de um material não permitir o fluxo de corrente elétrica.

DUREZA BARCOL – Valor obtido medindo a resistência a penetração de ponta de aço impulsionaada por uma mola. O valor da escala de medida da dureza barcol, vai de 0 a 100.

EMUNSIONAR Tratar as fibras com aditivo para: aglutinar, proteger, reduzir a abrasão e absorção de água. Também lubrificar para reduzir a eletricidade estática.

ENCHIMENTO SANDUÍCHE – Material de núcleo aplicado entre duas camadas de laminado em forma de espuma colméia ou madeira para aumentar a resistência e inércia.

ENDURECEDOR (agente de cura) – Substância que reage com a resina para promover ou controlar a cura.

ENROLAMENTO AXIAL – Sistema de enrolamento paralelo ao eixo dos “x” do mandril.

ENROLAMENTO BIAXIAL – É o processo de enrolamento no qual as fibras são enroladas inclinadas em ângulos positivos e negativos iguais em forma de faixas helicoidais lado a lado sem sobrepor ou deixar espaços, na mesma inclinação.

ENROLAMENTO CIRCUNFERENCIAL – Processo de enrolamento que as fibras são dispostas perpendicular ao eixo do mandril.

ENROLAMENTO FILAMENTAR SECO – Processo de enrolamento no qual as fibras são enroladas secas. Posteriormente a resina, que é aplicada às fibras no mandril.

ENROLAMENTO PLANO Enrolamento cujo padrão em um plano, intercepta o enrolamento da superfície.

ENROLAMENTO POLAR – Processo de enrolamento no qual o padrão de enrolamento passa tangenciando o pólo.

ESMAGAMENTO DO ENCHIMENTO – Dano provocado por compressão ao enchimento.

E-GLASS (electrical glass) – Fibras de vidro borossilicato, usualmente aplicadas em compósitos de matriz polimérica.

EIXOS X, Y, Z – Eixos referenciais usados para laminação. O eixo X é perpendicular ao Y. O eixo Z é correspondente à espessura do material.

ENSAIO NÃO DESTRUTÍVEL – Processo de determinação de características de um material se que ocorra alteração permanente devido ao teste.

ESPECIFICAÇÃO – Propriedade característica de um material ou parte que deve ser aceita para um potencial uso deste em determinada aplicação.

ÉSTER VINÍLICA – Classe de resina termofixa que contém acrílico e ácidos metacrílicos.

ESTRUTURA CRISTALINA – Estrutura atômica ordenada em padrão tridimensional.

ESTRUTURA SANDUÍCHE – Compósito constituído de duas camadas finas de laminado coladas em um núcleo de material de baixo peso. O laminado é mais denso e apresenta alta resistência.

EXOTERMIA – Calor gerado durante reação química.

EXOTÉRMICA – Característica de uma reação com geração de calor.

EXTENSORES – Materiais de baixo custo usado para diluir resina, com o objetivo de baixar o custo sem haver perda de propriedades.

FADIGA – Falência de propriedades de um material produzida por cargas cíclicas.

FIBRA – Material em forma de fio fino e longo.

FERRAMENTA – Molde usado na produção de compósito.

FIBERGLASS – Compósito feito com fibra de vidro e resina, conhecido pela processabilidade e baixo custo.

FIBRA DE CARBONO – Fibra de reforço de baixo peso e alta resistência e rigidez. Produzida em altas temperaturas a partir de precursores de fibras de PAN (poliacrilonitrila), rayon ou piche em atmosfera inerte a temperatura de 1800°F. As fibras podem ser pirolizadas para remoção dos átomos que não sejam de carbono.

FIBRA MOÍDA – fios ou cordas de carbono moídos em martelos picadores em dimensões muito curtas.

FIBRAS PICADAS – fibras obtidas de roving contínuo picado em pequenos pedaços, usados na produção de mantas, processo spray-up e massa para moldagem sob pressão.

FIBRAS SINTÉTICAS – Fibras produzidas de materiais que não sejam vidro ou carbono tal como poliéster.

FILAMENTO – Fibra individual de comprimento indefinido, usado em fio roving, mechas ou cabo.

FILAMENTO CONTÍNUO – Reforço individual de pequeno diâmetro, flexível e de comprimento indefinido.

FILAMENT WIDING (enrolamento filamentar) – Processo de produção de formas cilíndricas ou cônicas por enrolamento de fios de roving contínuos pré-impregnado de resina ou a seco com banho de resina posteriormente, em um mandril.

FILLER (carga) – material misturado a resina para aumentar viscosidade, melhorar o aspecto densidade e reduzir custo.

FILME – Laminado de espessura nominal inferior a 0,25mm.

FILME ADESIVO – Camada fina de resina fina seca, usada para aderência entre camadas.

FILME DESMOLDANTE – Filme impermeável que não cola ao compósito durante a cura.

FIO Material produzido em feiras de pequena espessura e contínuo.

FISSURAÇÃO – Fissuras internas e externas causada por tensão dúctil.

FISSURAÇÃO POR TENSÃO TÉRMICA – Fissura presentes em alguns termoplásticos, causadas pela superexposição a altas temperaturas.

FITA PREPEG – Prepeg unidirecional de 30cm de largura.

FRATURA – Ruptura da superfície do laminado por força interna ou externa causando ou não completa separação do material.

FRP (fiber reinforced plastics) – Compósito de matriz polimérica reforçado com fibras de vidro, carbono ou aramida. O termo é mais usualmente aplicado a peças reforçadas com fibras de vidro. Para fibras de carbono ou aramida o termo usual é compósito avançado.

GEL COAT Resina pigmentada aplicada ao molde para dar proteção a acabamento a uma peça.

GEL TIME – Tempo após a mistura do catalisador a uma resina em que esta se apresenta em estado líquido antes de assumir forma de gel. Tempo de trabalhabilidade da resina.

HÉLICE – Geometria da posição ocupada pelo reforço ao ser aplicado em um mandril no processo de enrolamento.

HONEYCOMB – Estrutura tipo colméia feito de material metálico ou não de forma hexagonal.

HIGROSCOPIA – Capacidade de um material absorver água.

IMPREGNAR – Saturar vazios e interstícios do reforço com resina. Aplicação de resina em um reforço sobre o molde.

INIBIDOR – Aditivo químico que retarda o ciclo de cura de uma resina.

INJEÇÃO – Ciclo completo de equipamento de moldagem por injeção.

IN SITU (na posição original) – No processo de enrolamento filamentar designa o mandril que permaneceu na posição após o enrolamento, oposto ao mandril que foi retirado.

INTERFACE – Superfície de contato entre dois materiais. Em termos de laminado, área de contato da fibra com a resina.

INTERLAMINAR – O que existe ou ocorre entre duas ou mais lâminas adjacente. Corte interlaminar, força que produz deslocamento entre duas lâminas ao longo do plano de sua interface.

ISOCIANATO – Monômero de alta reatividade usado na reação de polimerização aplicado ao processo de moldagem por injeção (RIM).

ISOTRÓPICAS – propriedades das fibras direcionadas uniformemente em todas as direções, independente a direção da carga aplicada.

JUNTA SOBREPOSTA – Junta feita com colagem havendo sobreposição de duas partes.

KEVLAR – Marca registrada da empresa DU PONT de uma fibra aramida de baixo peso e alta resistência, usada como fibra de reforço.

LAMINAÇÃO BIDIRECIONAL – Laminação executada em ângulo de 0° e 90°.

LAMINADO – Camadas unidas com material adesivo.

LAMINAÇÃO – rodução de um laminado de tecido, manta, e resina que são justapostos e aderidos pela resina através do processo de cura.

LAMINADO BALANCEADO – Laminado no qual são usados reforços em camadas simétricas em relação a um eixo com ângulo positivo e negativo.

LAMINADO BIDIRECIONAL – Laminado com fibras orientadas em duas direções no mesmo plano.

LAMINAÇÃO CRUZADA – Laminação com camadas de fibras orientadas em ângulos variados em relação às outras camadas usualmente é apenas orientado em 0° e 90°, ver arquitetura de fibras.

LAMINADO ISOTRÓPICO – Laminado que apresenta suas propriedades mecânicas iguais em todas as direções.

LAMINAÇÃO MANUAL(hand layup) Processo de fabricação no qual as camadas são dispostas no molde manualmente e saturadas com resina que após a cura assumem a forma do molde.

LIGA DE POLÍMEROS – Mistura de polímeros, copolímeros ou elastômeros.

LIGANTE – Agente ligante das fibras aplicado em mantas e pré-formados para unir as fibras de laminação, que sejam dissolvíveis e compatíveis com a resina de laminação.

LIMITE ELÁSTICO – Maior carga que um material é capaz de suportar sem deformar permanentemente, quando descarregado volta a sua forma original.

LINER – Camada de resina reforçada que protege o laminado do ataque químico ou previne vazamento sob pressão.

LOTE – Material procedente de uma única produção, com a mesma característica.

MANDRIL – Molde alongado em torno do qual são enroladas as fibras em forma de filamentos ou fitas, impregnadas ou não, serve para produzir peças cilíndricas ou cônicas.

MANTA – Reforço composto de fibras picadas e unidas com ligante aplicado para manter a forma, fabricada em peças de largura, espessura, peso e comprimento variados.

MÁRMORE SINTÉTICO – Compósito não reforçado com fibras, composto de resina termofixa, carga e aditivos.

MATRIZ - Material no qual as fibras de reforço estão dispersas. Resina (termofixa ou termoplástica), metal ou cerâmica.

MECHAS – União de filamentos oriundos de fibras diferentes.

MICROFISSURA – fissura existente no compósito em pontos que a carga térmica exceda a resistência da matriz.

MODULO – Medida física resultante da medida de dureza em um material que é expressa pela razão da carga aplicada e a deformação resultante do material, (alto módulo indica material duro).

MOLDAGEM – Formação de massa sólida de resina e fibra em determinada forma.

MOLDAGEM POR MEIO DE AUTOCLAVE – Técnica de moldagem em que se coloca as fibras e a resina em uma autoclave (vaso de pressão e calor) sob pressão de 3,5 a 7 atm para consolidar o laminado removendo bolhas e voláteis.

MOLDAGEM POR INJEÇÃO – Processo de moldagem no qual o plástico é moldado injetando o polímero no molde.

MOLDAGEM A VÁCUO (vacuum bag molding) – Processo em que o compósito após a laminação ainda sem estar curado é coberto por um filme flexível vedado formando um compartimento estanque. Então é aplicado a este compartimento vácuo, autoclave, pressão ou a bolsa é inflada.

MOLDAGEM POR CENTRIFUGAÇÃO – Processo de fabricação de estruturas cilíndricas. O material compósito é posto dentro do vão do mandril para ser girado e aquecido, promovendo a cura da resina e a compactação.

MOLDAGEM POR CONTATO – Processo de moldagem no qual as fibras de reforço na forma de mantas são aplicadas saturadas no molde. A cura ocorre a temperatura ambiente com adição de catalisador e promotor ou calor sob pressão em estufa.

MOLDAR – Capacidade do tecido ou prepegs de se acomodar a forma de uma superfície.

MOLDE – cavidade ou matriz no qual fibras e resina são aplicadas para moldagem.

MONÔMERO – Produto que tem em sua composição moléculas simples que reage com iguais moléculas ou diferentes para dar origem a um polímero.

MULTIFILAMENTAR – Cabo constituído de vários filamentos.

NÃO ENTRELAÇADOS – reforços compostos de cabos de fibras contínuas reunidas sem serem trançadas.

NYLON - Nome genérico de todas as poliamidas sintéticas.

ONE-OFF Parte individual fabricada. Peça única.

ORIENTAÇÃO DO ENCHIMENTO – Padrão do enchimento de colméia, alinhamento das fitas, espessura tamanho e direção transversal.

PADRÃO DE ENROLAMENTO - Padrão regular de enrolamento após um determinado numero de revoluções do mandril no processo de enrolamento filamentar.

PAN – Poliacrilonitrila polímero em forma de fibra usado como precursor na fabricação de fibras de carbono.

PEI – Polietirimida, resina termoplástica resistente a altas temperaturas.

PICHE – resíduo de produção de petróleo usado na fabricação de certas fibras de carbono.

PIROLISE – Decomposição de um composto causado por calor.

PLÁSTICO – Termoplástico de alto peso molecular, que podem ser moldáveis por extrusão, laminação, injeção. São deformáveis sem se romper.

PLÁSTICO DE ENGENHARIA – Termo geral que abrange todos os plásticos com ou sem reforço, que possuam propriedades mecânicas, químicas e térmicas e sejam usados como material de construção.

POLIÉSTER – Resina termofixa produzida pela dissolução de ácidos instaurados, em geral resina alquídica linear em monômero de estireno vinílico ativo, estireno. A resina é em geral fornecida em solução. Pode ser sólida também.

POLYETHERETHERKETONE (poli-éter-éter-cetona) – Resina termofixa linear cristalizada, aromática com alta temperatura de serviço (204°C).

POLÍMERO – Macromolécula formada de moléculas menores denominadas de monômero em padrão regular.

POLIMERIZAÇÃO – Reação química que interliga os monômeros dando origem ao polímero.

POLIFENILENO SULFÍDICO (PPS, sulfeto de polifenileno) – Resina termofixa conhecida pela excelente resistência química, ao fogo e estabilidade térmica.

POROSIDADE – Presença visível de vazios na superfície dos materiais nos quais líquidos e gases penetram.

PÓS-CURA – Aquecimento de uma peça sem pressão, que completa a cura e promove ganho de determinadas propriedades mecânicas ao laminado.

POT LIFE - Tempo que a resina catalisada possibilita o processamento a baixa viscosidade.

PRECURSOR - Fibras das quais as fibras de carbono são produzidas, rayon, PAN, ou piche.

PREFORMADOS - Reforços de fibra pré-moldados em um mandril ou modelo próximo e espessura desejada da peça acabada.

PREPREGS – Fibras pré-impregnadas com resina antes de serem estocadas para uma posterior moldagem e laminação manual.

PROMOTOR (acelerador) – Produto químico que precipita a reação entre o catalisador e a resina.

PROTÓTIPO – Peça criada para estabelecer os materiais e parâmetros de produção de um novo produto. Deve estabelecer múltiplas interações até o produto final.

PULTRUSÃO – Processo automático e contínuo de fabricação de varas, tubos e perfis estruturais de seção constante. Os fios rovings, mantas, tecidos, véus são impregnados e puxados dentro de um molde aquecido que provoca a sua devida moldagem e cura. Após o perfil é cortado em medidas comerciais.

PUNCIONAR – quebrar a superfície de um compósito sanduíche, podendo atingir o material de enchimento, termo usado em referência a dano causado ao material compósito sanduíche devido ao impacto de peça de seção pontiaguda.

QUEBRA DO ENCHIMENTO – Quebra das células de colméia.

RAZÃO DE ASPECTO – Razão entre o comprimento e o diâmetro da fibra.

REAGENTE – Substância usada em uma reação química para produzir outras substâncias.

REINFORCED REACTION INJECTION MOLDING (RRIM) – Processo de produção que mistura duas resinas reativas, sendo a uma das resinas adicionado fibras picadas ou flocos de vidro como reforço e redutor de expansão térmica.

REFORÇO – Camada de material adicionada a matriz para acrescentar propriedades (resistência e dureza). Fibras picadas, contínuas, complexos têxteis e tramados.

RESINA Material sólido ou viscoso que possui tendência a fluência quando submetido a carga. Matriz de compósito.

RESINA CATALISADA – Resina em estado viscoso preparada para ser usada misturada ao catalisador ou ao endurecedor.

RESINA EPOXI – Polímero termofixo a base de epóxi usado como matriz em laminados. Quando polimerizada apresenta resistência química e água não sendo afetada pelo calor.

RESINA FENÓLICA – Resina termofixa produzida de um álcool aromático com um aldeído, em particular o fenol com o formolaldeído.

RESISTÊNCIA DIELÉTRICA – Voltagem necessária para penetrar em um material isolante, um material com alta resistência dielétrica possui excelentes propriedades de isolamento elétrico.

RESISTÊNCIA A FADIGA – Capacidade de um material suportar determinados ciclos de carregamento, antes de entrar em falência estrutural.

RIM (reaction injection molding) – Processo de moldagem a alta pressão envolvendo dois materiais componentes misturados. Processo utilizado com poliuretano.

ROVING – Conjunto de fios contínuos unidos, podendo ser torcidos ou não.

ROVING CONTÍNUO – Cabo simples ou múltiplos de filamentos paralelos enrolados em espiral. Aplicáveis em reforço contínuo, tecidos, enrolamento filamental, pultrusão, prepegs, e spray-up.

RUGAS - Defeito na superfície de um laminado devido ao ataque de solventes da resina no gel, ainda não curado.

RTM (resin transfer molding) Processo no qual a resina catalisada é injetada em um molde fechado, no qual as fibras já estão previamente acomodadas, a resina pode ser aquecida ou não.

SELANTE – Pasta ou líquido que aplicado a uma junta quando endurecido produz um selo.

SEPARADOR – Camada permeável que isola e age como filme separador (fibras impregnadas com teflon).

S GLAS _ Fibra de reforço que possui em sua formulação magnésio, alumínio, e silicatos. Projetado para resistir a cargas elevadas de tração.

SMC (sheet molding compound) – Processo de moldagem no qual uma mistura de resina, fibras picadas e aditivos, é transformada em manta, a manta é cortada em dimensões ligeiramente menores que o molde. Este pedaço de manta é colocado entre moldes macho e fêmea, vedados. Então é comprimido um contra o outro, para o preenchimento da cavidade, a cura da resina ocorre por meio do calor

SISTEMA DE RESINA – Mistura de resina e ingredientes para determinado processo ou produto.

SOLVENTE – Líquido usado para dissolver e limpar ferramentas e materiais.

SPRAY-UP – Técnica de laminação que utiliza fios contínuos picados por equipamento que concomitantemente pica as fibras e lança a resina acelerada e catalisada ou resina acelerada e catalisada em molde aberto formando camadas de material a ser curada a temperatura ambiente.

SRIM (structural reaction injection molding) – Processo de moldagem que utiliza reforços preformados ou mantas em moldes estanques aos quais injeta-se resina reativa para impregnar as fibras que serão curadas rapidamente.

SUBSTRATO local no qual um adesivo é aplicado para algum objetivo, como colagem ou cobertura.

TECIDO – Tecido produzido por entrelaçamento de fios, fibras ou filamentos.

TECIDO NÃO TRAMADO – Material produzido com fibras justapostas em direções diversas sem haver trançagem das fibras, sendo unidas apenas por fios transversais.

TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA (TG) – Temperatura aproximadamente acima da qual há um incremento de mobilidade molecular, que produz amolecimento no material. O valor da TG pode variar em função do método do teste.

TEMPO DE ESTOCAGEM – Período que o material pode ser armazenado sem a perda de suas características.

TERMOPLÁSTICO – Matriz de compósito que pode ser amolecida com o calor e endurece ao resfriar.

TERMIFIXO – Matriz de compósito que endurece através de catalisador, calor ou endurecedor a temperatura ambiente, sendo insolúveis e infusíveis.

TIXOTRÓPICO – Capacidade de um material aderir a uma superfície sem escorre. Este material apresenta grande tensão superficial e baixo poder de escorrimento. Consistência gel em repouso ou fluido quando agitado. Estado de gel ou de líquido que modifica devido a ligeira agitação.

TRANSIÇÃO VÍTREA – Mudança reversível em um polímero amorfo variando entre emborrachado viscoso e rígido relativamente quebradiço.

TRAMA – Fios trançados perpendicularmente a urdidura.

TRAMA Padrão de trançado de tecido formado pelo entrelaçamento de mechas de fios contínuos, podendo ser do tipo trama, sarja etc.

UNIDIRECIONAL Orientação das fibras em uma mesma direção.

VACUUM BAG MOLDING – Processo de moldagem a vácuo no qual o laminado é curado dentro de invólucro vedado, cujo ar e o excesso de resina são removidos por meio de vácuo.

VARTM (vacuum assisted resin transfer moulding) – Processo de impregnação de reforço no qual aplica-se um filme sobre as fibras de reforço vedando os contornos com o molde. Neste filme é aplicado vácuo por meio de uma bomba. Em pontos estratégicos é injetada resina que penetra nos vazios impregnando as fibras devido ao vácuo.

VAZIOS – Bolsas de gás que estão inclusas em um laminado.

VÉU DE SUPERFÍCIE – Véu de fibra de vidro ou poliéster aplicado a superfície de acabamento de um laminado para promover isolamento do material subsequente não permitindo a sua impressão na superfície do laminado.

VISCOSIDADE DA RESINA – Propriedade de um sistema de resina. Transição sólido-líquido e resistência à fluidez, que pode ser alterado por temperatura, pressão, para obter a característica de fluidez desejada.

VISCOSIDADE Tendência de um material de resistir ao fluxo. O aumento da temperatura diminui a viscosidade da maioria dos materiais.

VOLATEIS – Materiais que a elevadas temperaturas são vaporizados no ambiente.