

Gerson Marinucci

MATERIAIS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

FUNDAMENTOS E TECNOLOGIA



Artliber
EDITORA

Gerson Marinucci

MATERIAIS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

FUNDAMENTOS E TECNOLOGIA

Copyright© 2019 by Artliber Editora Ltda.

Revisão:

Maria Antonieta Marchiori Eckersdorff

Capa e composição eletrônica:

Espaço Editorial

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro)

Marinucci, Gerson

Materiais compósitos poliméricos / Gerson Marinucci. --
São Paulo: Artliber Editora, 2011.

Bibliografia

ISBN: 978-85-88098-63-3

1. Materiais compósitos I. Marinucci, Gerson II. Título.

11-01347

CDD-620.118

Índices para catálogo sistemático:

1. Materiais Compósitos: Engenharia de materiais 620.118

2019

Todos os direitos desta edição são reservados à

Artliber Editora Ltda.

Av. Diógenes Ribeiro de Lima, 3294

05083-010 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: (11) 3641-3893

info@artliber.com.br

www.artliber.com.br

SUMÁRIO

Introdução	19
Capítulo 1 – Materiais compósitos	21
1.1 – Introdução.....	21
1.2 – Definição de material compósito	22
1.3 – Classificação dos materiais compósitos.....	23
1.3.1 – Compósitos particulados.....	24
1.3.2 – Laminado fibra/metal.....	24
1.3.3 – Compósitos fibrados.....	25
1.4 – Identificação de laminados	26
1.5 – Denominação da disposição das camadas em um laminado	29
1.5.1 – Em relação à orientação das camadas	29
1.5.1.1 – Laminado unidirecional on-axis	29
1.5.1.2 – Laminado unidirecional off-axis.....	29
1.5.1.3 – Laminado <i>angle-ply</i>	30
1.5.1.4 – Laminado 0/90 (<i>cross-ply</i>)	30
1.5.2 – Posição da camada em relação ao plano médio.....	31
1.5.2.1 – Laminado simétrico	31
1.5.2.2 – Laminado antissimétrico.....	31
1.5.2.3 – Laminado assimétrico	31

Capítulo 2 – Matrizes poliméricas	33
2.1 – Polímeros.....	34
2.1.1 – Termoplásticos.....	35
2.1.2 – Termofixos	36
2.2 – Resinas	36
2.2.1 – Resina poliéster insaturado	36
2.2.2 – Resina viniléster	41
2.2.3 – Resina epóxi (epoxídica).....	42
2.3 – Cura de matrizes poliméricas	45
2.4 – Técnicas de análise térmica	48
2.4.1 – Termogravimetria (TG).....	49
2.4.2 – Calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	50
2.4.3 – Análise dinâmico-mecânica (DMA)	51
2.5 – Temperatura de termodistorção (HDT).....	54
2.6 – Dureza Barcol.....	55
2.7 – Análise da cura de materiais poliméricos termofixos	57
 Capítulo 3 – Fibras.....	 63
3.1 – Introdução.....	63
3.2 – Fibra de vidro	64
3.3 – Fibra aramida.....	68
3.4 – Fibra de carbono.....	70
3.5 – Forma de apresentação das fibras	75
3.5.1 – Mantas.....	75
3.5.2 – Tecidos	76
 Capítulo 4 – Interface fibra/matriz	 79
4.1 – Introdução.....	79
4.2 – Avaliação da interface fibra/matriz.....	79
4.3 – Mecanismo de transferência de carga	83
4.4 – Análise da interface fibra/matriz.....	89
 Capítulo 5 – Análise micromecânica	 91
5.1 – Propriedades de compósitos unidirecionais na direção longitudinal.....	92
5.2 – Propriedades de compósitos unidirecionais na direção transversal	94
5.3 – Módulo de compósitos com fibra picada ou manta.....	96
5.4 – Frações de massa e frações de volume de fibra e de matriz.....	97
5.4.1 – Calcinação.....	99
5.4.2 – Digestão	101

5.5 – Correção das frações de massa	102
5.6 – Determinação da densidade do compósito	104
5.7 – Determinação do volume de vazios.....	105
5.8 – Determinação da espessura.....	106
Capítulo 6 – Análise de uma lâmina ortotrópica	109
6.1 – Relação tensão-deformação	109
6.1.1 – Ortotropia	112
6.2 – Elementos da matriz de rigidez para materiais ortotrópicos	117
6.3 – Relação tensão-deformação para materiais ortotrópicos no estado plano de tensão	119
6.4 – Relação tensão-deformação para uma lâmina com orientação arbitrária	122
6.5 – Elementos da matriz de flexibilidade para uma lâmina com orientação arbitrária	127
6.6 – Exercício de análise de uma lâmina ortotrópica	131
Capítulo 7 – Análise das tensões e das deformações em laminados	137
7.1 – Teoria clássica da mecânica dos laminados.....	137
7.1.1 – Relações tensão-deformação	137
7.1.2 – Equações constitutivas do laminado	141
7.1.3 – Análise das tensões e das deformações na lâmina	145
7.1.4 – Propriedades elásticas equivalentes de laminados simétricos em função da matriz extensional invertida [a]	148
7.1.5 – Propriedades elásticas equivalentes de laminados simétricos balanceados em função da matriz extensional [A]	149
7.1.6 – Propriedades elásticas equivalentes de laminados <i>cross-ply</i> e <i>angle-ply</i>	151
7.2 – Critérios de resistência	153
7.2.1 – Critério da tensão máxima	155
7.2.2 – Critério da deformação máxima.....	157
7.2.3 – Critério do máximo trabalho (Azzì-Tsai-Hill).....	158
7.2.4 – Critério da interação quadrática (Tsai-Wu).....	160
7.3 – Noções do método dos elementos finitos	162
7.3.1 – Exemplos de análises pelo método dos elementos finitos.....	166
7.3.1.1 – Modelo plano	166
7.3.1.2 – Modelo de casca.....	168
7.4 – Exercício de análise de um laminado.....	169
Capítulo 8 – Processos de fabricação	171
8.1 – Introdução.....	171

8.2 – Forma de combinação dos materiais constituintes no compósito.....	171
8.3 – Agentes desmoldantes.....	172
8.4 – <i>Gel coat</i>	173
8.5 – Processos de fabricação	174
8.5.1 – Laminação por contato (<i>hand lay-up</i>).....	174
8.5.2 – Laminação por projeção (<i>spray-up</i>).....	176
8.5.3 – Enrolamento filamental (<i>filament winding</i>)	178
8.5.4 – Moldagem por prensagem a quente	186
8.5.5 – Moldagem por transferência de matriz polimérica	189
8.5.6 – Moldagem por transferência de matriz polimérica e vácuo.....	191
8.5.7 – Moldagem a vácuo	193
8.5.8 – Infusão	194
8.5.9 – Pultrusão.....	198
8.5.10 – Centrifugação.....	200
8.5.11 – Laminação contínua.....	203
8.5.11.1 – Introdução	203
8.5.11.2 – Sistema de fabricação	203
Capítulo 9 – Caracterização mecânica de compósitos poliméricos	205
9.1 – Introdução.....	205
9.2 – Normalização dos ensaios	205
9.3 – Caracterização mecânica	208
9.3.1 – Introdução	208
9.3.2 – Fibras.....	210
9.3.3 – Matriz polimérica.....	211
9.3.4 – Compósito	214
9.3.4.1 – Tração	216
9.3.4.2 – Compressão	221
9.3.4.3 – Cisalhamento no plano	222
9.3.4.4 – Cisalhamento interlaminar (ILSS)	227
9.3.4.5 – Ensaio de flexão.....	230
9.3.4.6 – Ensaio de fluência.....	232
9.3.4.7 – Ensaio de anel (<i>split disk</i>)	236
Capítulo 10 – Análise macroestrutural e microestrutural.....	239
10.1 – Introdução	239
10.2 - Microscopia óptica (MO)	240

10.3 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	242
10.4 – Fractografia.....	243
10.5 – Preparação de amostras para análise no microscópio óptico	245
Capítulo 11 – Falha e fratura de materiais compósitos poliméricos.....	247
11.1 – Introdução	247
11.2 – Mecanismos de falha	247
11.3 – Tipos e modos de falha.....	249
11.4 – Falhas características em lâminas unidirecionais.....	251
11.4.1 – Tração longitudinal	251
11.4.2 – Tração transversal.....	252
11.4.3 – Compressão longitudinal	253
11.4.4 – Compressão transversal.....	256
11.4.5 – Cisalhamento intralaminar (cisalhamento no plano)	256
Capítulo 12 – Estruturas sanduíche.....	259
12.1 – Introdução	259
12.2 – Materiais empregados na fabricação do núcleo	262
12.2.1 – Madeira balsa	262
12.2.2 – Espumas de PVC	263
12.2.3 – Espumas de poliuretano.....	264
12.2.4 – Estruturas com núcleo colmeia (<i>honeycomb</i>).....	266
12.3 – Colmeias não-planas.....	267
12.4 – Modos de falha em estruturas sanduíche.....	269
Capítulo 13 – Reparos de estruturas sanduíche e laminados sólidos	273
13.1 – Introdução	273
13.2 – Reparos de estruturas sanduíche	274
13.3 – Reparos de laminados sólidos.....	277
13.3.1 – Reparo pelo lado não acabado	280
13.3.2 – Reparo pelo lado acabado.....	281
Referências.....	285
Apêndice A – Tabela de densidades e espessuras de compósitos de fibra de vidro e matriz de resina poliéster com manta e tecido	291

Apêndice B – Resumo da teoria clássica dos laminados	295
Apêndice C – Análise das tensões e das deformações de um compósito de fibra de vidro e matriz de resina epóxi	299
Apêndice D – Conceitos de algumas das principais propriedades avaliadas em ensaio.....	315
Apêndice E – Propriedades de laminados <i>angle-ply</i>	323
Glossário	329

3

FIBRAS

3.1 – Introdução

Na elaboração de um componente estrutural em material compósito procura-se otimizar o aproveitamento das ótimas propriedades mecânicas associadas aos reforços fibrosos. A seleção do reforço leva sempre em conta aspectos que variam desde o custo desses materiais até o desempenho pretendido e a técnica de fabricação empregada.

Considerando uma estrutura sob ação de determinados carregamentos, tais como carregamentos estáticos, dinâmicos ou mesmo com esforços combinados, os componentes que a compõe têm que estar capacitados a desempenhar ações de acordo com as condições previstas ou estabelecidas em projeto. Essas condições nos compósitos são alcançadas pela capacidade do elemento de reforço, que confere à estrutura elevadas propriedades específicas de resistência e módulo de elasticidade na direção da fibra. Fibras de vidro, fibras aramida e fibras de carbono são os elementos de reforço mais utilizados para fabricação de materiais compósitos.

São apresentadas na tabela 3.1²⁶ as propriedades típicas das principais fibras utilizadas na fabricação de compósitos poliméricos. De imediato surge a comparação com os metais. As fibras oferecem propriedades atrativas, contudo, deve ser considerado que as propriedades mecânicas são apenas as das fibras e não as do compósito.

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas de fibras²⁶

Material	Densidade (g.cm ⁻³)	Resistência a tração (MPa)	Resistência específica 10 ³ (Nmkg ⁻¹)	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo específico 10 ⁶ (Nmkg ⁻¹)
Aço-carbono 1020 recozido	7,86	400	50,9	210	26,7
Aço <i>maraging</i> 300	7,86	2000	254,5	210	26,7
Alumínio	2,63	600	228,1	73	27,8
Titânio	4,61	1900	412,1	115	24,9
Fibra de vidro-E	2,54	3448	1357,5	72	28,3
Fibra de vidro-S	2,48	4585	1848,8	85	34,3
Fibra de carbono- HT	1,77	3400	1920,9	238	134,5
Fibra de carbono-HM	1,80	2350	1305,6	358	198,9
Fibra aramida	1,44	2760	1916,7	62	43,1
Fibra aramida-HM	1,44	2760	1916,7	117	81,3
Boro	2,60	3500	1346,2	420	161,5
Fibra de alumina (AL ₂ O ₃)	4,00	2000	500,0	470	117,5
Fibra de carbeto de silício (SiC)	3,40	2300	676,5	480	141,2

As fibras de vidro têm boas propriedades elásticas e um baixo custo que as tornam atra-
tivas para competir com os metais não ferrosos, como o alumínio, por exemplo. As fibras de
carbono apresentam excepcional resistência e módulo específico, permitindo que se tornem
ideais para aplicações que requerem elevada resistência e rigidez e reduzido peso. As fibras ara-
mida possuem boa resistência mecânica e apresentam um módulo de elasticidade intermediário
entre a fibra de vidro e a fibra de carbono, sendo bastante empregadas em componentes que
necessitam de resistência a impacto.

Existem aplicações em que as solicitações muitas vezes não exigem as mesmas condições
de resistência para todas as direções. Em alguns casos, pode ser útil combinar reforços diferentes
para atender a requisitos específicos de utilização do material. Não raro, há projetos que exigem
a utilização de fibra de vidro com fibra aramida, fibra de vidro com fibra de carbono ou mesmo
fibra de carbono com fibra aramida. Esses compósitos são denominados híbridos. Um exemplo
seria o de uma peça que necessitasse de elevada resistência mecânica, com possibilidade de sofrer
impacto. Nessa situação, seria recomendada a construção de um compósito empregando-se fibra
de carbono e fibra aramida, com as camadas dispostas em orientações estabelecidas pelo projeto.
A vantagem que o compósito híbrido oferece vem do fato de se conseguir propriedades que não
seriam obtidas em um compósito onde apenas um tipo de reforço fosse empregado.

3.2 – Fibra de vidro

Apesar de o vidro ser conhecido há milhares de anos, foi somente próximo à metade do
século XX que o material pôde ser produzido na forma de contínuos e minúsculos filamentos,

permitindo sua utilização na indústria têxtil e a fabricação de produtos de isolamento elétrico. Contudo, foi a partir de sua combinação com materiais poliméricos que um novo conceito de material surgiu, permitindo, em menos de duas décadas depois, o nascimento de uma nova indústria, a indústria dos materiais compósitos poliméricos.

As fibras de vidro proporcionam a melhor relação custo/benefício entre os reforços oferecidos para fabricação de materiais compósitos poliméricos. Boa parte disso se deve à origem e abundância das matérias-primas utilizadas para fabricação do material, principalmente o silício contido nas areias, que com calcário, ácido bórico, carvão e argila são os ingredientes utilizados para fabricação do vidro. Essas matérias-primas são fundidas num forno refratário com temperatura em torno de 1450°C e, quando convenientemente processadas após a formação do vidro, dão origem às fibras de vidro na forma contínua e picada. A figura 3.1²⁷ ilustra este processo de fabricação.

A transformação da massa fundida em fios é feita pelo processo de fiação por fusão, a qual permite a obtenção de filamentos contínuos pela passagem da massa fundida de vidro por uma placa de platina, denominada de feira ou peneira (*bushing*), que possui centenas e até milhares de microfuros. O diâmetro dos monofilamentos de vidro pode variar em função dos microfuros da feira, mas estão numa faixa de 12 a 16 μm .

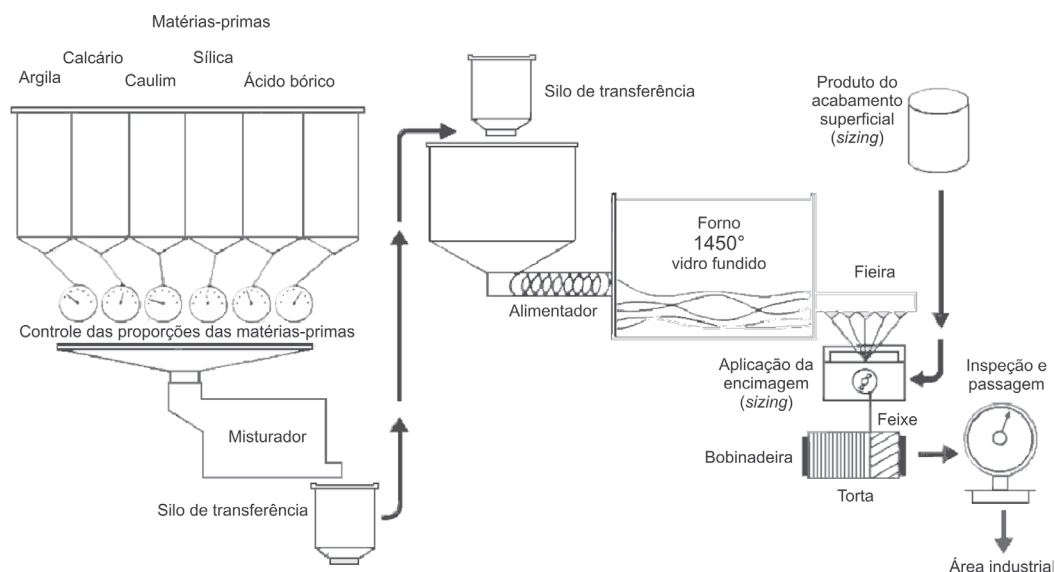


Figura 3.1 – Ilustração do processo de fabricação de fibras de vidro²⁷

Após passar pela feira, os filamentos altamente viscosos são solidificados por resfriamento e recebem um acabamento superficial denominado de ensimagem. Esse tratamento é feito por uma emulsão aquosa que contém, entre outras substâncias, agentes de ligação, formadores de filme, agentes antiestáticos e lubrificantes.

A ensimagem (*binder* ou *sizing*) tem uma função importante no processo de fabricação das fibras de vidro, pois confere flexibilidade, além de compatibilidade com a matriz polimérica que será empregada para fabricação do compósito, proteção superficial para manuseio e contato com elementos dos equipamentos de fabricação, atuando também como agente de aglutinação

dos filamentos. Fibras que serão utilizadas para fabricação de tecidos recebem também um acabamento superficial com agentes lubrificantes, que tem a função de proteger as fibras durante as seguidas etapas para a fabricação do tecido devido ao contato com elementos metálicos e cerâmicos dos teares.

A micronagem de uma fibra de vidro, que está relacionada ao diâmetro, pode ser afetada pela variação da temperatura na feira ou pela velocidade das enroladeiras (bobinadeiras), alterando a densidade linear, também chamada de título, uma vez que a vazão do vidro fundido que passa pelas feiras pode ser considerada constante. A unidade característica que representa a densidade linear de uma fibra é o tex, que expressa a quantidade em gramas que a fibra possui por um quilômetro do material, sendo dada, portanto, em g/km. Há ainda o múltiplo dtex, que representa a quantidade em gramas por dez quilômetros de fibra.

Propriedades como boa dispersão, facilidade de corte, bom assentamento no molde, baixa formação de eletricidade estática, boa conformação em cantos vivos, boa translucidez e fácil desenrolamento são esperadas numa fibra de vidro de qualidade.

As fibras de vidro, de acordo com os tipos e composições das matérias-primas, apresentam diferença de desempenho e atendem a vários segmentos do mercado. A primeira fibra comercial era fabricada com uma elevada porcentagem de substância alcalina, a soda, e conhecida como fibra de vidro de garrafa, em virtude da associação com o vidro para fabricação de garrafas ou vidro A.

Por apresentarem um elevado conteúdo de álcalis, as fibras de vidro A oferecem uma boa resistência química, em detrimento das propriedades elétricas do material, tornando seu uso não recomendado para aplicações que exigem isolamento elétrico. Para solucionar essa questão foi desenvolvida a fibra de vidro tipo E, que contém alumina-borosilicato e reduzido teor de álcalis. Essa fibra de vidro tornou-se a padrão no mercado para fabricação de compósitos por possuir elevada resistência mecânica e boas propriedades químicas.

Quando objetivo é elevada resistência química, a fibra tipo C deve ser utilizada, pois possui sódio borosilicato, tornando-a recomendada para fabricação de véus de superfície quase sempre empregados como *liners* e, portanto, em contato direto com o produto químico a ser armazenado ou transportado.

Para melhorar o comportamento das fibras de vidro em ambientes que necessitam de resistência química, foram desenvolvidas ainda a fibra de vidro E-CR (E – *corrosion resistant*) que tem ausência de boro na formulação do vidro e a fibra de vidro AR (*alkali resistant*) que tem adição de 16% de óxido de zircônia. A primeira, derivada da fibra E, oferece resistência química em ambientes ácidos, enquanto que a segunda é indicada para soluções alcalinas como o hidróxido de sódio, sendo também resistente a alguns tipos de ácido, como o ácido clorídrico em baixas concentrações e temperaturas próximas a da ambiente²⁸. Uma utilização esperada para fibras tipo AR é o reforço de concreto com cimento Portland, que apresenta um pH de 13, um valor extremamente elevado.

Para fabricação de compósitos cujas aplicações requerem elevada resistência mecânica e resistência a temperaturas elevadas, há no mercado a fibra de vidro S, que possui resistência à tração de cerca de 40% superior à fibra E.

Na tabela 3.2²⁸ estão contidas as principais propriedades das fibras de vidro tipo A, C, E e S. É

possível se notar que a resistência das fibras de vidro apresentam valores elevados, porém exibem um valor de módulo de elasticidade que pode ser considerado baixo para algumas aplicações estruturais.

Tabela 3.2 – Principais propriedades das fibras de vidro²⁸

Propriedades	A	C	E	S
Densidade (g.cm ⁻³)	2,54	2,49	2,54	2,48
Resistência à tração (MPa) 25°C	3033	3033	3448	4585
Resistência à tração (MPa) 370°C	-	-	2620	3758
Módulo de elasticidade (GPa) 25°C	-	69,0	72,4	85,5
Alongamento (%) a 25°C	-	4,8	4,8	5,7

Observa-se na figura 3.2 que as fibras de vidro são produzidas pelo mesmo processo de fabricação até a etapa final, quando se originam as duas formas principais do material: filamentos contínuos e filamentos descontínuos, muitas vezes referenciados, respectivamente, como *single-end* e *multi-end*. Cada uma dessas formas dará origem às inúmeras possibilidades de formação do material para ser utilizado como reforço, tais como mantas, véus de superfície, tecidos e fibras contínuas.

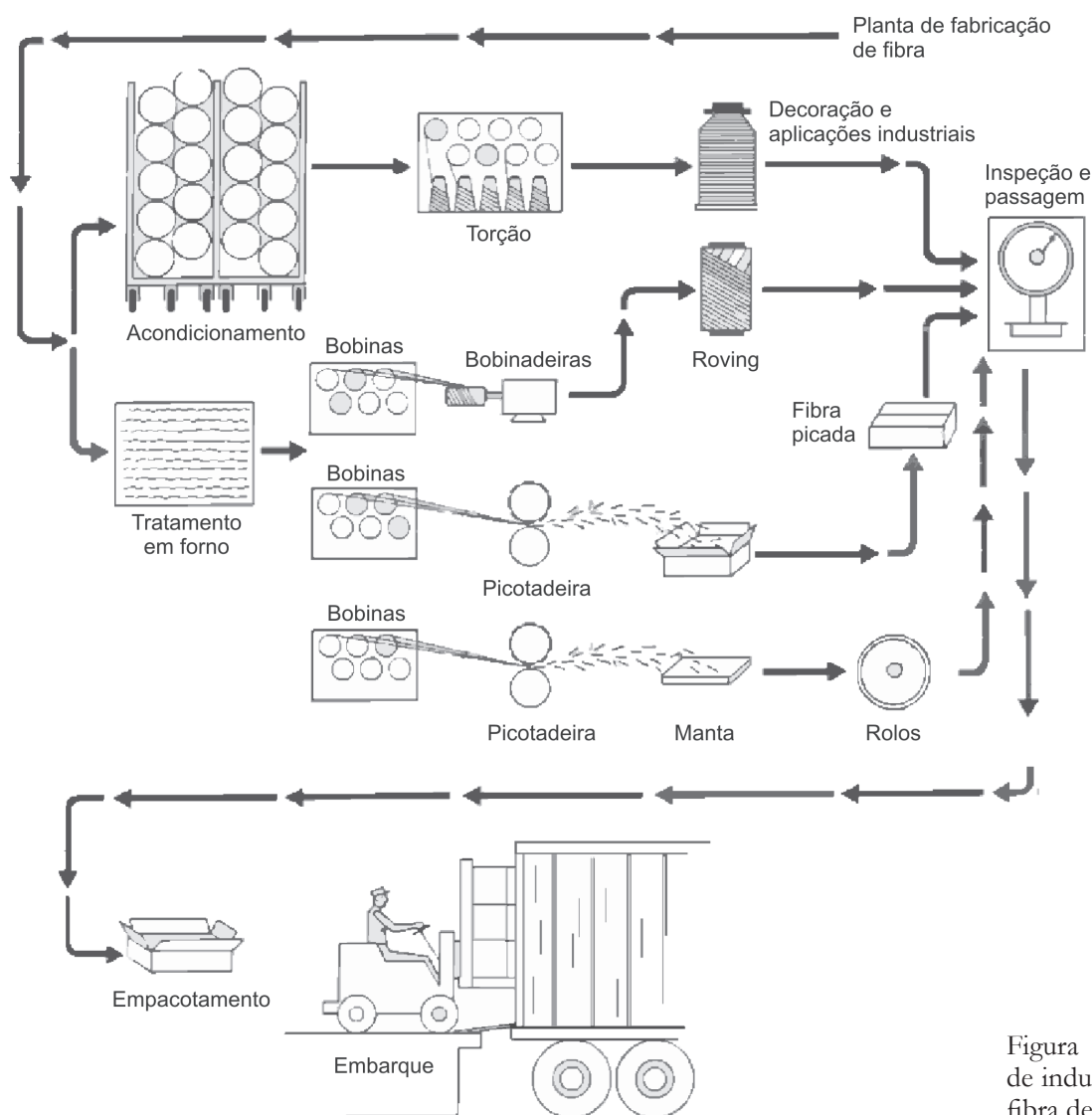


Figura 3.2 – Etapas de industrialização da fibra de vidro²⁷

As fibras contínuas são formados em duas etapas. Inicialmente grupos de filamentos das feiras, formando feixes, são enrolados em bobinas, chamadas de tortas. Na ilustração da figura 3.1, um feixe é formado pela reunião de cinco filamentos e, nesse caso, o cabo da torta é chamado de *split* 1 ou S-1. Caso houvessem dois feixes, o cabo da torta é denominado de *split* 2 ou S-2. Assim, quando diz-se que o cabo de uma determinada torta é de *split* 5 (S-5), significa que o cabo é constituído por cinco feixes, cada um formado pela reunião de um determinado número de filamentos a critério do fabricante.

A fibra contínua é o primeiro produto na escala de produção das fibras de vidro para a indústria de materiais compósitos, que faz o mercado oferecer o produto a um preço atrativo, o que consequentemente favorece sua maior utilização. As fibras picadas e as mantas, com diversas gramaturas, possuem maior valor agregado devido às vantagens que oferecem na fabricação do compósito e por isso têm um preço maior. Finalmente, a fibra contínua é utilizada na fabricação de tecidos, um produto muito mais elaborado e que oferece vantagens significativas em relação à fibra contínua e às mantas.

A última fase do processo produtivo consiste em preparar as fibras para cada uma das aplicações que terão no mercado, conforme é ilustrado na figura 3.2²⁷. São fibras contínuas, fibras picadas, mantas, fibras com torção e sem torção; que atenderão inúmeros processos de fabricação, dando início a uma grande cadeia produtiva na fabricação de compósitos.

A estocagem dessas fibras requer cuidados especiais, principalmente quanto à limpeza e à umidade. Essa última causa dano no acabamento superficial e interfere na qualidade da ligação fibra-matriz.

3.3 – Fibra aramida

Fibra aramida é o nome genérico das fibras poliamidas aromáticas, que são conhecidas como Kevlar®, nome comercial que a empresa Du Pont deu ao produto de sua invenção. A fibra aramida é obtida pela policondensação de diaminas e diácidos a baixas temperaturas, produzindo macromoléculas constituídas de amidas ligadas a anéis aromáticos. Após a síntese do polímero, as fibras são obtidas pelo processo de fiação a úmido. Para que possa ser extrudado, o polímero é dissolvido em um agente que é retirado no primeiro estágio do processo de fiação durante a passagem no tanque de coagulação, sendo em seguida lavado, neutralizado e seco e em seguida bobinado. A estrutura química da fibra aramida é mostrada na figura 3.3²⁹.

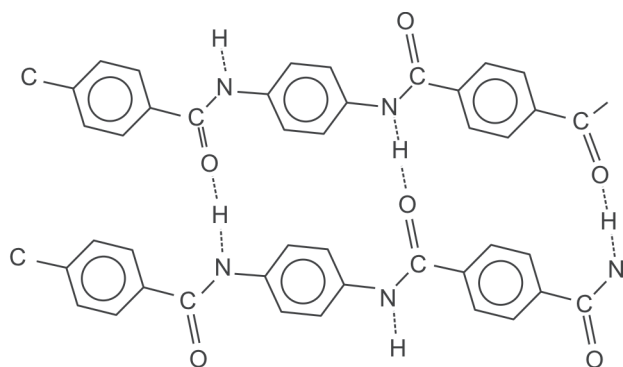


Figura 3.3 – Estrutura química da fibra aramida²⁹

Como se observa na figura, as cadeias poliméricas são ligadas entre si na direção transversal por ligações de hidrogênio (pontes de hidrogênio). Isso caracteriza a anisotropia das fibras aramida em relação às propriedades mecânicas, porque há elevada resistência na direção da fibra devido às fortes ligações covalentes entre as moléculas do polímero, que apresentam alta proporção de elementos estruturais aromáticos e fracas ligações na direção transversal nas ligações com o hidrogênio. O alto grau de orientação das cadeias moleculares na direção longitudinal da fibra assegura ao material alta resistência ao calor e elevadas propriedades mecânicas.

Após a solução dos problemas de fiação encontrados no novo material, a Du Pont iniciou a produção da fibra em pequena escala no final da década de 1960, mas nessa época ainda não tinha detectado os usos potenciais da fibra. Devido ao próprio desconhecimento do mercado em relação às propriedades mecânicas e físico-químicas, foi necessário investimento para desenvolver aplicação para o material. No início de 1970 já haviam ocorrido avanços significativos e, em 1972, foi inaugurada a primeira fábrica para uma produção de 2,5 milhões de kg/ano, sendo que, em 1982, houve uma expansão das instalações para uma produção de 21 milhões de kg/ano. Uma das primeiras aplicações da fibra na indústria aeronáutica, no ano de 1974, foi no avião Lockheed L-1011 TriStar, que de acordo com a Du Pont possibilitou uma redução de 360 kg no peso da aeronave, estimulando a utilização do material como substituto da fibra de vidro.

Fibras aramida são resistentes ao fogo, são isolantes elétricos e térmicos e possuem resistência química a solventes orgânicos, combustíveis e lubrificantes. Talvez o maior diferencial que apresenta em relação às fibras de vidro e de carbono seja sua elevada tenacidade, o que lhes garante a indicação para fabricação de coletes e blindagens para resistir a impactos causados por projéteis de armas de fogo.

Há dois tipos de fibra aramida disponíveis no mercado: a de baixo módulo e a de alto módulo. Na primeira, destacam-se aplicações na substituição de cordéis de aço na fabricação de pneus radiais, correias transportadoras, mangueiras e produtos de borracha em geral que sofrem ações mecânicas, bem como produtos para proteção contra armas de fogo manuais. Para fabricação de compósitos é utilizada a fibra de alto módulo que possui baixa densidade, elevada resistência à tração e alto módulo de elasticidade. Além da fibra aramida da Du Pont, há no mercado a fibra aramida da Teijin Aramid, denominada Twaron®, que apresenta o mesmo potencial da fibra da Du Pont.

A fibra aramida pode ser combinada com a maioria dos sistemas poliméricos disponíveis para fabricação de compósitos. Na tabela 3.3 estão contidas as principais propriedades da fibra aramida³⁰.

Tabela 3.3 – Propriedades da fibra aramida³⁰

	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na ruptura (%)	Densidade (g.cm⁻³)
Aramida de baixo módulo	2760	62	3,6	1,44
Aramida de alto módulo	2760	117	2,5	1,44

3.4 – Fibra de carbono

O desenvolvimento das fibras de carbono no final da década de 1960 permitiu o avanço que colocaria os compósitos poliméricos como um material capaz de aplicações antes reservadas aos metais.

O potencial das fibras de carbono não está associado apenas à baixa densidade e elevada resistência mecânica, mas, sobretudo no alto módulo de elasticidade e reduzida deformação que o material possui, que as colocam como candidatas em potencial para fabricação de estruturas onde esses requisitos são exigidos. Por isso, a fibra de carbono é o reforço predominante para fabricação de compósitos estruturais.

As matérias-primas para fabricação de fibras de carbono são a poliacrilonitrila (PAN), o Rayon e o piche mesofásico, das quais, principalmente por razões econômicas, prevaleceu a primeira. Desse modo, as fibras de carbono disponíveis comercialmente utilizam a PAN como material precursor.

A poliacrilonitrila é uma fibra acrílica que possui uma estrutura molecular que faz lembrar o polietileno, no qual um átomo de hidrogênio foi substituído por um grupo nitrila. A síntese da PAN é feita utilizando-se acrilonitrila, acrilato de metila e ácido itacônico, e, por um processo de fiação a úmido, obtém-se a fibra de poliacrilonitrila.

As propriedades físico-químicas da fibra de poliacrilonitrila devem atender a padrões rigorosos de qualidade, o que exige controles eletrônicos em todas as etapas do processo, da síntese do polímero à fiação. Um desses parâmetros está relacionado ao estiramento que a fibra sofre durante a fiação para produzir alinhamento das cadeias moleculares com a direção do eixo da fibra. A figura 3.4 ilustra o processo de fabricação da fibra de poliacrilonitrila.

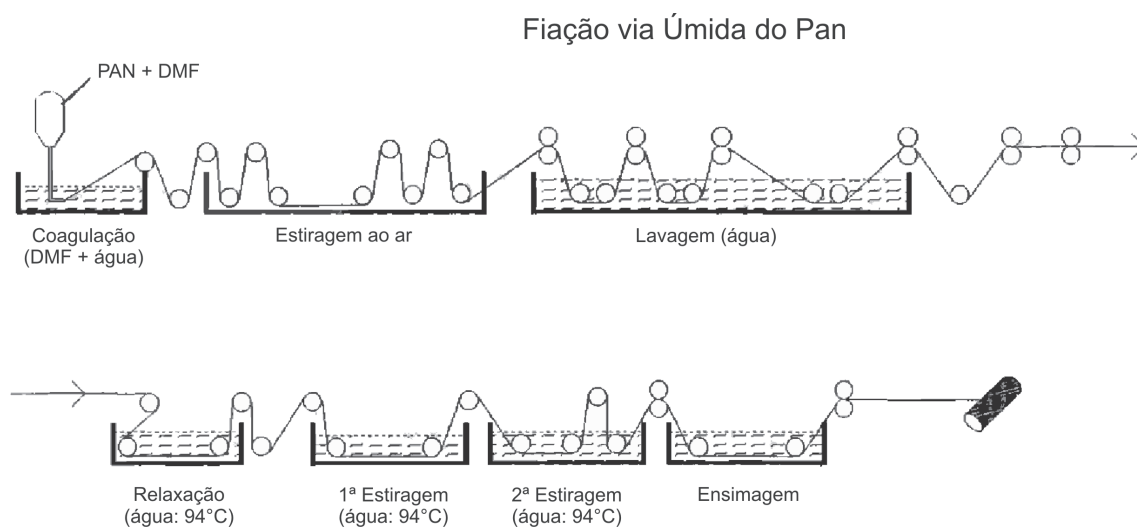


Figura 3.4 – Esquema da fiação da fibra de PAN

O processo usual para fabricação da PAN consiste em fiar a fibra pelo processo de fiação a úmido e produzir uma alta orientação da cadeia polimérica em duas etapas de estiramento, sendo a primeira a frio e a segunda a quente, com temperatura um pouco abaixo da transição vítrea do polímero. Segue-se a etapa de aplicação da ensimagem (*sizing*) para aglutinamento dos filamentos e proteção superficial, secagem e bobinamento. O grau de cristalinidade da PAN fica em torno de 60%.

Com tensão de ruptura de apenas 750 MPa, módulo de elasticidade de 10 GPa e alongamento de 15%, tais propriedades tornam a fibra de PAN incapaz para qualquer tipo de aplicação em compósitos estruturais. Essas propriedades são, no entanto, drasticamente melhoradas por meio dos processos que incluem oxidação e carbonização e, em alguns tipos de fibra, grafitização, que exige temperatura acima de 2000°C no forno de grafitização. Temperaturas de carbonização mais elevadas resultam em um aumento do módulo de elasticidade, enquanto que fibras de alta resistência mecânica são obtidas em temperaturas na faixa de 1500°C.

A rota adotada para fabricação de fibras de carbono a partir da PAN inclui as etapas de oxidação, carbonização, tratamento superficial (*finish*) e acabamento superficial (*sizing*), também chamado de ensimagem. As etapas de oxidação e carbonização são processos complexos que produzem a modificação do arranjo molecular linear da poliacrilonitrila para um arranjo de anéis de carbono em planos basais, produzindo um alto grau de orientação molecular e teor de carbono acima de 90%.

As etapas do processo têm como objetivo orientar as camadas hexagonais dos anéis de carbono paralelamente ao eixo da fibra, chamado de planos basais. Essa é a razão de as fibras de carbono apresentar resistência em apenas uma direção, o que contribui para a anisotropia que existe nos materiais compósitos.

A primeira etapa da fabricação da fibra de carbono é a oxidação da poliacrilonitrila. Nessa etapa, a fibra circula por um forno com atmosfera oxidante, tendo um tempo de residência que pode chegar a 1 hora. Com uma velocidade muito lenta, a fibra passa por zonas de temperatura que vão de 180°C até cerca de 300°C, que irão formar anéis cíclicos do grupo nitrila e ligação do oxigênio à estrutura molecular obtida.

A PAN oxidada apresenta utilização comercial na fabricação de produtos de proteção ao fogo, proteção térmica e em aplicações especiais na substituição do asbesto. Os principais parâmetros de processo que são controlados para produzir uma fibra oxidada são as temperaturas das várias zonas do forno de oxidação, o tempo de residência da fibra no forno e a tensão de estiramento. Nessa etapa, a fibra apresenta um teor de carbono em torno de 60% e oxigênio de 8 a 12%. Na figura 3.5 é mostrada a sequência de formação dos anéis cíclicos do grupo nitrila e a ligação do oxigênio à cadeia da molécula³¹.

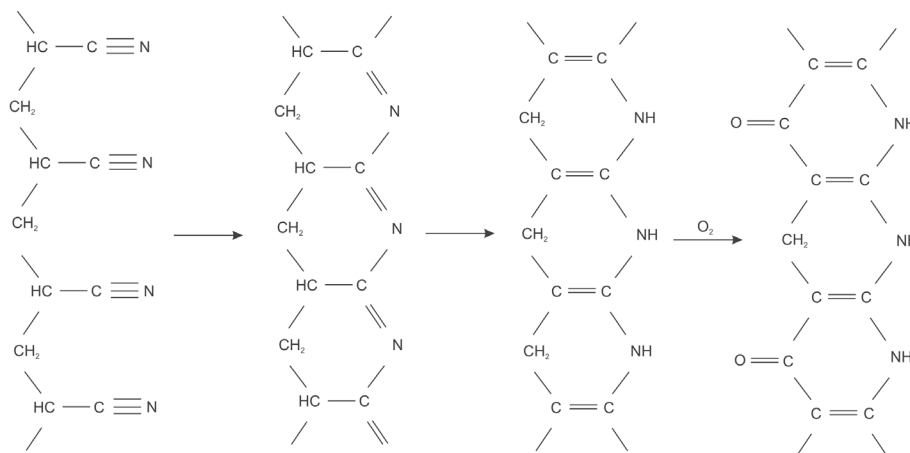


Figura 3.5 – Ciclização (formação dos anéis cíclicos do grupo nitrila) e oxidação³¹

A etapa de carbonização, de acordo com o teor de carbono alcançado, definirá propriedades que classificarão o material em classes de fibras de alta resistência mecânica (HT), fibras de alto módulo de elasticidade (HM) e fibras de módulo intermediário (IM), que propiciarão aos usuários uma ampla escolha dos reforços para atender às exigências de resistência, rigidez ou ambas.

Na carbonização, a fibra oxidada é transferida para um forno com atmosfera inerte, geralmente nitrogênio ultrapuro, sofrendo um aquecimento gradual de até 1400°C, com permanência no forno de carbonização de apenas alguns minutos. A temperatura elevada e o controle das velocidades na tração produzindo estiramento na fibra permitirão a formação de uma estrutura hexagonal de carbono com alinhamento das moléculas em torno de 82% e teor de carbono de 92 a 93%, que faz o material alcançar propriedades superiores a 3300 MPa de resistência mecânica, e módulo de elasticidade longitudinal acima de 230 GPa e densidade em torno de 1,8 g.cm⁻³.

A figura 3.6 ilustra as etapas de fabricação da fibra de carbono³², e na tabela 3.4 estão contidas as principais propriedades do material. Observa-se que há ainda duas etapas que não foram descritas e são muito importantes para a fabricação do compósito: tratamento superficial (*finish*) e acabamento superficial (*sizing*).

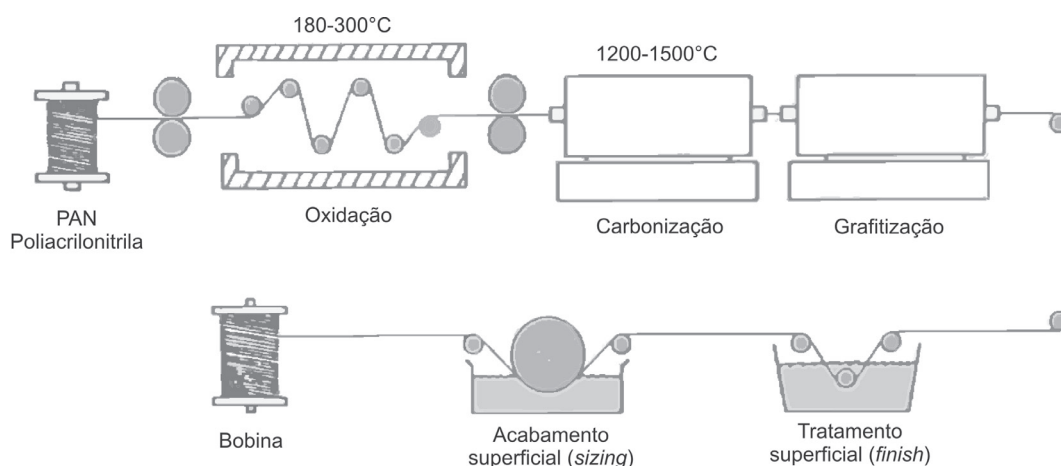


Figura 3.6 – Ilustração esquemática do processo de fabricação da fibra de carbono³²

O tratamento superficial tem por função promover a adesão química entre a fibra e a matriz polimérica por meio da formação de grupos funcionais na superfície da fibra, utilizando-se, para isso, processos eletrolíticos. A adesão ocorre pela ligação dos grupos funcionais da fibra com grupos ativos da matriz, estabelecendo-se o que se denomina de interface fibra/matriz.

O acabamento superficial é um material orgânico que é depositado sobre a fibra para proteger o tratamento superficial e aglutinar os filamentos. Ao mesmo tempo em que facilita o manuseio da fibra durante a fabricação do compósito, suaviza o contato dessa com elementos dos equipamentos de fabricação, evitando a quebra de monofilamentos. As fibras de carbono recebem um acabamento compatível com todas as resinas de mercado, em particular com as resinas epóxi, uma vez que esses sistemas predominam no mercado de aplicações estruturais.

Tabela 3.4 – Propriedades da fibra de carbono

	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na ruptura (%)	Densidade (g.cm ⁻³)
Elevada resistência (HT)	3400	238	1,5	1,77
Alto módulo (HM)	2350	358	0,6	1,79
Módulo intermediário (IM)	4100	295	1,5	1,77

Há vários modelos utilizados para explicar o mecanismo de formação da estrutura gráfica na carbonização. Dois mecanismos propostos por Watt³³, ilustrados na figura 3.7, permitem uma compreensão do fenômeno que ocorre em temperaturas acima de 600°C.

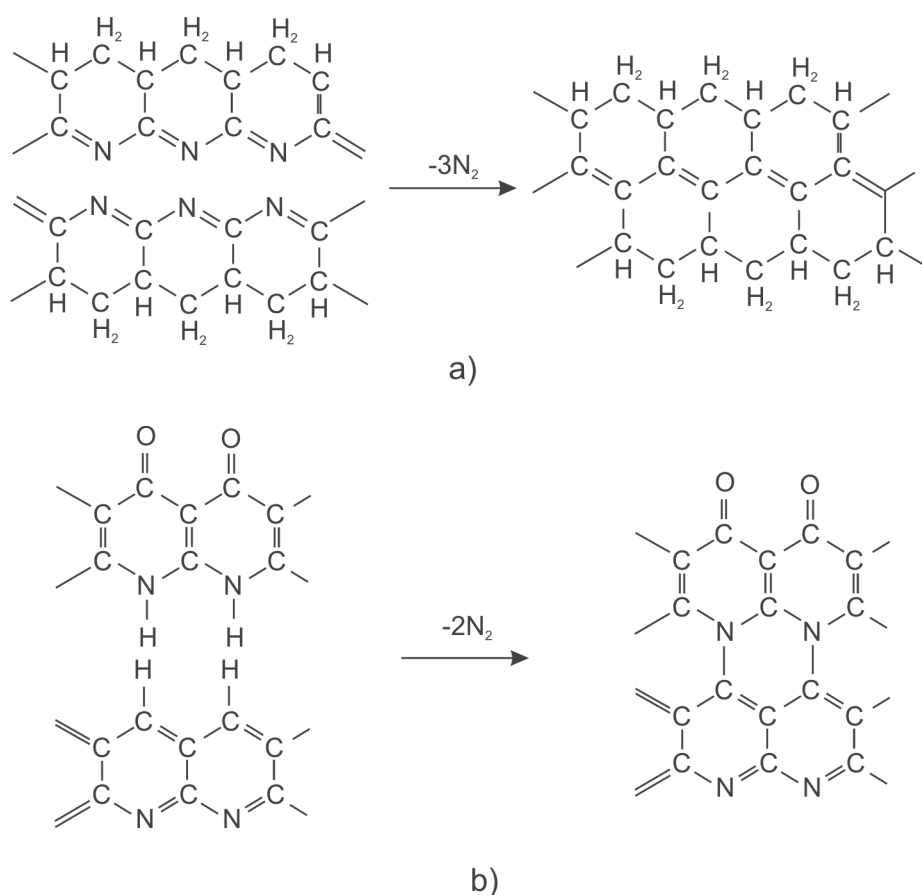


Figura 3.7 – Mecanismo das ligações das moléculas na carbonização: a) liberação de nitrogênio, b) liberação de hidrogênio³³

Finalmente, como ilustração, vale colocar lado a lado uma bobina do precursor de PAN e uma bobina de fibra de carbono, exibidos na figura 3.8. Desde a síntese da poliacrilonitrila até a planta de fabricação da fibra de carbono, se desenvolve um processo dispendioso com aplicação de alta tecnologia, o que permitiu aos compósitos o grande salto tecnológico em apenas quatro décadas de utilização, com aplicações antes não imagináveis para essa classe de material.



Figura 3.8 – Foto de uma bobina de PAN e de uma bobina de fibra de carbono

Um gráfico tipo teia (radar), comparando os três principais tipos de fibra utilizadas na fabricação de compósitos, é mostrado na figura 3.9. É possível estabelecer relações considerando-se propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade, resistência mecânica e deformação na ruptura; propriedade física, como densidade, e ainda preço e necessidade de importação.

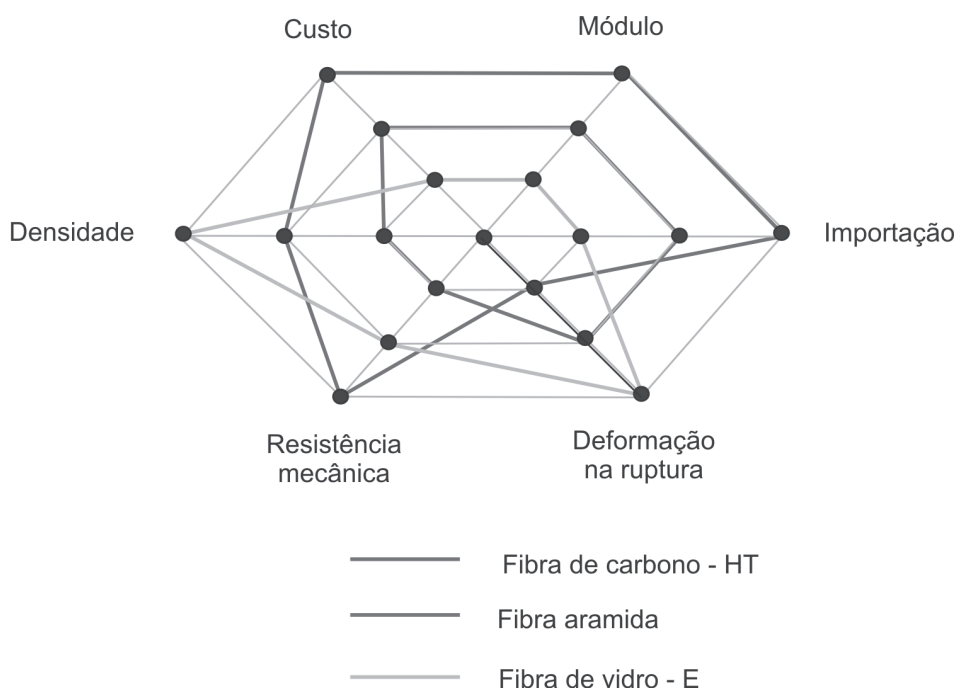


Figura 3.9 – Gráfico tipo teia comparando fibras de vidro, carbono e aramida

A interpretação do gráfico é feita atribuindo-se o menor quesito aos pontos próximos ao centro e maior valor aos pontos que estão na periferia da teia. Desse modo, tem-se, por exemplo, que a fibra de carbono tem o maior módulo, enquanto que a fibra aramida possui a menor densidade e a fibra de vidro o menor preço. A necessidade de importação considera que a fibra de vidro tem a menor restrição quanto a esse item, sendo necessária a importação somente no caso de fibras especiais, como a do tipo S, por exemplo, que é pouco usada no Brasil. A fibra aramida

e a fibra de carbono necessitam de importação e os fabricantes podem oferecer certa restrição de venda, considerando determinadas aplicações.

A análise do gráfico da figura 3.9 permite concluir que a fibra de carbono é a que oferece melhores propriedades mecânicas, contudo o elevado preço e a necessidade de importação tornam sua utilização restrita a componentes e estruturas que justificam o investimento.

A fibra aramida possui propriedades atrativas e situadas entre as propriedades da fibra de carbono e da fibra de vidro. O preço, cerca da metade da fibra de carbono, favorece sua utilização em projetos estruturais e apresenta a menor densidade entre as três.

A fibra de vidro, apesar do preço cerca de dez vezes inferior ao da fibra de carbono e da oferta no mercado nacional, possui o módulo de elasticidade mais baixo e a maior densidade entre as matérias-primas de reforço. A resistência é elevada, o que garante à fibra de vidro uma boa relação custo-benefício.

3.5 – Forma de apresentação das fibras

Na definição mais usual, fibra para fabricação de compósitos poliméricos é a reunião de milhares de monofilamentos contínuos, orientados numa só direção e unidos por um material aglomerante. Assim, a fibra é o primeiro produto na escala dos materiais de reforços. São materiais contínuos que podem ser torcidos (*twisted*) durante a fabricação, denominados de *yarns*, ou não torcidos (*non-twisted*), denominados de *rovings*. As fibras são disponíveis na forma de fibras curtas e fragmentadas ou na forma de filamentos contínuos, sendo cada uma fabricada numa ampla variedade de produtos.

3.5.1 – Mantas

Fibras curtas (*chopped fibers*) são obtidas pela fragmentação de fibras contínuas, picadas num rolete contendo lâminas de aço, com comprimentos que podem variar de 0,6 até 5 cm e são empregadas nos processos de laminação manual (*hand lay-up*) ou laminação por projeção (*spray-up*).

Quando fibras picadas são unidas por um material ligante, são fabricadas duas formas bastante usuais dos materiais de reforço, especialmente as fibras de vidro: os véus e as mantas. Os véus são materiais finos utilizados na fabricação de compósitos e atuam como camadas de proteção contra agentes químicos, por isso muitas vezes são conhecidos como véus de superfície. Atuam como barreira química, formando um *liner* no compósito, e não apresentam função estrutural. As gramaturas mais utilizadas dos véus são de 25 a 80 g.m⁻².

As mantas são obtidas pelo arranjo aleatório de fibras de vidro cortadas de forma uniforme com cerca de 5 cm de comprimento e agregadas em forma de placas por ligantes especiais. Apresentam uma distribuição relativamente uniforme da resistência em qualquer direção devido à distribuição ao acaso das fibras, conforme ilustrado na figura 3.10. Possuem as vantagens de ser de fácil aplicação, ter excelente molhabilidade e boa moldabilidade, especialmente em moldes

com contornos sinuosos, e produzir laminados mais homogêneos e de espessura controlada, se comparadas aos de fibra picada. A maior desvantagem está associada às baixas propriedades mecânicas e elásticas que o material possui em relação às fibras contínuas. As mantas são fabricadas nas gramaturas de 300 g.m^{-2} , 450 g.m^{-2} e 600 g.m^{-2} , o que proporciona aproximadamente espessuras por camada de respectivamente de 0,8; 1,0 e 1,3 mm, para frações de 30% de fibra e 70% de matriz.

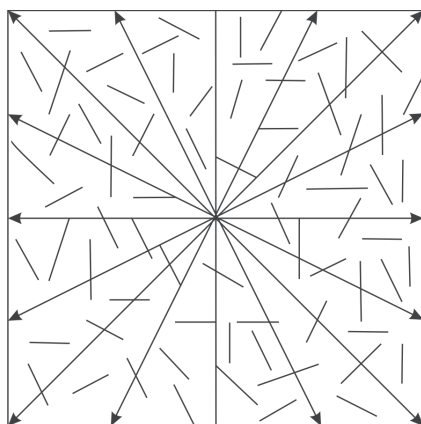


Figura 3.10 – Ilustração da orientação das fibras em uma manta

3.5.2 – Tecidos

A montagem das fibras na direção do comprimento do fio, chamada de urdume, e na direção transversal, denominada de trama, permite a fabricação de tecidos que conferem ao compósito resistência em duas direções. Os tecidos possuem maior custo quando comparados às mantas, entretanto, oferecem propriedades superiores em termos de resistência e rigidez e maior estabilidade dimensional ao compósito. De acordo com o arranjo entre urdume e trama, há, por exemplo, a formação de tecidos tipo tela (*plain weave*), tipo sarja (*twill weave*) e tipo cetim (*satin weave*), cada um com diferentes características e aplicações.

Como os tecidos são fabricados em uma ampla variedade de entrelaçamentos, surge a necessidade da definição de dois conceitos que, aliados a outras características, definem o tecido a ser especificado para uma aplicação. Esses conceitos já foram previamente discutidos, mas convém aqui mantê-los para melhor fixação. O título da fibra expressa a relação que existe entre a massa e o comprimento, o que determina sua massa linear. Quando o título é dado por 1.000 metros de fibra, esse é indicado pela denominação de tex, sendo frequente a relação para comprimento de 10.000 metros com a atribuição do nome de dtex. Uma denominação comum na indústria têxtil é o título para comprimento de 9.000 metros de tecido, que recebe a identificação de denier.

Outro conceito, que é de compreensão imediata, se refere à massa de um tecido por unidade de área, que define a gramatura, expressa em g.m^{-2} . No entanto, nem todos os tecidos apresentam igual distribuição de massa na direção da trama e do urdume. Quando isso ocorre, os tecidos são denominados de desbalanceados, em oposição aos tecidos que possuem mesma distribuição de massa nas duas direções, chamados de balanceados. Esse conhecimento é importante para o cálculo de algumas propriedades físicas e mecânicas do compósito.

Os tecidos podem ser divididos em dois grupos: os planos, padrão tela ou cetim, e os de padronagem sarja. O tecido padrão tela é fabricado alternando-se o fio de urdume sobre e sob o fio de trama, com essa sequência sendo invertida na fileira seguinte, de forma a se ter um arranjo conforme mostrado na figura 3.11a. Essa construção proporciona maior estabilidade ao tecido, dificulta o escorregamento das fibras e a menor formação de porosidade no compósito. Oferece também a mesma resistência nas duas direções de orientação das fibras, de modo que as maiores vantagens são obtidas quando as fibras estão orientadas nas direções das tensões principais atuantes no compósito. A orientação não é feita somente nas direções $0^\circ/90^\circ$, mas também a $\pm 45^\circ$ (não representada na figura), que confere ao tecido maior capacidade de resistir a esforços de torção, proporcionando maior resistência ao cisalhamento.

Frequentemente são utilizados tecidos de fibra de vidro padrão tela intercalados entre camadas de mantas na fabricação de compósitos. Essa montagem permite uma maior compactação do laminado e também tem a vantagem de se obter as propriedades que ambos os materiais oferecem. Tecidos de fibra de vidro padrão tela são fabricados com gramaturas variando de 150 g.m^{-2} até 1000 g.m^{-2} .

Na construção típica de um tecido sarja, por exemplo, no padrão 2x1, um fio da trama é entrelaçado sob e sobre dois fios do urdume em movimentos sucessivos. No tecido tipo padrão cetim, há uma passagem do fio da trama sob vários fios sucessivos do urdume e em seguida sobre um fio ou alguns fios desse. Quando, por exemplo, esse arranjo é feito de modo que a trama passe sob quatro fios sucessivos do urdume e em seguida sobre um fio deste, a denominação adotada é conhecida como *five-harness satin*. A figura 3.11b ilustra esse arranjo.

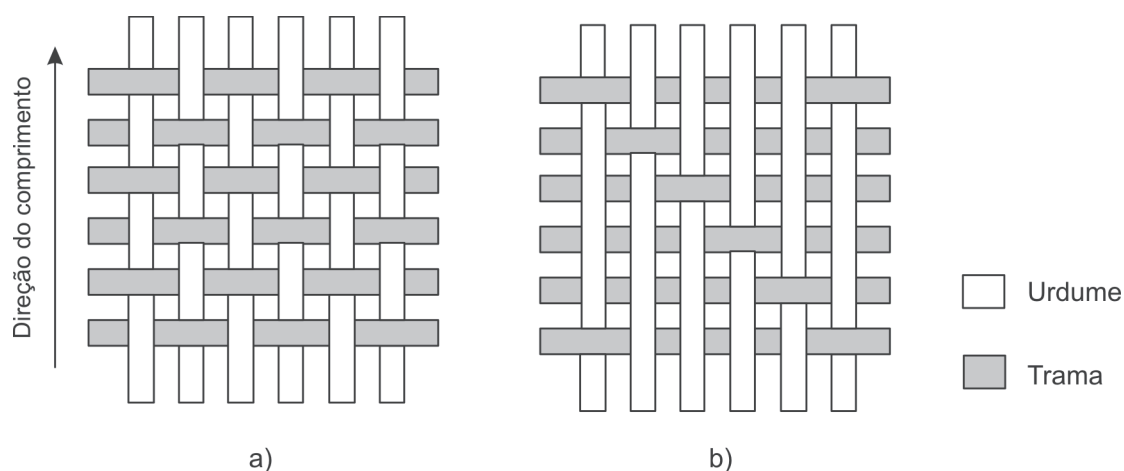


Figura 3.11 – Arranjo das fibras nas formas principais de tecido: a) tecido tipo tela (*plain weave*), b) tecido tipo cetim (*satin weave*)

Em uma escala de maleabilidade, poderia ser colocada a relação cetim-sarja-tela, sendo o padrão cetim o mais maleável e flexível. Isso favorece uma melhor acomodação sobre moldes de geometria complexa e também permite uma melhor impregnação e retirada do ar retido no tecido. Tecidos padrão tela ou sarja, devido a uma pior acomodação, podem criar dobras na superfícies, afetando o acabamento da peça. Deve-se ressaltar, entretanto, que há um grande número de padrões de tecidos e isso pode implicar que, numa determinada construção, o padrão sarja seja mais maleável que o cetim.

Para permitir maior flexibilidade de projeto, são fabricados tecidos híbridos que utilizam uma construção em que um determinado tipo de reforço ou ainda mais que um tipo de reforço é colocado no urdume e outro tipo na trama. Assim, dependendo da aplicação, é possível fabricar compósitos com fibra de carbono numa direção e fibra de vidro em outra, ou ainda fibra de aramida com fibra de carbono numa direção e fibra de vidro na outra. Ampliando ainda mais a oferta de produtos, existem tecidos costurados com manta e tecidos multiaxiais, que consistem de vários tecidos costurados em orientações diferentes.

Uma outra forma em que são fabricados produtos a partir das fibras são as fitas (*tapes*), com orientação unidirecional ou bidirecional. No caso de fita unidirecional, as fibras do urdume são apenas amarradas na trama por fios de algodão ou poliéster ou possuem fibras nessa direção, no caso de fita bidirecional. A utilização de fitas é indicada para reforçar regiões que apresentam um maior grau de carregamento.

Finalmente, a forma que emprega tecnologia mais avançada na fabricação não propriamente do tecido em si, mas do tecido aliado à impregnação da matriz polimérica, é a dos tecidos pré-impregnados ou *prepregs*. Esse tipo de material garante frações volumétricas precisas, permitindo porosidade abaixo de 1% no compósito, e dispensa a umectação do tecido na fabricação, possibilitando não só maior produtividade, mas, sobretudo, qualidade ao produto. Pelo custo elevado, é utilizado principalmente pela indústria aeroespacial e na fabricação de automóveis de comercialização restrita e de competição, como os utilizados na Fórmula-1.

ANÁLISE DAS TENSÕES E DAS DEFORMAÇÕES EM LAMINADOS

O comportamento mecânico de estruturas fabricadas de compósitos poliméricos é regido pelas propriedades constituintes de cada uma das lâminas que formam o material, de maneira que a análise das tensões e deformações em cada uma delas é fundamental para garantir a integridade estrutural do elemento a ser fabricado.

7.1 – Teoria Clássica da Mecânica dos Laminados

Pelo modelo estabelecido pela Teoria Clássica da Mecânica dos Laminados^{56,62,63} são obtidas as deformações e as tensões de qualquer das camadas do laminado por meio das deformações e curvaturas da superfície média.

Para o desenvolvimento da teoria é admitido que haja perfeita ligação entre as lâminas e que não exista escorregamento de uma em relação à outra. É colocada também como hipótese que a matriz que permanece entre as lâminas seja fina e não deformável por cisalhamento.

7.1.1 – Relações tensão-deformação

Para se determinar as relações entre tensão e deformação, inicialmente são obtidas as deformações considerando-se a seção de um laminado delgado de comprimento dx , sujeito a um esforço combinado de força axial e de flexão. A figura 7.1 ilustra a deformação no plano x - z , resultante do alongamento axial e da flexão. Para melhor compreensão, a figura 7.1a mostra separadamente a deformação extensional, a deformação à flexão e o efeito combinado das duas deformações. A figura 7.1b combina o deslocamento axial e o deslocamento devido à flexão. O mesmo raciocínio pode ser aplicado para o plano y - z .

Considerando a hipótese de Kirchhoff para placas, que estabelece que uma linha reta normal à superfície média de um elemento sem deformação permanece nessa condição após a deformação, assumi-se essa mesma condição para a linha ABD do elemento mostrado na figura 7.1 após sofrer deformação (alongamento e flexão). Isso significa dizer que as deformações cisalhantes no plano perpendicular à superfície média serão consideradas como zero, isto é, $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$, e que a deformação ϵ_z será ignorada.

Assumi-se também que o ponto B na superfície média sofre os deslocamentos u^0 , v^0 e w^0 , respectivamente ao longo das direções x, y e z, enquanto o ponto C, arbitrário, que está a uma distância z do plano médio, terá, respectivamente, os deslocamentos u_c e v_c também nas direções x e y, e apresentando o mesmo deslocamento w^0 do ponto B na direção z. Isso reduz as deformações do laminado somente para ϵ_x , ϵ_y e γ_{xy} .

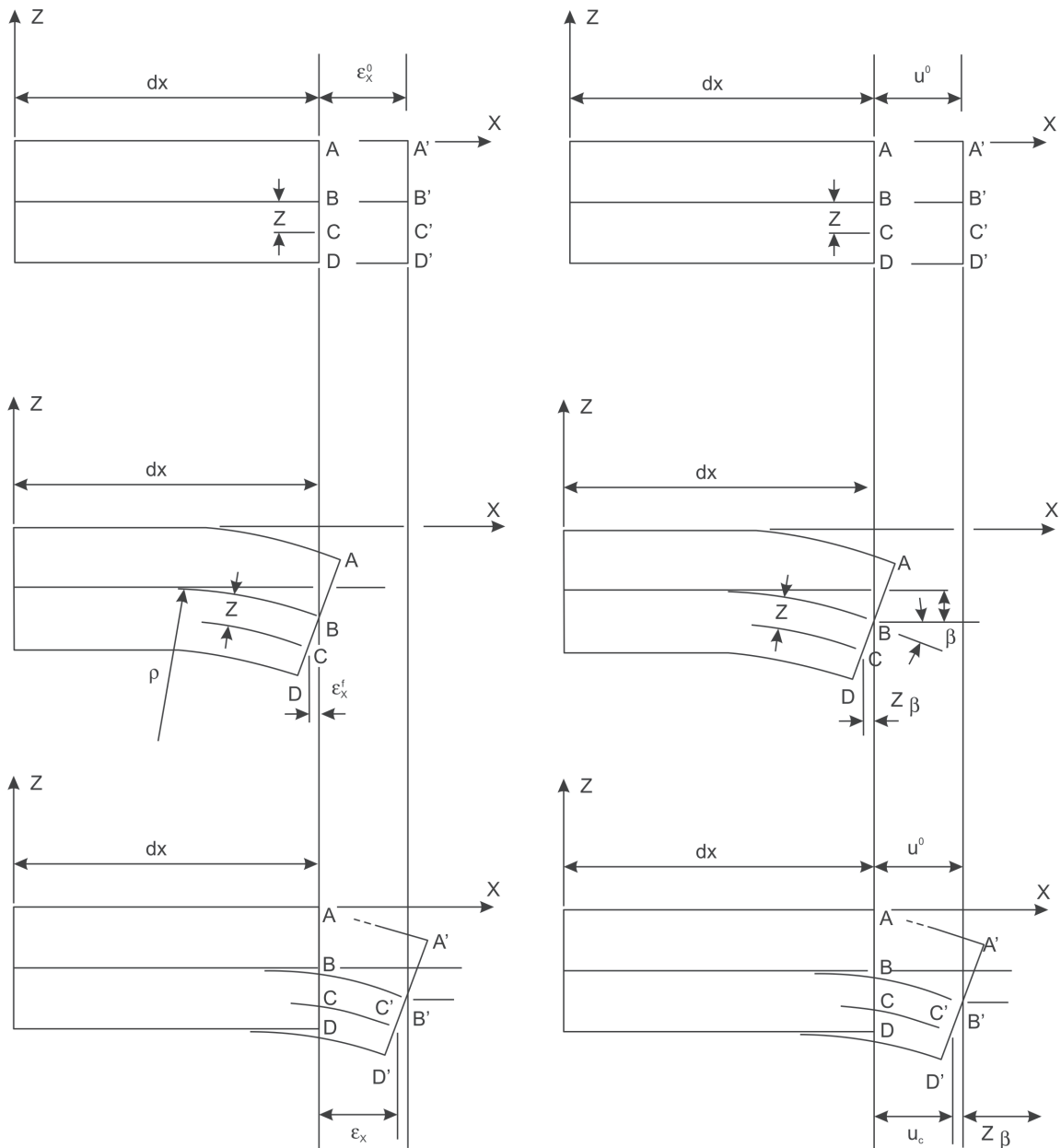


Figura 7.1- Modelo de deformação no plano x-z: a) deformações, b) deslocamentos

Analisando-se o comportamento de uma superfície localizada a uma distância z abaixo da superfície média do laminado, representada pelo ponto C, e considerando-se pequenas deformações, a deformação total ϵ_x poderá ser obtida de acordo com o modelo da figura 7.1a.

Nessa figura, a deformação extensional da linha média, indicada pelo ponto B, é dada por ϵ_x^0 , enquanto a deformação devida à flexão é ϵ_x^0 . Assim, a deformação total da superfície indicada pelo ponto C, considerando os dois eventos simultâneos, será $\epsilon_x = \epsilon_x^0 - \epsilon_x^f$ ou ainda $\epsilon_x = \epsilon_x^0 - \frac{1}{\rho}z$. Definido a curvatura (κ) como $\kappa = -\frac{1}{\rho}$, a deformação total pode ser colocada na forma da equação $\epsilon_x = \epsilon_x^0 + z\kappa_x$.

Uma outra forma de obter a deformação em x é considerar a geometria da figura 7.1b, que também mostra separadamente a deformação extensional, a deformação à flexão e o efeito combinado das duas deformações. Nesse modelo, o deslocamento u_c do ponto C no plano x - z é dado por:

$$u_c = u^0 - z\beta \quad (7.1)$$

sendo β a inclinação da normal ABD na direção x e dado pela equação (7.2). O sobrescrito “o” denota o deslocamento na posição da superfície média.

$$\beta = \frac{dw^0}{dx} \quad (7.2)$$

Assim, a equação (7.1) pode ser colocada como:

$$u_c = u^0 - z \frac{dw^0}{dx} \quad (7.3)$$

Admitindo-se pequenos alongamentos e derivando a equação 7.3 em relação à x para se obter a deformação ϵ_x , tem-se:

$$\epsilon_x = \frac{du_c}{dx} = \frac{du^0}{dx} - z \frac{d^2w^0}{dx^2} \quad (7.4)$$

que pode ser representada na forma:

$$\epsilon_x = \epsilon_x^0 + z\kappa_x \quad (7.5)$$

sendo (ϵ_x^0) e (κ_x) respectivamente a deformação e a curvatura da linha média do laminado e a curvatura definida como:

$$\kappa_x = \frac{d^2 w^0}{dx^2} \quad (7.6)$$

Portanto, a deformação (ϵ_x) de qualquer uma das camadas do compósito no plano x-z é função da deformação e curvatura da linha média do laminado e da distância (z) da camada considerada à linha média do laminado.

Aplicando-se raciocínio semelhante, obtém-se o deslocamento v na direção y no plano y-z e o deslocamento angular w no plano xy, respectivamente equações (7.7a) e (7.7b) e por meio dessas, as deformações ϵ_y e γ_{xy} , indicadas respectivamente pelas equações (7.8a) e (7.8b).

$$v_c = v^0 - z \frac{dw^0}{dy} \quad (7.7a)$$

$$w_c = w^0 - 2z \frac{dw^0}{dxy} \quad (7.7b)$$

$$\epsilon_y = \epsilon_y^0 + z \kappa_y \quad (7.8a)$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{xy}^0 + 2z \kappa_{xy} \quad (7.8b)$$

sendo ϵ_x^0 , ϵ_y^0 e γ_{xy}^0 e κ_x , κ_y e κ_{xy} respectivamente as deformações e as curvaturas da linha média do laminado.

Na forma matricial, as equações de deformação (7.5), (7.8a) e (7.8b) podem ser colocadas como:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (7.9)$$

ou numa notação compacta como:

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon^0\} + z\{\kappa\} \quad (7.10)$$

As tensões em qualquer lâmina, por exemplo, a k-ésima, podem ser obtidas a partir da equação (6.25), de onde se terá as equações (7.11a e 7.11b).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{xs} & Q_{ys} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}_k$$

$$\{\sigma\}_{xy}^k = [Q]_{xy}^k \left[\{\epsilon^0\} + z_k \{\kappa\} \right] \quad (7.11a)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{yx} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{xs} & Q_{ys} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z_k \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{yx} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{xs} & Q_{ys} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (7.11b)$$

7.1.2 - Equações constitutivas do laminado

As equações constitutivas podem ser obtidas relacionando-se as forças e os momentos resultantes por unidade de comprimento, com as deformações e curvaturas da linha média do laminado. Essas forças e momentos podem ser determinados pela integração das correspondentes tensões em relação à espessura (t) do laminado, pois as tensões variam de camada para camada ao longo da espessura, pois são funções das propriedades e orientação de cada camada. As orientações positivas das forças e momentos estão representadas na figura 7.2. Desse modo, tem-se respectivamente as forças e momentos, conforme as equações (7.12) e (7.13).

$$N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz \quad N_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y dz \quad N_{xy} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} dz \quad (7.12)$$

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz \quad M_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y z dz \quad M_{xy} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} z dz \quad (7.13)$$

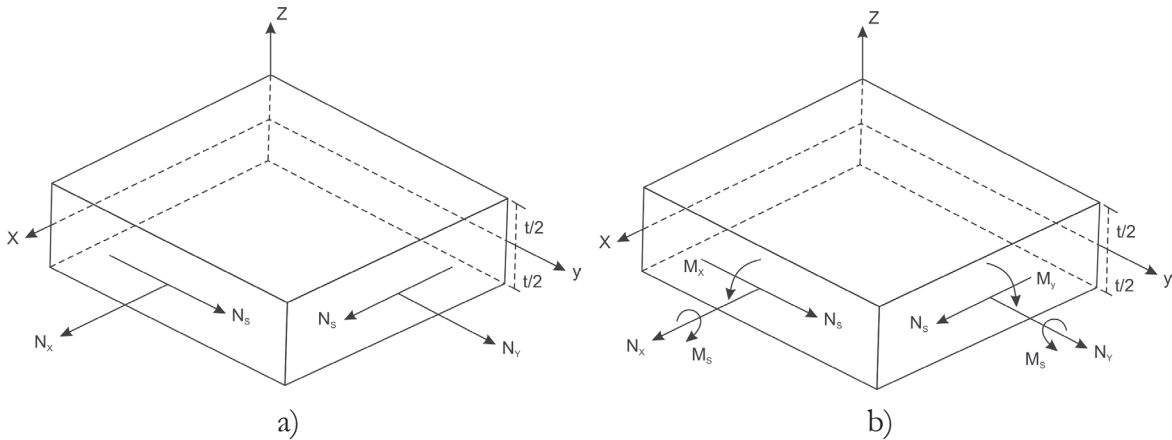


Figura 7.2 – Forças (a) e momentos (b) positivos em um laminado plano

Considerando um laminado consistindo de n lâminas (camadas) ortotrópicas, de acordo com a ilustração da figura 7.3, a contribuição de cada lâmina K para formar a força e o momento resultantes atuando no plano médio do laminado é dado por:

$$\{N\} = \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{t_{k-1}}^{t_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dz \quad (7.14)$$

$$\{M\} = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{t_{k-1}}^{t_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} z_k dz \quad (7.15)$$

onde as distâncias t_k e t_{k-1} estão indicadas na figura 7.3. Deve ser notado que as distâncias abaixo da linha média assumem sinal negativo considerando a orientação do eixo z dada na figura.

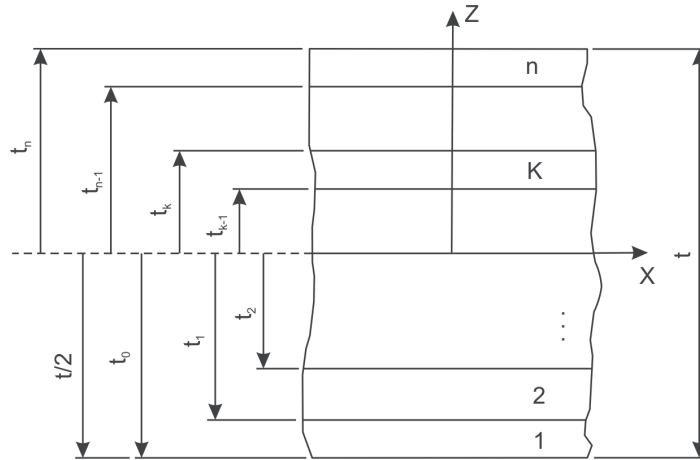


Figura 7.3 – Disposição das camadas de um laminado com n camadas

Pela equação (7.11a) tem-se que a tensão na camada K é $\{\sigma\}_{xy}^k = [Q]_{xy}^k \{\epsilon^0\} + [Q]_{xy}^k z_k \{\kappa\}$ e dessa maneira pode-se reescrever as equações (7.14) e (7.15) na forma de obter-se a força e momento resultante em termos das deformações e das curvaturas da linha média. Substituindo-se a equação (7.11) nas equações (7.14) e (7.15) tem-se:

$$\{N\} = \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left[\int_{t_{k-1}}^{t_k} [Q]_{xy}^k \{\epsilon^0\} dz + \int_{t_{k-1}}^{t_k} [Q]_{xy}^k \{\kappa\} z_k dz \right] \quad (7.16)$$

e

$$\{M\} = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left[\int_{t_{k-1}}^{t_k} [Q]_{xy}^k \{\epsilon^0\} z_k dz + \int_{t_{k-1}}^{t_k} [Q]_{xy}^k \{\kappa\} z_k^2 dz \right] \quad (7.17)$$

Nas equações acima, é possível observar que a matriz $[Q]_{xy}$ permanece constante em uma lâmina, pois $[Q]_{xy}$ é função apenas do ângulo θ , que é o ângulo formado entre as direções globais x - y e as direções principais 1-2, e da matriz $[Q]_{12}$, sendo essa última somente dependente das propriedades mecânicas dos elementos constituintes da lâmina. Também nota-se que as deformações (ϵ^0) e as curvaturas (κ) da linha média permanecem constantes para cada lâmina. Essas considerações tornam as equações (7.16) e (7.17) mais simples, de modo que se pode expressá-las como:

$$\{\mathbf{N}\} = \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \left[\sum_{k=1}^n [Q]_{xy}^k \int_{t_{k-1}}^{t_k} dz \right] \{\epsilon^0\} + \left[\sum_{k=1}^n [Q]_{xy}^k \int_{t_{k-1}}^{t_k} z_k dz \right] \{\kappa\} \quad (7.18)$$

$$\{\mathbf{M}\} = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \left[\sum_{k=1}^n [Q]_{xy}^k \int_{t_{k-1}}^{t_k} z_k dz \right] \{\epsilon^0\} + \left[\sum_{k=1}^n [Q]_{xy}^k \int_{t_{k-1}}^{t_k} z_k^2 dz \right] \{\kappa\} \quad (7.19)$$

Uma forma de facilitar a interpretação das equações (7.18) e (7.19) é introduzir o conceito de novas três matrizes, denominadas de $[A]$, $[B]$ e $[D]$, que formam as equações constitutivas do laminado. Assim:

$$\{\mathbf{N}\} = [\mathbf{A}] \cdot \{\epsilon^0\} + [\mathbf{B}] \cdot \{\kappa\} \quad (7.20)$$

$$\{\mathbf{M}\} = [\mathbf{B}] \cdot \{\epsilon^0\} + [\mathbf{D}] \cdot \{\kappa\} \quad (7.21)$$

sendo:

$$[\mathbf{A}] = \sum_{k=1}^n (Q)_{xy}^k (t_k - t_{k-1}) \quad (7.22)$$

$$[\mathbf{B}] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (Q)_{xy}^k (t_k^2 - t_{k-1}^2) \quad (7.23)$$

$$[\mathbf{D}] = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (Q)_{xy}^k (t_k^3 - t_{k-1}^3) \quad (7.24)$$

As equações (7.20) e (7.21) reunidas permitem uma melhor compreensão das equações constitutivas e podem ser apresentadas numa forma compacta como:

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix} \quad (7.25)$$

Representando a equação completa com os carregamentos normais (N_x , N_y) e de cisalhamento (N_{xy}) e os momentos fletores (M_x , M_y) e torsor (M_{xy}), a equação (7.25) pode ser colocada como:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xs} & B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{ys} & B_{yx} & B_{yy} & B_{ys} \\ A_{sx} & A_{sy} & A_{ss} & B_{sx} & B_{sy} & B_{ss} \\ \hline B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} & D_{xx} & D_{xy} & D_{xs} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{ys} & D_{yx} & D_{yy} & D_{ys} \\ B_{sx} & B_{sy} & B_{ss} & D_{sx} & D_{sy} & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (7.26)$$

Pelas equações anteriormente mostradas, pode-se notar que a matriz $[A]$ relaciona as forças resultantes por unidade de comprimento $[N]$ com as deformações $[\epsilon^0]$ e que a matriz $[D]$ relaciona os momentos resultantes por unidade de comprimento $[M]$ com as curvaturas $[k]$. As matrizes $[A]$ e $[D]$ são denominadas respectivamente de matriz de rigidez extensional e de matriz de rigidez de flexão.

A matriz $[B]$, chamada de matriz de acoplamento, apresenta função em ambas as equações e estabelece, respectivamente, ligação entre forças e momentos resultantes por unidade de comprimento com curvaturas $[k]$ e deformações $[\epsilon^0]$. A presença da matriz de acoplamento $[B]$ nas equações constitutivas implica que as forças normais N_x e N_y e força cisalhante N_{xy} agindo no plano médio de um laminado resultam não apenas em deformações extensionais ϵ^0 e cisalhantes γ_{xz} , mas ainda em flexão e torção produzindo as curvaturas k_x , k_y e k_{xy} , respectivamente. Do mesmo modo, a ação dos momentos fletores M_x e M_y e do torsor M_{xy} provocam deformações no plano médio, além das curvaturas.

Numa situação em que a matriz $[B]$ apresente valor nulo, fica claro pela presença da matriz $[A]$ que forças resultantes normais (N_x e N_y) e a força resultante cisalhante (N_{xy}) estarão associadas apenas às deformações normais e à deformação cisalhante. O mesmo raciocínio pode ser aplicado em relação à matriz $[D]$ em que os momentos fletores e o momento torsor estarão envolvidos apenas com flexão e torção.

Analisando a matriz de acoplamento $[B]$, é possível identificar que o caminho escolhido pelos projetistas para tornar essa matriz nula é estabelecer simetria geométrica em relação ao plano médio. Essa dedução fica clara ao se analisar a equação (7.23) e que pode ser melhor compreendida pela ilustração da figura 7.4.

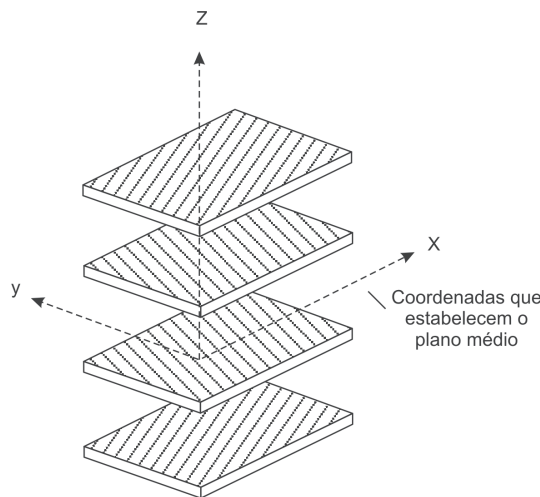


Figura 7.4 - Vista explodida de um laminado simétrico de 4 camadas

7.1.3 – Análise das tensões e das deformações na lâmina

No projeto de um componente de compósito, é fundamental examinar o comportamento de cada camada frente ao carregamento que atua no laminado e consequentemente as tensões e deformações que estarão presentes em cada uma dessas camadas.

Conhecidas as tensões e deformações, uma análise camada a camada deve ser feita de modo a prognosticar qual a carga ou a tensão que provocaria falha no material ou nas suas camadas, utilizando para isso critérios de resistência, como por exemplo, o da Tensão Máxima, o da Deformação Máxima, o de Azzi-Tsai-Hill ou o de Tsai-Wu.

As tensões em cada camada podem ser obtidas utilizando-se a equação (7.11), que são, no entanto, dependentes das deformações e das curvaturas da linha média do laminado. Assim, é certo que para determinação dessas tensões, as deformações e curvaturas devam ser primeiramente determinadas. Retomando as equações (7.20) e (7.21) tem-se respectivamente:

$$\{\mathbf{N}\} = [\mathbf{A}] \cdot \{\boldsymbol{\varepsilon}^0\} + [\mathbf{B}] \cdot \{\boldsymbol{\kappa}\}$$

$$\{\mathbf{M}\} = [\mathbf{B}] \cdot \{\boldsymbol{\varepsilon}^0\} + [\mathbf{D}] \cdot \{\boldsymbol{\kappa}\}$$

As deformações centrais podem ser obtidas de (7.20) como:

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}^0\} = [\mathbf{A}^{-1}] \{\mathbf{N}\} - [\mathbf{A}^{-1}] [\mathbf{B}] \{\boldsymbol{\kappa}\} \quad (7.27)$$

que substituída em (7.21) fornece:

$$\{\mathbf{M}\} = \{[\mathbf{B}][\mathbf{A}^{-1}]\} \{\mathbf{N}\} - \{[\mathbf{B}][\mathbf{A}^{-1}][\mathbf{B}] - [\mathbf{D}]\} \{\boldsymbol{\kappa}\} \quad (7.28)$$

As equações (7.27) e (7.28) podem ser combinadas para formar o que se denomina de equações constitutivas parcialmente invertidas. Então, tem-se:

$$\begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}^0 \\ \mathbf{M} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^* & \mathbf{B}^* \\ \mathbf{C}^* & \mathbf{D}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{N} \\ \boldsymbol{\kappa} \end{Bmatrix} \quad (7.29)$$

sendo $\mathbf{A}^*$, $\mathbf{B}^*$, $\mathbf{C}^*$ e $\mathbf{D}^*$ dadas por:

$$\begin{aligned} [\mathbf{A}^*] &= [\mathbf{A}^{-1}] \\ [\mathbf{B}^*] &= -[\mathbf{A}^{-1}] \cdot [\mathbf{B}] \\ [\mathbf{C}^*] &= [\mathbf{B}] \cdot [\mathbf{A}^{-1}] = -[\mathbf{B}^*]^T \\ [\mathbf{D}^*] &= [\mathbf{D}] - [\mathbf{B}] \cdot [\mathbf{A}^{-1}] \cdot [\mathbf{B}] = [\mathbf{D}] + [\mathbf{B}] \cdot [\mathbf{B}^*] \end{aligned}$$

Agora as equações (7.27) e (7.28) podem ser reescritas na seguinte forma:

$$\{\epsilon^0\} = [A^*] \cdot \{N\} + [B^*] \cdot \{\kappa\} \quad (7.30)$$

$$\{M\} = [C^*] \cdot \{N\} + [D^*] \cdot \{\kappa\} \quad (7.31)$$

Resolvendo a equação (7.31) para κ tem-se:

$$\{\kappa\} = [D^{*-1}] \cdot \{M\} - [D^{*-1}] \cdot [C^*] \cdot \{N\} \quad (7.32)$$

que substituída na equação (7.30) fornece:

$$\{\epsilon^0\} = [[A^*] - [B^*] \cdot [D^{*-1}] \cdot [C^*]] \cdot \{N\} + [[B^*] \cdot [D^{*-1}]] \cdot \{M\} \quad (7.33)$$

Combinando as equações (7.32) e (7.33) obtém-se as equações constitutivas completamente invertidas, que são expressas como:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} & \mathbf{b} \\ \mathbf{c} & \mathbf{d} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \quad (7.34a)$$

ou

$$\begin{aligned} \{\epsilon^0\} &= [\mathbf{a}] \{N\} + [\mathbf{b}] \{M\} \\ \{\kappa\} &= [\mathbf{c}] \{N\} + [\mathbf{d}] \{M\} \end{aligned} \quad (7.34b)$$

sendo as matrizes $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$, $\mathbf{d}$ dadas como:

$$\begin{aligned} [\mathbf{a}] &= [A^*] - [B^*] \cdot [D^{*-1}] \cdot [C^*] = [A^*] + [B^*] \cdot [D^{*-1}] \cdot [B^*]^T \\ [\mathbf{b}] &= [B^*] \cdot [D^{*-1}] \\ [\mathbf{c}] &= -[D^{*-1}] \cdot [C^*] = -[D^{*-1}] \cdot [[B^*]^T] = [\mathbf{b}]^T \\ [\mathbf{d}] &= [D^{*-1}] \end{aligned}$$

Representando a equação completa com as deformações e curvaturas, a equação (7.34a) pode ser colocada na forma:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} & a_{xs} & b_{xx} & b_{xy} & b_{xs} \\ a_{yx} & a_{yy} & a_{ys} & b_{yx} & b_{yy} & b_{ys} \\ a_{sx} & a_{sy} & a_{ss} & b_{sx} & b_{sy} & b_{ss} \\ \hline c_{xx} & c_{xy} & c_{xs} & d_{xx} & d_{xy} & d_{xs} \\ c_{yx} & c_{yy} & c_{ys} & d_{yx} & d_{yy} & d_{ys} \\ c_{sx} & c_{sy} & c_{ss} & d_{sx} & d_{sy} & d_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} \quad (7.35)$$

A matriz $[abcd]$ é simétrica como é também a matriz $[ABD]$ da equação (7.26). Isso é consequência do fato de que a inversa de uma matriz simétrica é uma matriz simétrica. Assim, as deformações de cada camada nos eixos globais, equação (7.9), podem ser calculadas como função das cargas aplicadas no laminado por meio da equação (7.35). A partir dessas deformações, as tensões nos eixos globais podem ser determinadas pela equação (7.11).

As tensões e as deformações nos eixos locais podem ser então obtidas pela equação (6.23) e equação (6.24), respectivamente, permitindo proceder-se a uma análise criteriosa de falha utilizando convenientemente um critério de falha. No item 7.4 será abordado esse assunto.

Comentário semelhante feito no item 7.2 pode novamente ser apresentado em relação às equações constitutivas completamente invertidas. Observa-se na equação (7.35) que as deformações extensionais $\{\varepsilon\}$ resultam não apenas das forças $\{N\}$ que agem no laminado, mas também devido à presença dos momentos $\{M\}$. Isso se dá por meio dos termos b_{ij} da matriz $[b]$, que acoplam carregamento no plano com flexão e torção. O mesmo ocorre com a matriz $[c]$, em que as curvaturas do laminado surgem não apenas devida aos momentos, mas também devido às forças.

Esse efeito indesejável pode ser evitado construindo-se laminados simétricos, que tornam a matriz $[b]$ e a matriz $[c]$ igual a zero, recordando que $[c]=[b]^T$. Portanto, para laminados simétricos, as matrizes de acoplamento $[b]$ e $[c]$ são nulas. Entende-se por laminados simétricos aqueles que para cada camada posicionada acima da linha média existe uma camada correspondente abaixo da linha média, semelhante a um rebatimento de espelho, considerando que as camadas tenham a mesma espessura e propriedades. A consequência causada pela existência da matriz $[b]$ é o surgimento de deformações fora do plano.

Os métodos analíticos desenvolvidos neste capítulo para o cálculo de tensões e deformações em um laminado no estado plano de tensões, assumem o comportamento no campo linear elástico com pequenas deformações. No caso do comportamento não linear, como acontece frequentemente com os estudos de fluência, as tensões e as deformações são obtidas fazendo uso de outros modelos.

É importante ressaltar nesse ponto, que o desenvolvimento apresentado para se obter as equações (7.26) e (7.35) considera que não existe variação do conteúdo de umidade, bem como variação de temperatura entre aquela da cura da matriz e a de utilização do compósito (temperatura de trabalho), ou seja, $\Delta m=0$ e $\Delta T=0$ respectivamente. Quando as condições de uso do compósito são diferentes dessas, deve-se levar em conta na análise suas respectivas influências, comumente denominadas de tensões higrotérmicas, que estão associadas aos coeficientes de expansão higroscópica e expansão térmica.

7.1.4 – Propriedades elásticas equivalentes de laminados simétricos em função da matriz extensional invertida [a]

As propriedades elásticas equivalentes de laminados simétricos podem ser obtidas por meio das tensões médias ($\bar{\sigma}$) utilizando a equação $\{\epsilon^0\} = [a^*][\bar{\sigma}]$, sendo $[a^*]$ a matriz de flexibilidade do laminado (*laminata compliance*). As tensões médias que atuam no laminado, que correspondem às tensões que atuariam em um material homogêneo equivalente, são definidas pela equação $[\bar{\sigma}] = \frac{1}{t}\{N\}$, sendo t a espessura do laminado. Assim:

$$\begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_x \\ \bar{\sigma}_y \\ \bar{\tau}_s \end{Bmatrix} = \frac{1}{t} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{Bmatrix} \quad (7.36)$$

e

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xx}^* & a_{xy}^* & a_{xs}^* \\ a_{yx}^* & a_{yy}^* & a_{ys}^* \\ a_{sx}^* & a_{sy}^* & a_{ss}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_x \\ \bar{\sigma}_y \\ \bar{\tau}_s \end{Bmatrix} = \frac{1}{t} \begin{bmatrix} a_{xx}^* & a_{xy}^* & a_{xs}^* \\ a_{yx}^* & a_{yy}^* & a_{ys}^* \\ a_{sx}^* & a_{sy}^* & a_{ss}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{Bmatrix} \quad (7.37)$$

Uma vez que um laminado simétrico numa escala macroscópica possa ser interpretado como um laminado ortotrópico, é possível, considerando o mesmo raciocínio aplicado no item (6.5) a partir da equação (6.52), obter-se a matriz $[a]$. Deve-se apenas mencionar que as propriedades mecânicas do laminado são dadas agora pelos seus valores médios ou equivalentes, indicadas por uma barra sobre a notação, portanto, $\bar{E}$, $\bar{\nu}$, $\bar{G}$ e $\bar{\eta}$.

Considerando a equação (7.37), tem-se que $\{\epsilon^0\} = \frac{1}{t}[a^*]\{N\}$, sendo $[a] = \frac{1}{t}[a^*]$. Desse modo, a matriz extensional invertida $[a]$ em função das propriedades elásticas equivalentes do laminado é dada por:

$$[a] = \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} & a_{xs} \\ a_{yx} & a_{yy} & a_{ys} \\ a_{sx} & a_{sy} & a_{ss} \end{bmatrix} = \frac{1}{t} \begin{bmatrix} \frac{1}{\bar{E}_x} & -\frac{\bar{\nu}_{yx}}{\bar{E}_y} & \frac{\bar{\eta}_{sx}}{\bar{G}_{xy}} \\ -\frac{\bar{\nu}_{xy}}{\bar{E}_x} & \frac{1}{\bar{E}_y} & \frac{\bar{\eta}_{sy}}{\bar{G}_{xy}} \\ \frac{\bar{\eta}_{xs}}{\bar{E}_x} & \frac{\bar{\eta}_{ys}}{\bar{E}_y} & \frac{1}{\bar{G}_{xy}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{t.\bar{E}_x} & -\frac{\bar{\nu}_{yx}}{t.\bar{E}_y} & \frac{\bar{\eta}_{sx}}{t.\bar{G}_{xy}} \\ -\frac{\bar{\nu}_{xy}}{t.\bar{E}_x} & \frac{1}{t.\bar{E}_y} & \frac{\bar{\eta}_{sy}}{t.\bar{G}_{xy}} \\ \frac{\bar{\eta}_{xs}}{t.\bar{E}_x} & \frac{\bar{\eta}_{ys}}{t.\bar{E}_y} & \frac{1}{t.\bar{G}_{xy}} \end{bmatrix} \quad (7.38)$$

Como se nota, conhecidos os valores dos elementos da matriz $[a]$, as propriedades elásticas equivalentes podem ser determinadas. Logo:

$$\begin{aligned}\bar{E}_x &= \frac{1}{t a_{xx}} & \bar{E}_y &= \frac{1}{t a_{yy}} & \bar{G}_{xy} &= \frac{1}{t a_{ss}} \\ \bar{v}_{xy} &= \frac{a_{yx}}{a_{xx}} & \bar{v}_{yx} &= \frac{a_{xy}}{a_{yy}} \\ \bar{\eta}_{xs} &= \frac{a_{sx}}{a_{xx}} & \bar{\eta}_{ys} &= \frac{a_{sy}}{a_{yy}} & \bar{\eta}_{sx} &= \frac{a_{xs}}{a_{ss}} & \bar{\eta}_{sy} &= \frac{a_{ys}}{a_{ss}}\end{aligned}$$

Da simetria da matriz da equação (7.38), resultam as seguintes igualdades:

$$\frac{\bar{v}_{xy}}{\bar{E}_x} = \frac{\bar{v}_{yx}}{\bar{E}_y} \quad (7.39)$$

$$\frac{\bar{\eta}_{xs}}{\bar{E}_x} = \frac{\bar{\eta}_{sx}}{\bar{G}_{xy}} \quad (7.40)$$

$$\frac{\bar{\eta}_{ys}}{\bar{E}_y} = \frac{\bar{\eta}_{sy}}{\bar{G}_{xy}} \quad (7.41)$$

7.1.5 – Propriedades elásticas equivalentes de laminados simétricos balanceados em função da matriz extensional [A]

As propriedades elásticas equivalentes de laminados simétricos balanceados podem ser obtidas por meio da matriz de rigidez extensional [A] da equação (7.26), considerando-se carregamentos unidirecionais aplicados individualmente no laminado por meio das tensões médias, ou seja:

$$\bar{\sigma}_x \neq 0, \bar{\sigma}_y = 0, \bar{\tau}_s = 0; \bar{\sigma}_x = 0, \bar{\sigma}_y \neq 0, \bar{\tau}_s = 0 \text{ e } \bar{\sigma}_x = 0, \bar{\sigma}_y = 0, \bar{\tau}_s \neq 0$$

Assim:

$$\begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_x \\ \bar{\sigma}_y \\ \bar{\tau}_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{t} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{Bmatrix} = \frac{1}{t} \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & 0 \\ A_{xy} & A_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & A_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \end{Bmatrix} \quad (7.42)$$

Na matriz [A] da equação (7.42), os termos A_{xs} e A_{ys} são nulos devido à condição da análise considerar laminados balanceados, que são definidos como aqueles que para cada camada posicionada a um ângulo $(+\theta)$, existe uma camada a um ângulo $(-\theta)$, independente de suas posições em relação à linha média, considerando camadas de mesma propriedade e espessura. Nessa condição, $Q_{xs}(\theta) = -Q_{xs}(-\theta)$ e $Q_{ys}(\theta) = -Q_{ys}(-\theta)$, o que implica em $A_{xs} = A_{ys} = 0$.

Para a condição $\bar{\sigma}_x \neq 0, \bar{\sigma}_y = 0, \bar{\tau}_s = 0$ tem-se:

$$\begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_x \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \frac{1}{t} \begin{Bmatrix} N_x \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \frac{1}{t} \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & 0 \\ A_{xy} & A_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & A_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \end{Bmatrix} \quad (7.43)$$

$$\bar{\sigma}_x = \frac{1}{t} N_x = \frac{1}{t} (A_{xx} \cdot \epsilon_x^0 + A_{xy} \cdot \epsilon_y^0) \quad (7.44)$$

e

$$0 = \frac{1}{t} (A_{xy} \cdot \epsilon_x^0 + A_{yy} \cdot \epsilon_y^0) \quad (7.45)$$

Isolando ϵ_y^0 da equação (7.45) e substituindo-se na equação (7.44) tem-se que:

$$\bar{\sigma}_x = \frac{1}{t} \left(A_{xx} - \frac{A_{xy}^2}{A_{yy}} \right) \epsilon_x^0 \quad (7.46)$$

Portanto, o módulo de elasticidade equivalente é dado por:

$$\bar{E}_x = \frac{\bar{\sigma}_x}{\epsilon_x^0} = \frac{1}{t} \left(A_{xx} - \frac{A_{xy}^2}{A_{yy}} \right) \quad (7.47)$$

sendo t a espessura do laminado.

O coeficiente de Poisson equivalente $\bar{\nu}_{xy}$ é obtido manipulando-se a equação (7.45), sendo dado por:

$$\bar{\nu}_{xy} = -\frac{\epsilon_y^0}{\epsilon_x^0} \Rightarrow \bar{\nu}_{xy} = \frac{A_{xy}}{A_{yy}} \quad (7.48)$$

As demais propriedades são obtidas aplicando-se o mesmo raciocínio para os carregamentos N_y e N_s . Desse modo, as constantes de engenharia equivalentes de um laminado genérico simétrico e balanceado são dadas por:

$$\bar{E}_x = \frac{1}{t} \left(A_{xx} - \frac{A_{xy}^2}{A_{yy}} \right) \quad (7.47\text{-bis})$$

$$\bar{E}_y = \frac{1}{t} \left(A_{yy} - \frac{A_{xy}^2}{A_{xx}} \right) \quad (7.49)$$

$$\bar{\nu}_{xy} = \frac{A_{xy}}{A_{yy}} \quad (7.48\text{-bis})$$

$$\bar{\nu}_{yx} = \frac{A_{xy}}{A_{xx}} \quad (7.50)$$

$$\bar{G}_{xy} = \frac{A_{ss}}{t} \quad (7.51)$$

$$\bar{\eta}_{xs} = \bar{\eta}_{ys} = 0 \quad (7.52)$$

$$\bar{\eta}_{sx} = \bar{\eta}_{sy} = 0 \quad (7.53)$$

7.1.6 – Propriedades elásticas equivalentes de laminados *cross-ply* e *angle-ply*

Da teoria geral dos laminados apresentada nesse capítulo, há alguns laminados particularmente interessantes de serem analisados considerando sua extensa aplicação na fabricação de embarcações, painéis, tubulações, cilindros e vasos de pressão. São os laminados simétricos que utilizam fibras cruzadas a $0^\circ/90^\circ$, denominados de *cross-ply*, e aqueles que as fibras são posicionadas em ângulos de $+ \theta / - \theta$, denominados de *angle-ply*. Exemplos: $[0/90/90/0]$, $[90/0]_s$ e $[+ \theta / - \theta / - \theta / + \theta]$.

Considerando um laminado simétrico *cross-ply*, conforme representado pela figura 7.5, e utilizando as equações (6.41) para os ângulos 0° e 90° , tem-se que a matriz $[A]$ pode ser escrita de maneira genérica da forma mostrada na equação (7.54), recordando que em laminados simétricos a matriz de acoplamento $[B]$ é igual a zero.

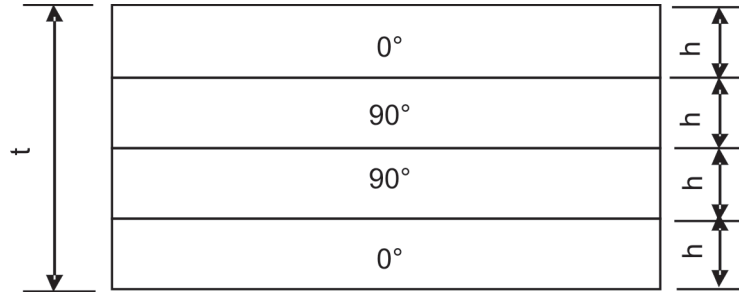


Figura 7.5- Representação de um laminado *cross-ply* simétrico com quatro camadas

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & 0 \\ A_{xy} & A_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & A_{ss} \end{bmatrix} = 2h \begin{bmatrix} (Q_{11} + Q_{22}) & 2(Q_{12}) & 0 \\ 2(Q_{12}) & (Q_{11} + Q_{22}) & 0 \\ 0 & 0 & 2(Q_{66}) \end{bmatrix} \quad (7.54)$$

As propriedades elásticas equivalentes para o exemplo da figura 7.5 são obtidas retomando a equação (7.54) e aplicando-se as equações (7.47) a (7.51), lembrando que para o exemplo da figura 7.5, $t=4h$.

$$\bar{E}_x = \bar{E}_y = \frac{1}{2} \left[(Q_{11} + Q_{22}) - \frac{4Q_{12}^2}{(Q_{11} + Q_{22})} \right]$$

$$\bar{\nu}_{xy} = \bar{\nu}_{yx} = \frac{2Q_{12}}{(Q_{11} + Q_{22})}$$

$$\bar{G}_{xy} = Q_{66}$$

Para o laminado *angle-ply* simétrico e balanceado da figura 7.6, a matriz $[A]$ pode ser apresentada em função do ângulo da fibra na camada, utilizando as equações (6.41). Desse modo:

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & 0 \\ A_{xy} & A_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & A_{ss} \end{bmatrix} = 2h \begin{bmatrix} Q_{xx}(\theta) + Q_{xx}(-\theta) & Q_{xy}(\theta) + Q_{xy}(-\theta) & 0 \\ Q_{xy}(\theta) + Q_{xy}(-\theta) & Q_{yy}(\theta) + Q_{yy}(-\theta) & 0 \\ 0 & 0 & Q_{ss}(\theta) + Q_{ss}(-\theta) \end{bmatrix} \quad (7.55)$$

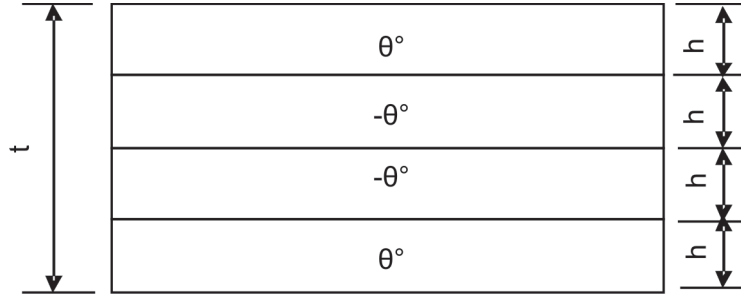


Figura 7.6- Representação de um laminado *angle-ply* simétrico e balanceado com quatro camadas

As propriedades elásticas equivalentes para o exemplo da figura 7.6 são obtidas retomando a equação (7.55) e aplicando-se as equações (7.47) a (7.51), lembrando que para o exemplo da figura 7.6, $t=4h$.

$$\bar{E}_x = \frac{1}{2} \left[\frac{[(Q_{xx}(\theta) + Q_{xx}(-\theta))] - \frac{[Q_{xy}(\theta) + Q_{xy}(-\theta)]^2}{(Q_{yy}(\theta) + Q_{yy}(-\theta))}}{1} \right]$$

$$\bar{E}_y = \frac{1}{2} \left[\frac{[(Q_{yy}(\theta) + Q_{yy}(-\theta))] - \frac{[Q_{xy}(\theta) + Q_{xy}(-\theta)]^2}{(Q_{xx}(\theta) + Q_{xx}(-\theta))}}{1} \right]$$

$$\bar{\nu}_{xy} = \frac{(Q_{xy}(\theta) + Q_{xy}(-\theta))}{(Q_{yy}(\theta) + Q_{yy}(-\theta))}$$

$$\bar{\nu}_{yx} = \frac{(Q_{xy}(\theta) + Q_{xy}(-\theta))}{(Q_{xx}(\theta) + Q_{xx}(-\theta))}$$

$$\bar{G}_{xy} = \frac{1}{2} [Q_{ss}(\theta) + Q_{ss}(-\theta)]$$

Considerando materiais isotrópicos, a análise de tensões é feita levando-se em conta a tensão mais elevada que atua no material e que poderia comprometer a estrutura pela falha de um componente. Nos compósitos poliméricos essa conduta não é necessariamente válida. Não raro, há situações em que uma tensão equivalente no laminado, que poderia ser considerada baixa, traga como consequência a fratura de uma das camadas. Uma análise criteriosa deve ser feita camada a camada levando em consideração as tensões que atuam separadamente em cada uma das camadas do laminado.

Admitindo-se que pelo critério de falha selecionado uma ou algumas das camadas tiverem uma indicação de falha, que pode ser na direção longitudinal, na direção transversal ou cisalha-

mento, isso exigirá uma ação de modo a ser garantida a integridade estrutural do componente que está sendo projetado. Alteração do ângulo de laminação ou bobinagem, mudança do tipo de fibra utilizada, aumento da espessura (embora associada ao aumento da massa) ou até mesmo redução da carga, poderão ser alternativas para solucionar a questão de uma falha detectada ainda na fase de projeto. Portanto, é fundamental a análise das tensões e das deformações camada a camada, pois esse procedimento poderá garantir a construção de estruturas seguras, evitando que nenhum dano venha a ocorrer de forma imprevista e prematura e assim comprometer o seu bom funcionamento.

O diagrama da figura 7.7⁶² resume o desenvolvimento matemático das análises da lâmina e do laminado e permite uma visão da rota para análise das tensões e deformações em um compósito tipo casca ou placa, bem como a determinação das propriedades do material a partir do conhecimento das propriedades das lâminas (E_1 , E_2 , G_{12} e ν_{12}). Nota-se, assim, que uma importante etapa da análise está relacionada à determinação das tensões e deformações nas direções principais da lâmina. Essas são obtidas de corpos-de-prova unidirecionais por meio de ensaios mecânicos na direção da fibra, transversal a ela e cisalhamento no plano.

Os coeficientes de influência mútua têm o mesmo significado daqueles definidos nos capítulo 6 por meio das equações (6.37) e (6.38), a não ser o fato que agora se referem ao laminado. Portanto, o coeficiente de influência mútua do primeiro tipo do laminado é definido como a relação entre a deformação normal induzida e a deformação cisalhante, o que significa que o laminado está sujeito a um estado uniaxial de tensão cisalhante equivalente τ_{ij} no plano ij do laminado. O coeficiente de influência mútua do segundo tipo é definido como a relação entre a deformação cisalhante induzida e a deformação normal quando o laminado está sujeito a um estado uniaxial de tensão normal equivalente σ_i na direção i do laminado.

Um resumo da Teoria Clássica dos Laminados é colocado no apêndice B para colaborar na compreensão do conteúdo desse capítulo.

7.2 – Critérios de resistência

Todo o desenvolvimento apresentado para a determinação das tensões e deformações, necessita, contudo, de uma definição se a estrutura estará capacitada a resistir ao carregamento imposto e conseqüentemente se as tensões oriundas desse carregamento não estarão além do limite de resistência do laminado ou de cada uma das lâminas individualmente, o que poderia provocar uma ruptura do elemento fabricado com o compósito.

Um critério de resistência pode ser apoiado por modelos matemáticos que estabelecem condições para prever a ruptura de um material sob qualquer tipo de combinação de tensões. Esses modelos seriam dispensáveis em uma situação em que fossem realizados ensaios em todas as componentes do espaço de tensões. É fato, entretanto, que os ensaios demandariam tempo e custo e por isso a formulação de um modelo traz benefícios como o de poder antecipar condições de falha com um número reduzido de ensaios.

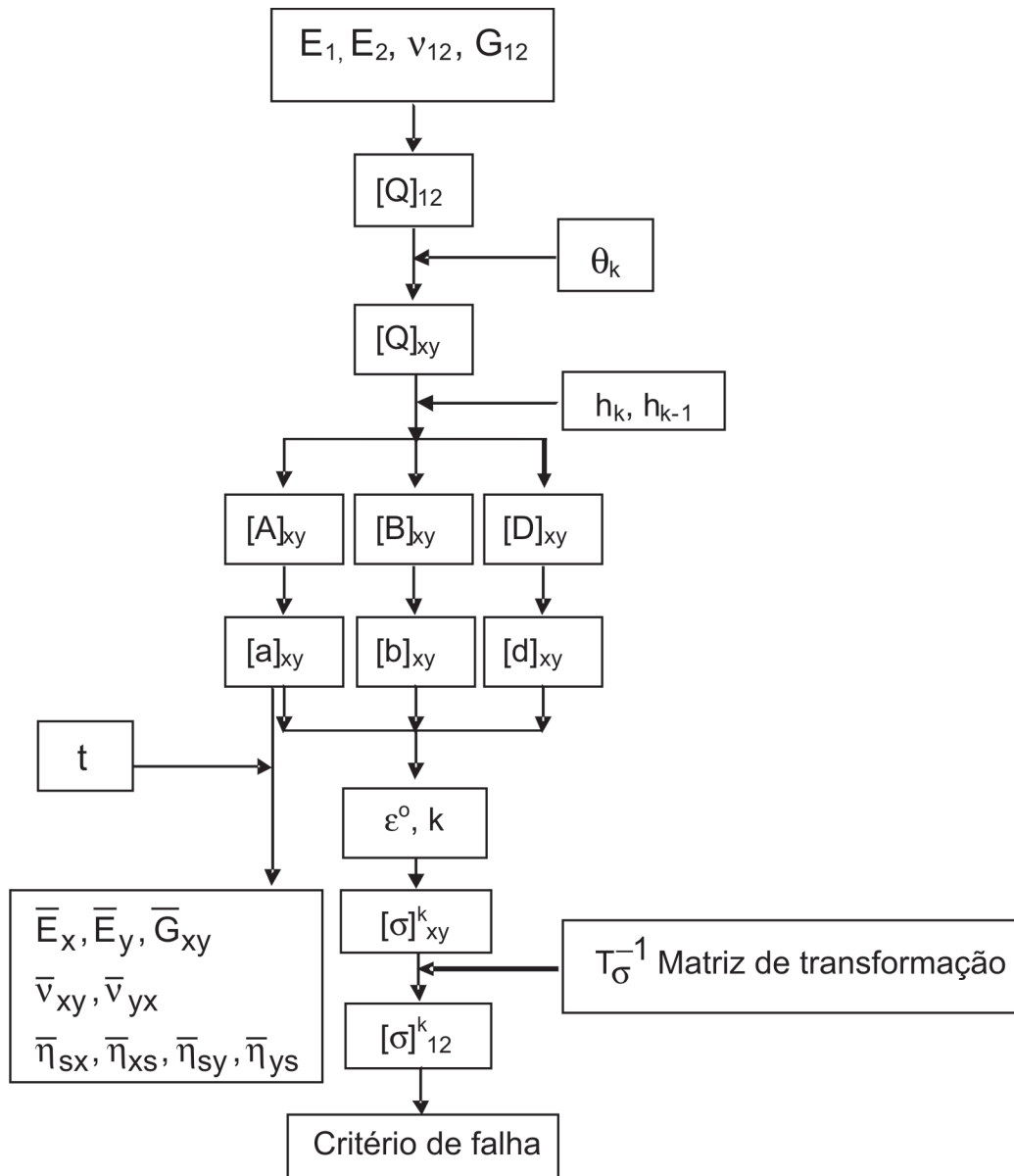


Figura 7.7- Diagrama para análise de tensões e deformações e determinação das propriedades equivalentes de um laminado no sistema global⁶²

Um critério de resistência tem como finalidade estabelecer modelos matemáticos, pelos quais pode-se, por meio das propriedades do material obtidas de ensaios de tração, compressão e cisalhamento, prever a condição de ruptura sob qualquer tipo de combinação de tensões⁶⁴. Portanto, para definição de um modelo matemático é necessária a identificação das tensões aplicadas no material que induzem a ruptura e a identificação da resposta do material a essas tensões.

Desse modo, os critérios de resistência permitem a avaliação de uma possível ocorrência de falha no laminado e assim antecipar correções para sua eliminação. São estabelecidos tendo como base as resistências da lâmina sujeitas aos carregamentos fundamentais de tração e compressão nas direções longitudinal e transversal e cisalhamento no plano, conforme representação na figura 7.8.

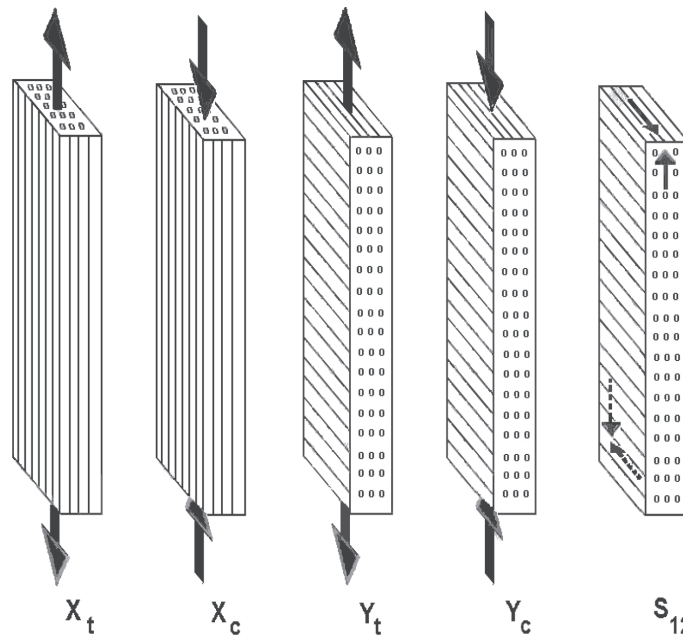


Figura 7.8- Representação das resistências de uma lâmina unidirecional sujeita aos carregamentos fundamentais: tração, compressão e cisalhamento no plano

Os critérios de resistência mais utilizados para análise de materiais compósitos poliméricos são o da Tensão Máxima, o da Deformação Máxima, o do Máximo Trabalho (Azzi-Tsai-Hill) e da Interação Quadrática (Tsai-Wu), sendo os dois primeiros de fácil e imediata aplicação e interpretação. Há ainda os critérios da primeira camada a falhar (*first ply failure*) e última camada a falhar (*last ply failure*). Neste livro serão abordados os quatro primeiros.

7.2.1 – Critério da Tensão Máxima

Esse critério estabelece que uma falha na lâmina não ocorrerá quando alguma das tensões principais for menor que a resistência à tração (X_t ou Y_t), que a resistência à compressão (X_c ou Y_c) ou ainda quando a tensão cisalhamento for menor que a resistência ao cisalhamento no plano (S_{12}), considerando o valor dessas duas últimas em módulo. Essas relações podem ser traduzidas na forma de inequações, levando em conta que as fibras estão alinhadas com os eixos de referência da estrutura (eixos globais X-Y), isto é, as tensões nas direções principais estão nas mesmas direções dos eixos globais, conforme ilustração da figura 7.9a.

Desse modo, para que não ocorram falhas, as desigualdades das inequações (7.56) deverão ser satisfeitas. Os subscritos “c” e “t” representam respectivamente compressão e tração.

$$\begin{aligned}
 -X_c < \sigma_1 < X_t \\
 -Y_c < \sigma_2 < Y_t \\
 |\tau_{12}| < |S_{12}|
 \end{aligned}
 \tag{7.56}$$

onde

σ_1 representa a tensão normal aplicada na direção principal 1 (direção da fibra)

σ_2 representa a tensão normal aplicada na direção principal 2 (direção transversal à fibra)

τ_{12} representa a tensão de cisalhamento no plano da lâmina

X_t representa a resistência à tração longitudinal

X_c representa a resistência à compressão longitudinal

Y_t representa a resistência à tração transversal

Y_c representa a resistência à compressão transversal

S_{12} representa a resistência ao cisalhamento no plano da lâmina

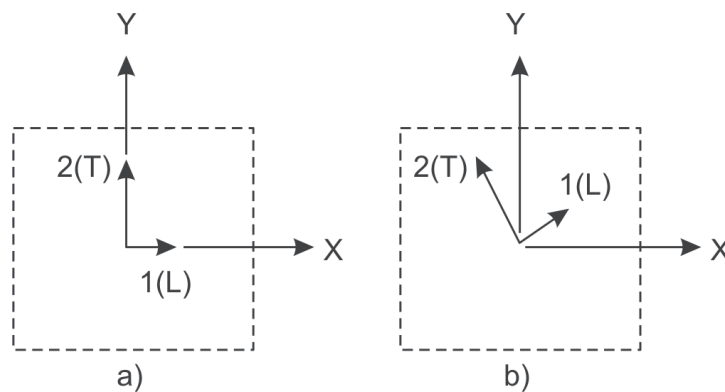


Figura 7.9- Ilustração do posicionamento da fibra: a) alinhamento em relação aos eixos globais, b) deslocamento da fibra em relação aos eixos globais

Para situações em que as direções principais (eixos locais) não estão alinhadas com os eixos do sistema global, conforme ilustração da figura 7.9b, e as tensões são obtidas nesse sistema, para aplicar as equações (7.56) é necessário proceder a mudanças de coordenadas das tensões para as direções principais de lâmina. Considerando como exemplo uma lâmina em que um carregamento uniaxial na direção X produza a tensão normal σ_x e utilizando a equação (6.27) tem-se que:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_x \cdot \cos^2 \theta \\ \sigma_2 &= \sigma_x \cdot \sin^2 \theta \\ |\tau_{12}| &= \sigma_x \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta\end{aligned}\tag{7.57}$$

Logo, o Critério da Tensão Máxima para as condições do carregamento fora das direções principais da lâmina pode ser modificado substituindo as equações (7.57) em (7.56), obtendo-se as inequações dadas em (7.58), válida quando θ for diferente de 0° e 90° . Interpreta-se que não haverá falha quando σ_x estiver entre os extremos das inequações (7.58) para os valores de tração e compressão e menor que o valor de cisalhamento.

$$\begin{aligned}
\frac{-X_c}{\cos^2 \theta} < \sigma_x < \frac{X_t}{\cos^2 \theta} \\
\frac{-Y_c}{\sin^2 \theta} < \sigma_x < \frac{Y_t}{\sin^2 \theta} \\
\sigma_x < \frac{|S_{12}|}{\sin \theta \cdot \cos \theta}
\end{aligned} \tag{7.58}$$

7.2.2 – Critério da Deformação Máxima

Por analogia com o critério da Tensão Máxima, para que não ocorram falhas as desigualdades das inequações (7.59) deverão ser satisfeitas, supondo a condição da figura 7.9a.

$$\begin{aligned}
-\varepsilon_{lc}^u < \varepsilon_1 < \varepsilon_{lt}^u \\
-\varepsilon_{2c}^u < \varepsilon_2 < \varepsilon_{2t}^u \\
|\gamma_{12}| < |\gamma_{12}^u|
\end{aligned} \tag{7.59}$$

ε_1 representa a deformação normal na direção principal 1 (direção da fibra)

ε_2 representa a deformação normal na direção principal 2 (direção transversal à fibra)

γ_{12} representa a deformação angular no plano da lâmina

ε_{lt}^u representa a deformação normal na ruptura à tração longitudinal (direção principal 1)

ε_{lc}^u representa a deformação normal na ruptura à compressão longitudinal (direção principal 1)

ε_{2t}^u representa a deformação normal na ruptura à tração transversal (direção principal 2)

ε_{2c}^u representa a deformação normal na ruptura à compressão transversal (direção principal 2)

γ_{12}^u representa a deformação angular na ruptura no plano da lâmina

Para a condição da figura 7.9b será necessário introduzir as equações que estabelecem as relações entre tensão e deformação nas direções principais do material, que são obtidas da equação (6.22a). Assim:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1 &= \frac{\sigma_1}{E_1} - \nu_{21} \frac{\sigma_2}{E_2} \rightarrow \varepsilon_1 = \frac{1}{E_1} (\sigma_1 - \nu_{12} \sigma_2) \\
\varepsilon_2 &= \frac{\sigma_2}{E_2} - \nu_{12} \frac{\sigma_1}{E_1} \rightarrow \varepsilon_2 = \frac{1}{E_2} (\sigma_2 - \nu_{21} \sigma_1) \\
|\gamma_{12}| &= \frac{\tau_{12}}{G_{12}}
\end{aligned} \tag{7.60}$$

Colocando as relações da equação (7.57) em (7.60) obtém-se as relações que estabelecem as deformações nas direções principais em função do ângulo da fibra entre os dois sistemas.

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{E_1}(\cos^2 \theta - \nu_{12} \sin^2 \theta) \cdot \sigma_x \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E_2}(\sin^2 \theta - \nu_{21} \cos^2 \theta) \cdot \sigma_x \\ |\gamma_{12}| &= \sigma_x \frac{\sin \theta \cdot \cos \theta}{G_{12}}\end{aligned}\quad (7.61)$$

Desse modo, o critério de falha por deformação para uma condição em que as direções principais não estão coincidentes com as direções de referência (X-Y), pode ser obtido por meio das inequações (7.62).

$$\begin{aligned}-\varepsilon_{1c}^u &< \frac{1}{E_1}(\cos^2 \theta - \nu_{12} \sin^2 \theta) \cdot \sigma_x < \varepsilon_{1t}^u \\ -\varepsilon_{2c}^u &< \frac{1}{E_2}(\sin^2 \theta - \nu_{21} \cos^2 \theta) \cdot \sigma_x < \varepsilon_{2t}^u \\ \left| \sigma_x \frac{\sin \theta \cdot \cos \theta}{G_{12}} \right| &< \left| \gamma_{12}^u \right|\end{aligned}\quad (7.62)$$

Uma vantagem que pode ser atribuída aos critérios da Tensão Máxima e da Deformação Máxima é que eles oferecem condições para que na análise seja feita camada a camada, permitindo identificar em qual das direções eventualmente a falha poderia ocorrer e qual o tipo de falha (trativa, compressiva ou cisalhante) presente na camada. Isso possibilita que ações corretivas possam ser tomadas para eliminar a indicação de falha dada pelo critério.

7.2.3 – Critério do Máximo Trabalho (Azzi-Tsai-Hill)

Foi a partir do critério de Von Mises, que estabelece a predição do comportamento dúctil de materiais isotrópicos, conhecida como Teoria de von Mises e Hencky, que Rodney Hill formulou uma teoria mais ampla que contemplasse também materiais anisotrópicos, denominada de critério de Hill. Azzi e Tsai⁶⁵ propuseram uma adequação da teoria de Hill que tivesse aplicação nos materiais ortotrópicos, sendo esse critério de falha chamado de Azzi-Tsai-Hill.

O critério de Azzi-Tsai-Hill estabelece que a falha em uma das camadas de um material ortotrópico no estado plano de tensão **ocorrerá** quando a desigualdade estabelecida pela inequação geral (7.63) for violada, isto é, quando a porção esquerda da equação for igual ou maior que a unidade. Portanto, se a inequação for respeitada **não ocorrerá** falha no material.

$$\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_1}{X}\right)\left(\frac{\sigma_2}{X}\right) + \left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 < 1 \quad (7.63)$$

Se σ_1 e σ_1 forem ambas positivas ou ambas negativas, respectivamente resistências trativas X_t e Y_t e resistências compressivas X_c e Y_c deverão ser usadas na inequação (7.63). Assim, as quatro possíveis condições do critério são:

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{\sigma_1}{X_t}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_1}{X_t}\right)\left(\frac{\sigma_2}{X_t}\right) + \left(\frac{\sigma_2}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 &< 1 & (+\sigma_1 / +\sigma_2) \\
 \left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)\left(\frac{\sigma_2}{X_c}\right) + \left(\frac{\sigma_2}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 &< 1 & (-\sigma_1 / +\sigma_2) \\
 \left(\frac{\sigma_1}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_1}{X_t}\right)\left(\frac{\sigma_2}{X_t}\right) + \left(\frac{\sigma_2}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 &< 1 & (+\sigma_1 / -\sigma_2) \\
 \left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)\left(\frac{\sigma_2}{X_c}\right) + \left(\frac{\sigma_2}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 &< 1 & (+\sigma_1 / +\sigma_2)
 \end{aligned} \tag{7.64}$$

Possivelmente uma limitação atribuída ao critério de Azzi-Tsai-Hill seja o de não identificar o tipo de falha (trativa, compressiva ou cisalhante) associada às camadas que falharam. Oferece, contudo, o recurso de calcular, por meio da tensão, a carga para que o laminado não venha a falhar.

Como formulado, o critério de Azzi-Tsai-Hill pode ser aplicado considerando apenas as tensões nas direções principais da lâmina. Assim, para essa análise, as tensões que atuam nas direções globais, deverão ser transformadas para o sistema local.

Admitindo mais uma vez como exemplo uma tensão de tração na direção X (σ_x), as componentes da tensão nas direções principais são obtidas empregando-se a equação (7.57), que aplicada na equação (7.63) faz obter:

$$\left(\frac{\sigma_x^2 \cos^4 \theta}{X_t^2}\right) - \left(\frac{\sigma_x^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{X_t^2}\right) + \left(\frac{\sigma_x^2 \sin^4 \theta}{Y_t^2}\right) + \left(\frac{\sigma_x^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{S_{12}^2}\right) < 1 \tag{7.65}$$

em uma forma mais compacta como:

$$\sigma_x^2 \left[\left(\frac{\cos^4 \theta}{X_t^2}\right) + \left(\frac{\sin^4 \theta}{Y_t^2}\right) - \left(\frac{1}{X_t^2} \sin^2 \theta \cos^2 \theta\right) + \left(\frac{1}{S_{12}^2} \sin^2 \theta \cos^2 \theta\right) \right] < 1 \tag{7.66}$$

ou ainda:

$$\sigma_x < \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{\cos^4 \theta}{X_t^2}\right) + \left(\frac{\sin^4 \theta}{Y_t^2}\right) - \left(\frac{1}{X_t^2} \sin^2 \theta \cos^2 \theta\right) + \left(\frac{1}{S_{12}^2} \sin^2 \theta \cos^2 \theta\right)\right]}} \tag{7.67}$$

Para que não ocorra falha na direção X, pela inequação (7.67), a tensão gerada pela carga deverá ser inferior ao membro da direita e por meio desta a carga poderá ser determinada.

A equação (7.57) estabelece relações para uma tensão que age na direção X. O mesmo raciocínio poderá ser aplicado para os critérios de Tensão Máxima e Azzi-Tsai-Hill para a tensão normal σ_y e a tensão cisalhante τ_{xy} de acordo com as equações (7.68) e (7.69) respectivamente.

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_y \cdot \sin^2 \theta \\ \sigma_2 &= \sigma_y \cdot \cos^2 \theta \\ |\tau_{12}| &= \sigma_y \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta\end{aligned}\quad (7.68)$$

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 2\sigma_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ \sigma_2 &= -2\sigma_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ |\tau_{12}| &= \sigma_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)\end{aligned}\quad (7.69)$$

Um gráfico que compara os critérios de Azzi-Tsai-Hill e da Tensão Máxima de um laminado de fibra de vidro e matriz de resina epóxi é mostrado na figura 7.10⁵⁶. Nota-se que o critério de Azzi-Tsai-Hill é mais conservador, tanto em relação a um carregamento em tração quanto em compressão.

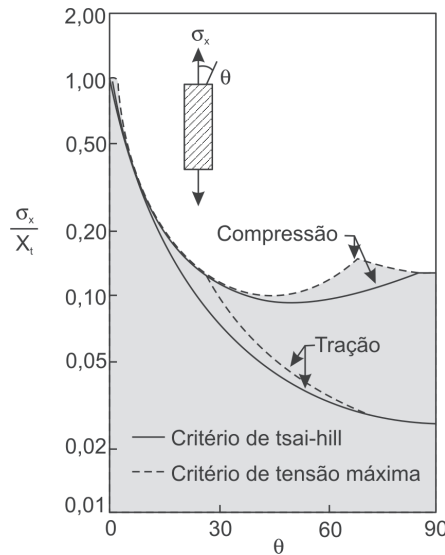


Figura 7.10- Comparação dos critérios de resistência de Azzi-Tsai-Hill e da Tensão Máxima⁵⁶

7.2.4 – Critério da Interação Quadrática (Tsai-Wu)

Analisando materiais anisotrópicos, deve-se considerar que um critério de falha seja função tanto de esforços que geram tensões normais, quanto daqueles que geram tensões cisalhantes, uma vez que a fratura pode ocorrer em virtude de diferentes conjuntos de tensões que agem no material. Assim, uma condição geral de ruptura pode ser colocada como⁶⁶.

$$F_{ij} (\sigma_{ij}) + F_{ijkl} (\sigma_{ij}) (\sigma_{kl}) = 1 \quad (7.70)$$

com $i, j, k, l = 1, 2, \dots, 6$; sendo F_{ij} um tensor de segunda ordem e F_{ijkl} um tensor de quarta ordem, que representam respectivamente os coeficientes dos termos lineares de resistência referentes a ação isolada das tensões σ_{ij} e os coeficientes dos termos quadráticos de resistência referentes a ação conjunta de σ_{ij} e σ_{kl} , daí o nome do critério desenvolvido por Stephen Tsai e Ed Wu. A representação das tensões é feita na notação tensorial.

Para o estudo de materiais ortotrópicos no estado plano de tensão, a teoria geral postulada por Tsai-Wu⁶⁷, a partir da equação (7.70), estabelece que a falha **não ocorrerá** quando a equação indicada por (7.71) for menor ou igual à unidade. Desse modo:

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j \leq 1 \text{ onde } i, j = 1, 2, 6 \quad (7.71)$$

Na forma expandida, a equação (7.71) pode ser escrita como:

$$(F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_6 \sigma_6) + (F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2) + 2(F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + F_{16} \sigma_1 \sigma_6 + F_{26} \sigma_2 \sigma_6) \leq 1 \quad (7.72)$$

Considerando-se uma lâmina unidirecional sob ação de tensões cisalhantes em que os eixos globais são coincidentes com os locais, a resistência da lâmina não será afetada pela direção das tensões de cisalhamento, sejam elas positivas ou negativas, ou seja, a resistência da lâmina é independente da direção das tensões de cisalhamento. Com isso, uma simplificação importante pode ser feita na equação (7.72), uma vez que os termos lineares contendo a tensão de cisalhamento, ou seja, $F_6 \sigma_6$, $F_{16} \sigma_1 \sigma_6$ e $F_{26} \sigma_2 \sigma_6$ devem ser nulos. Assim:

$$F_6 = F_{16} = F_{26} = 0 \quad (7.73)$$

Logo a equação (7.72) assume a forma

$$(F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2) + (F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2) + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 \leq 1 \quad (7.74)$$

Nos critérios da Tensão Máxima e Deformação Máxima foi mencionado que não havia interação entre as tensões colocadas pelas equações dos respectivos critérios. No entanto, observa-se na inequação (7.74) que o critério de Tsai-Wu estabelece uma interação entre as tensões σ_1 e σ_2 por meio do termo F_{12} .

Os termos F 's podem ser determinados por ensaios mecânicos aplicando-se individualmente tensões de tração e compressão longitudinais e transversais e cisalhamento no plano, que são os valores estabelecidos como resistência. Logo, pode-se colocar que $\sigma_1 = X_t$, $\sigma_1 = X_c$, $\sigma_2 = Y_t$, $\sigma_2 = Y_c$ e $\sigma_{12} = S_{12}$. Por exemplo, ao se aplicar somente X_t e as demais como zero, se terá a inequação (7.74) como:

$$F_1 \cdot X_t + F_{11} \cdot X_t^2 = 1$$

Portanto, considerando-se todas as resistências, tem-se:

$$\begin{cases} F_1 \cdot X_t + F_{11} \cdot X_t^2 = 1 \\ -F_1 \cdot X_c + F_{11} \cdot X_c^2 = 1 \end{cases} \quad (7.75)$$

$$\begin{cases} F_2 \cdot Y_t + F_{22} \cdot Y_t^2 = 1 \\ -F_2 \cdot Y_c + F_{22} \cdot Y_c^2 = 1 \end{cases} \quad (7.76)$$

$$F_{66} \cdot S_6^2 = 1 \quad (7.77)$$

Resolvendo as equações (7.75), (7.76) e (7.77), os termos F_1 , F_{11} , F_2 , F_{22} e F_{66} são obtidos, sendo respectivamente:

$$F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \quad F_{11} = \frac{1}{X_t \cdot X_c} \quad (7.78)$$

$$F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \quad F_{22} = \frac{1}{Y_t \cdot Y_c} \quad (7.79)$$

$$F_{66} = \frac{1}{S_6^2} \quad (7.80)$$

O termo restante da equação (7.74), definido como, F_{12} , refere-se àquele que estabelece o acoplamento entre as tensões σ_1 e σ_2 e é determinado por meio de um ensaio biaxial. Admiti-se F_{12} como sendo aquele determinado por Tsai e Hahn⁶⁸, que é dado pela equação (7.81). É fácil notar que os termos das equações (7.78), (7.79) e (7.80) podem ser determinados utilizando-se valores das resistências nas direções principais de lâminas unidirecionais, conforme ilustrado na figura 7.8.

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{(F_{11} \cdot F_{22})} \quad (7.81)$$

Portanto a inequação (7.74) poderá ser finalmente resolvida. Como no critério de Azzi-Tsai-Hill, o critério de Tsai-Wu também não permite identificar o tipo de falha associada às camadas que estejam falhando.

7.3 – Noções do Método dos Elementos Finitos

O propósito deste item é oferecer ao leitor não familiarizado com cálculo utilizando ele-

mentos finitos conceitos básicos para compreensão da técnica. Para os interessados no assunto, há uma ampla oferta de livros e cursos que têm por objetivo formar profissionais na área.

Inicialmente, na década de 60, o método dos elementos finitos era usado em cálculo estrutural e hoje é largamente aplicado também em problemas de campo (calor, fluidos, campo elétrico e magnético). Devido ao interesse e utilidade para diversas áreas técnicas, o método dos elementos finitos tem sido objeto de grande divulgação, sendo também incluído como disciplina do curso de engenharia da grande maioria das universidades.

Alguns exemplos de análises que podem ser executadas empregando-se o método dos elementos finitos⁶⁹:

- Análise estática linear de tensões e deformações (edifícios, pontes, torres, tubulações industriais, componentes mecânicos em geral).
- Análise dinâmica (modos de vibração e frequências naturais).
- Análise não-linear de tensões e deformações (conformação, grandes deformações).
- Análise térmica (transmissão de calor em regime permanente ou transiente).
- Análise de tensões devido ao carregamento térmico (tubulações industriais).
- escoamento de fluídos (aerodinâmica, hidrodinâmica).
- Campos elétricos (condutores, isolantes, eletrodeposição e corrosão) e magnéticos.

À medida que técnicas computacionais e numéricas desempenham um papel cada vez mais relevante na vida do engenheiro, torna-se fundamental o conhecimento dos fundamentos do método dos elementos finitos e da sua aplicação prática, especialmente para aqueles que trabalham em áreas de projeto e análise. No entanto, o número de trabalhos envolvendo materiais compósitos utilizando o método dos elementos finitos ainda é relativamente restrito.

O processo de análise por elementos finitos é dividido em três etapas: pré-processamento, processamento (ou solução) e pós-processamento⁶⁹.

Etapas de pré-processamento

Essa é a etapa que precede a solução matemática, possuindo especial importância, pois é nela onde o modelo é concebido. No pré-processamento são seguidos os seguintes passos:

- I. O modelamento, ou seja, o desenho da geometria.
- II. Selecionar o tipo de elemento finito para discretizar o modelo e gerar a malha. A geração da malha consiste em dividir a geometria em elementos, os quais são formados por nós, e cada tipo de elemento finito possui uma formulação matemática específica, a qual é responsável pela informação que o elemento oferece, tais como deslocamentos, rotações, tensões e deformações. Os nós de um modelo, por serem dependentes entre si, formam equações de deslocamentos que servem para compor a matriz global de rigidez para a resolução simultânea de todas essas equações. Os programas possuem

uma vasta biblioteca de diferentes elementos finitos. A figura 7.11 mostra um exemplo de um modelo discretizado e sua malha de elementos finitos e respectivos nós.

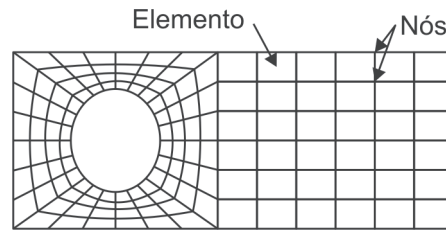


Figura 7.11: Exemplo de modelo e malha de elementos finitos

Quanto maior a quantidade de nós, maior a quantidade de elementos e consequentemente mais refinada será a malha. Nas regiões do modelo em que por ventura ocorrer concentração de tensões, como, por exemplo, nas regiões de contato e de aplicação da força, onde há um gradiente maior de variação de tensões, recomenda-se um maior refinamento da malha, que leva a uma maior precisão dos resultados.

- III. Definir as chamadas constantes reais (área, momento de inércia, espessura) para o elemento finito utilizado.
- IV. Definir as propriedades mecânicas e os modelos que descrevem apropriadamente o comportamento do elemento finito que conforma a simulação.
- V. Criar a geometria dos modelos. Por exemplo, a geometria do modelo plano considera estado plano de tensões por meio de um modelo bidimensional, enquanto o modelo de casca, no qual a espessura é um dado de entrada, considera o efeito de tridimensionalidade.
- VI. Discretizar a geometria modelada, criando os elementos que vão compor o modelo, ou seja, definir a malha de elementos finitos a ser utilizada. A geração da malha de elementos finitos resultará em um modelo composto por elementos conectados entre si por nós, conforme ilustração da figura 7.12.

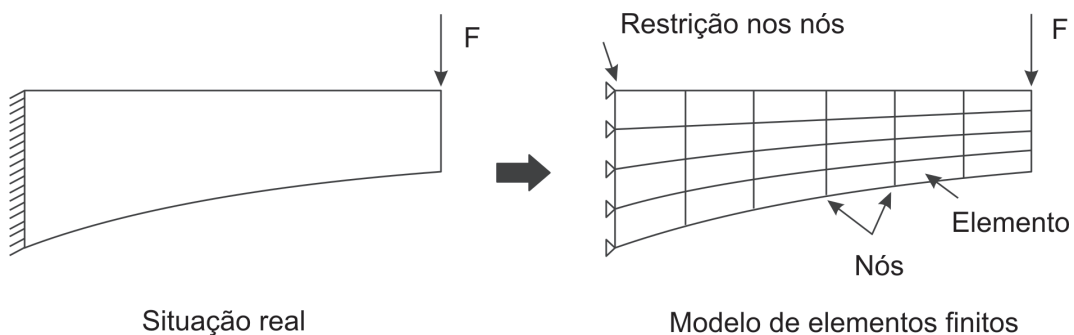
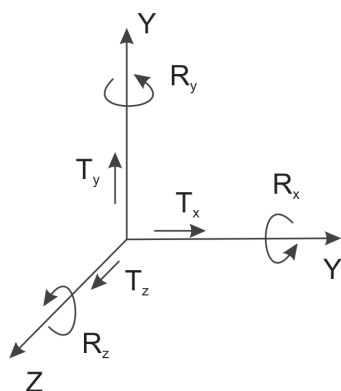


Figura 7.12- Situação real e o correspondente modelo de elementos finitos

Nessa fase é importante levar em consideração que uma malha mais fina pode oferecer, embora não necessariamente, melhores resultados, porém, o tempo de cálculo será maior. Uma malha mais grossa pode simplificar a execução do modelo, mas poderia comprometer a qualidade dos resultados.

VII. Definir e aplicar as cargas externas atuantes na estrutura ao modelo, assim como as condições de contorno.

Na análise de tensões e deformações, cada nó possui até seis graus de liberdade (GL) em relação ao sistema de coordenadas cartesianas globais, dependendo do tipo de elemento. Um grau de liberdade é a possibilidade que um nó tem de rotacionar ou transladar em relação a um eixo coordenado, conforme ilustrado na figura 7.13⁶⁹. As condições de contorno são restrições (de translação ou de rotação ou de ambos) aplicadas a um nó (ou nós) do modelo de elementos finitos para representar, por exemplo, apoios, vínculos, engastes.



T_{xyz} - graus de liberdade de translação ao longo de um eixo

R_{xyz} - graus de liberdade de rotação ao longo de um eixo

Figura 7.13- Graus de liberdade de um nó

Etapa de processamento

Após fornecer ao programa todas as informações necessárias para a análise, segue-se a etapa de processamento. Nesta etapa, o programa de elementos finitos calcula a matriz de rigidez, para que sejam calculados posteriormente os deslocamentos nodais e as tensões. Uma vez constatada que a solução está completa e sem erros, executa-se a última etapa, definida como pós-processamento.

Etapa de pós-processamento

Finalmente, a etapa de pós-processamento é aquela que exibe os resultados. Nesta etapa é possível visualizar diversas informações como tensões e deformações ou outros resultados possíveis para o modelo analisado que o programa permita exibir.

As tensões e deformações que serão mostradas em ilustrações no item seguinte são resultados nodais. O resultado nodal consiste em fazer, em cada nó do modelo, uma média dos resultados de todos os elementos finitos que contêm este nó.

7.3.1 – Exemplos de análises pelo Método dos Elementos Finitos

7.3.1.1 – Modelo plano

7.3.1.1.1 – Cisalhamento interlaminar

O modelo plano de elementos finitos usado para simular o ensaio de cisalhamento interlaminar é um modelo bidimensional e considera o estado plano de tensões.

Devido à simetria em relação ao eixo vertical, foi modelada apenas a metade da geometria do dispositivo de ensaio⁷⁰. Desta maneira, a força aplicada deve ser metade da força total e as condições de contorno aplicadas devem ser aquelas de simetria.

A figura 7.14 ilustra o modelo plano de elementos finitos na qual a cor amarela corresponde às camadas da matriz polimérica pura (sem reforço), a cor laranja representa o compósito carbono/ epóxi e a cor azul representa o apoio e o cilindro de carga.

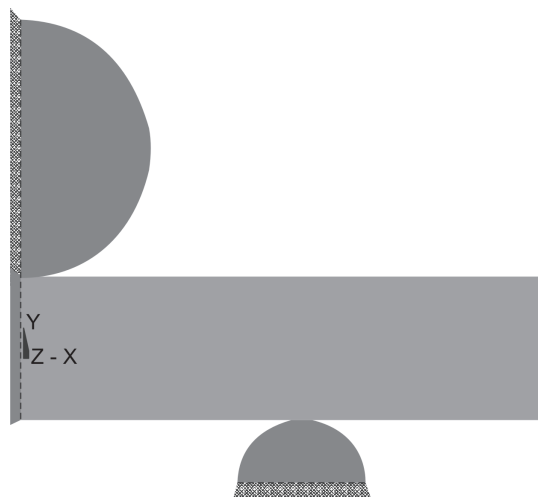


Figura 7.14 – Modelo plano⁷⁰

A malha gerada no pré-processamento da análise para elemento finito plano foi bastante refinada, contendo 26884 nós e 8799 elementos, conforme mostra a figura 7.15. Observa-se no detalhe um refinamento da malha na área do apoio por ser uma região em que ocorre uma concentração do esforço.

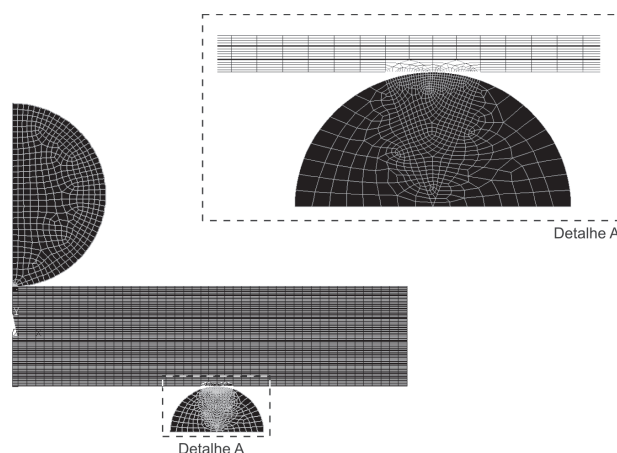


Figura 7.15- Malha de elementos finitos⁷⁰

A figura 7.16 mostra os resultados para uma carga de 2178 N, notando-se que na região central do corpo-de-prova, onde a força é aplicada, existe uma deflexão de 0,19 mm verticalmente para baixo, enquanto que nas extremidades do corpo-de-prova, há uma pequena deflexão para cima de 0,029 mm, como efeito da flexão do corpo-de-prova.

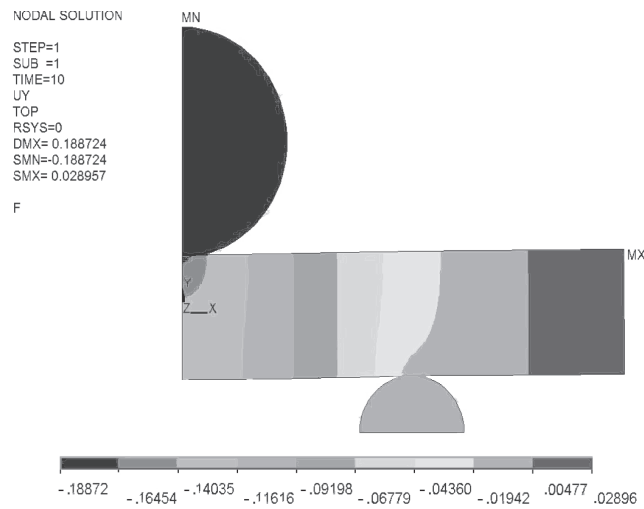


Figura 7.16- Representação dos deslocamentos verticais⁷⁰

7.3.1.1.2 – Análise de um tubo sob pressão interna

A figura 7.17 ilustra uma resposta de tensão em que um tubo de compósito de fibra de carbono foi solicitado com pressão interna⁷¹. A cor verde representa as camadas na direção circunferencial (*hoop*) e a cor amarelo as camadas na direção helicoidal. Os valores são dados em MPa. Observa-se que os valores representam tensões em pontos localizados, que é uma característica do método. Dependendo da complexidade da malha, haverá, portanto, centenas de valores indicando resposta “ponto a ponto”. No estudo das tensões mostrado na figura 7.17, existem respostas para as tensões nas camadas circunferenciais e nas camadas helicoidais.

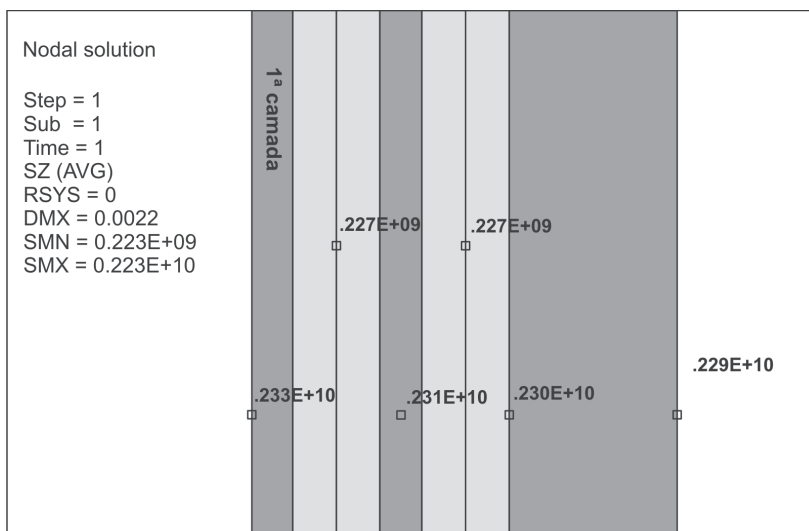


Figura 7.17- Ilustração da resposta de tensão em uma estrutura tubular de fibra de carbono e matriz epoxídica⁷¹

7.3.1.2 – Modelo de casca

O modelo de casca, também usado para simular o ensaio de cisalhamento interlaminar, é um modelo tridimensional e considera os efeitos de tridimensionalidade, ou seja, não admite estado plano de tensões. O elemento de casca utilizado neste modelo permite que a espessura do elemento seja dividida em diversas camadas com propriedades mecânicas e espessuras diferentes. Desta maneira, o modelo apresenta sua espessura dividida em diversas camadas de material compósito de fibra de carbono e as camadas interlaminares.

Da mesma forma que no modelo plano, devido à simetria em relação ao eixo vertical (axi-simetria), foi modelada apenas a metade da geometria do dispositivo de ensaio. Dessa maneira, a força aplicada deve ser metade da força total e as condições de contorno aplicadas devem ser aquelas de simetria⁷⁰.

A figura 7.18 ilustra o modelo de casca de elementos finitos, na qual a cor marrom representa o corpo-de-prova de material compósito e a cor azul representa o cilindro de apoio de aço carbono. A figura 7.19 mostra a distribuição das tensões de cisalhamento em todo o modelo, representadas por S_{xz} , identificando-se a tensão máxima de 76 MPa na região de aplicação do cilindro de carga.

Assim como na figura 7.16, onde foram representados os deslocamentos verticais, na figura 7.19 é possível identificar com clareza os pontos onde as tensões são elevadas por meio do código de cores. Na análise de um componente, isso novamente auxilia o projetista a aplicar ações corretivas onde eventualmente existem tensões que ultrapassem o limite de resistência do material.

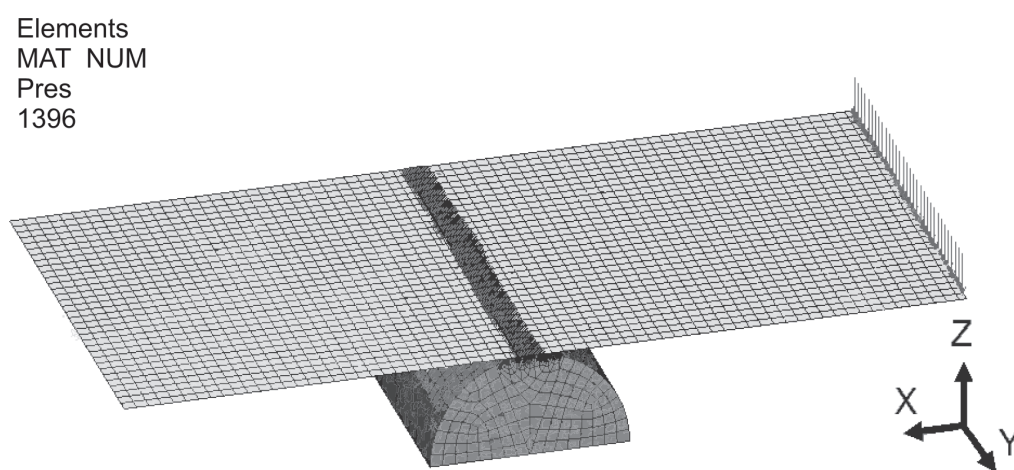


Figura 7.18- Modelo tridimensional de casca⁷⁰

Talvez uma dificuldade no método dos elementos finitos esteja em obter as respostas nos eixos locais, uma vez que estas são dadas considerando-se os eixos da estrutura. Há programas em que é possível criar sistemas de coordenadas locais rotacionados no ângulo que for desejado (45°, 30°, etc.). Desta maneira, pode-se ativar qualquer um desses sistemas locais e obter-se as tensões ou as deformações longitudinais ou transversais à fibra da camada desejada.

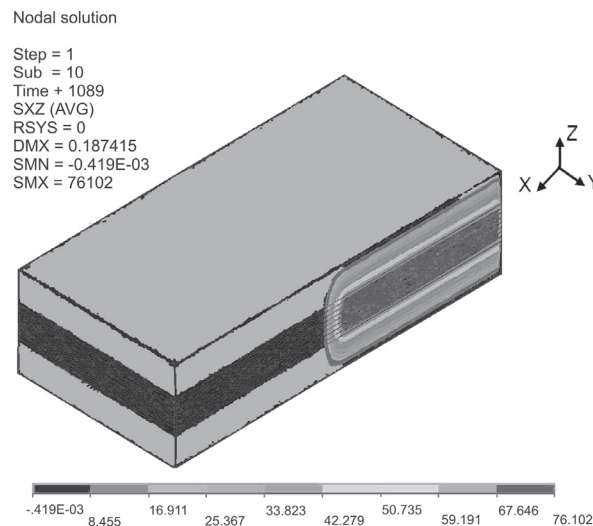
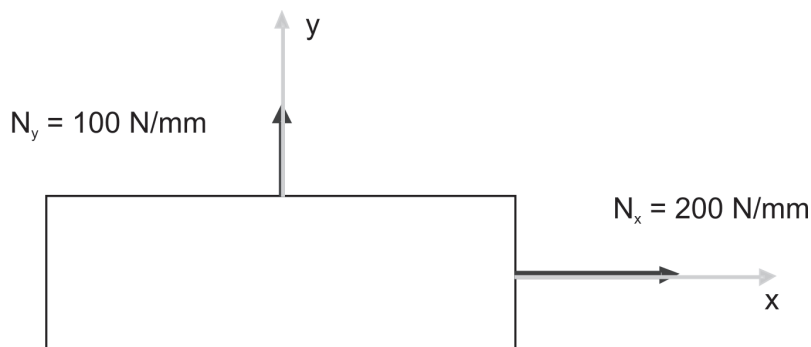


Figura 7.19- Representação da distribuição das tensões cisalhantes⁷⁰

7.4 – Exercício de análise de um laminado

Suponha um compósito plano de fibra de vidro e matriz de resina epóxi, com fração volumétrica de 45% de fibra, carregado conforme figura abaixo.

A configuração de laminação é dada como sendo $[+45^\circ/0/90^\circ]_T$ e admite-se a espessura de cada camada como sendo de 0,2 mm.



Considerando as propriedades dadas pela Tabela 1 e as equações da Teoria Clássica dos Laminados:

- Determinar as equações constituintes do laminado;
- Determinar as deformações centrais e curvaturas da placa.
- Calcular as deformações em cada camada nas direções globais (X-Y) e direções principais (1-2);
- Calcular as tensões em cada camada nas direções globais (X-Y) e direções principais (1-2);
- Verificar a possível ocorrência de falha usando o critério da Tensão Máxima e o critério de Azzi-Tsai-Hill.

Tabela 1- Propriedades do compósito com fração de 45% de fibra de vidro

E_1 (módulo na direção 1)	39,0 GPa
E_2 (módulo na direção 2)	8,3 GPa
G_{12} (módulo de cisalhamento no plano)	4,1 GPa
ν_{12} (coeficiente de Poisson)	0,26
X_t (resistência à tração na direção 1)	1062 MPa
X_c (resistência à compressão na direção 1)	958 MPa
Y_t (resistência à tração na direção 2)	31 MPa
Y_c (resistência à compressão na direção 2)	118 MPa
S_{12} (resistência ao cisalhamento no plano)	78 MPa

A resolução passo a passo para orientação do cálculo utilizando o modelo da Teoria Clássica dos Laminados é feita no Apêndice C.

8

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

8.1 – Introdução

Na elaboração de um componente estrutural utilizando materiais compósitos, procura-se otimizar as propriedades mecânicas associadas aos reforços e ao material polimérico. A seleção desses elementos deve levar em conta não só aspectos relacionados ao custo das matérias-primas para que possam atender ao desempenho esperado, mas também à técnica de fabricação utilizada.

A qualidade de um produto empregando-se material compósito é fortemente influenciada pelo processo de fabricação. Dependendo da exigência, características importantes, como frações volumétricas de fibra e matriz, orientação correta do reforço, tempo de trabalho da matriz e tempo de cura da matriz, podem nem sempre ser repetitivas se o processo de fabricação não for corretamente escolhido. A escolha inadequada pode também elevar o custo de produção contribuindo para a perda de competitividade do produto.

Indústrias como a nuclear, a naval e a aeroespacial, por exemplo, em que a confiabilidade é um dos fatores mais importantes para aceitação de um produto, há a necessidade de se ter na fabricação a menor dispersão possível dos parâmetros de processo. Esse objetivo é alcançado empregando-se um processo adequado à fabricação da peça, colaboradores capacitados e treinados e seguindo-se especificações e normas. Nesse contexto, a escolha correta do processo de fabricação contribui significativamente para o sucesso de um empreendimento.

8.2 – Forma de combinação dos materiais constituintes no compósito

Antes de descrever os principais processos de fabricação, convém introduzir as duas formas

em que fibra e matriz podem ser combinadas para formar o compósito. Há o sistema pré-impregnado (*dry system*) e o sistema de impregnação na fabricação (*wet system*).

No sistema *dry system*, a matriz é previamente combinada com a fibra utilizando técnicas que permitem a manipulação do material após um determinado tempo depois de sua fabricação. Como a fibra é previamente impregnada, daí o nome de *prepreg* ou pré-impregnado, é necessário que a cura da matriz seja retardada. Uma das condições para o trabalho com esse material é o armazenamento em *freezers* com temperatura controlada. Antes da etapa de fabricação das peças, o *prepreg* deve ser adequadamente descongelado para permitir seu manuseio.

As vantagens desse tipo de material são o controle do conteúdo de materiais voláteis, frações volumétricas bem estabelecidas, tempo de gelatinização controlado e uniformidade de espessura do laminado. As principais desvantagem são o custo do material e a infraestrutura para fabricação das peças, incluindo autoclave, ferramental, insumos e sala limpa. Existem também os processos SMC e BMC que utilizam o conceito de *dry system* e que nesse caso necessitam de prensas a quente.

No *wet system*, as fibras e matriz são combinadas no momento da fabricação da peça. Apresenta como vantagem o custo, porém exige do transformador técnicas para proporcionar uma correta molhabilidade das fibras e garantir quantidades de fibra e matriz no compósito de acordo com a especificação estabelecida. As variáveis que afetam a matriz estão associadas ao processo, destacando-se a viscosidade, o tempo de gelatinização (*gel time*) e a temperatura do ambiente.

Grande parte dos processos de fabricação no Brasil utiliza o sistema de impregnação da fibra no momento da fabricação da peça, ficando restrito a determinadas estruturas aeroespaciais, componentes de automóveis de competição e alguns artigos esportivos o uso de material pré-impregnado. Exemplos de *wet systems* são os processos de laminação por contato, laminação por projeção, enrolamento filamentar e moldagem por injeção a vácuo e infusão.

8.3 – Agentes desmoldantes

A função óbvia dos agentes desmoldantes é evitar a aderência do compósito ao molde. Um descuido nessa etapa de preparação do molde pode levar a uma situação dramática em que um molde caro e complexo, feito com esmero, pode ser totalmente perdido, afetando todo o processo produtivo de uma empresa. Embora seja uma tarefa simples, a aplicação do desmoldante deve ser feita após a limpeza e polimento do molde, com cuidado e atenção, para garantir que o material seja aplicado em toda a superfície do molde, seguindo as orientações indicadas pelo fabricante do produto. Os diversos sistemas desmoldantes disponíveis podem ser divididos em duas classes:

- Desmoldantes de sacrifício ou de aplicação repetitiva;
- Desmoldantes semipermanentes.

Os desmoldantes de sacrifício são assim chamados porque devem ser normalmente reaplicados após cada ciclo de fabricação, sendo recomendados para peças que tenham baixa escala de

produção. Como parte do desmoldante fica retido no produto (compósito) e parte no molde, exige limpeza da peça antes de qualquer trabalho secundário envolvendo pintura ou aplicação de adesivo, como também limpeza periódica dos moldes. Essa classe de desmoldantes são as ceras convencionais à base de carnaúba, ceras sintéticas, óleo de silicone, álcool polivinílico (PVA). Em trabalhos de cura ambiente, mesmo o papel celofane pode ser usado como desmoldante, porém este tende a ficar incorporado na peça.

Os desmoldantes semipermanentes têm a propriedade de formar uma camada antiaderente bastante eficiente, que permite a fabricação de uma grande quantidade de peças sem a necessidade de preparação do molde. Apesar de mais caro, o produto permite um aumento da produtividade porque exige apenas uma aplicação e evita a necessidade de retrabalho, podendo colaborar na redução de custo por unidade fabricada se comparado ao sistema de aplicação repetitiva.

8.4 – *Gel coat*

Especialmente na fabricação de peças utilizando fibra de vidro, a superfície do molde, após a preparação, limpeza e aplicação de agentes desmoldantes, recebe uma camada de resina que tem características especiais e confere ao compósito propriedades importantes como:

- a) Proteger contra intempéries, raios ultravioleta e ação da água;
- b) Permitir um acabamento liso, colorido e brilhante na superfície da peça, melhorando a estética;
- c) Servir como base para aplicação de tinta em superfícies que necessitam de pintura.

Variações na formulação de um *gel coat* podem ocorrer para atender necessidades específicas, mas de um modo geral sua formulação contém resina poliéster ortoftálica ou isoftálica, com ou sem neopentil glicol-NPG, iniciadores e promotores de cura, pigmentos e corantes, cargas, solventes, agente tixotrópico, inibidores e absorvedores ultravioleta. Sua aplicação é feita sobre a superfície do molde, manualmente ou com pistola, antes do véu de superfície ou da primeira camada do reforço, recomendando-se espessuras variando de 0,3 a 0,4 mm. O *gel coat* reproduz na peça todas as características superficiais do molde, não exercendo qualquer função de reparar defeitos que eventualmente existam sobre a superfície do molde.

A manipulação do *gel coat* exige prática e experiência, porque inúmeros defeitos podem ser introduzidos no laminado em decorrência da má preparação (formulação) e aplicação do *gel coat*. Baixa dureza, manchas, falta de brilho, estrias, ondulações, rachaduras e marcas do reforço sob a camada do *gel coat* são alguns destes defeitos. O recomendado é adquirir um produto de boa procedência, de fabricante que tenha qualidade comprovada e garantia de assistência técnica e seguir as orientações especificadas. Não se deve acrescentar nenhum solvente ao *gel coat* para proporcionar um maior rendimento do produto sem uma consulta ao fabricante.

Aplicações do *gel coat* por gelcoatedeiras exigem sempre manutenção preventiva dos filtros de água do equipamento, pois um dos principais problemas é a contaminação por água presente

na linha, bem como óleo do compressor. A aplicação manual por rolos ou pincéis é desaconselhada para produzir peças técnicas, pois por esse método há dificuldade em se conseguir uma camada uniforme do produto sobre o molde.

A laminação da primeira camada deve se feita considerando que, se o *gel coat* não estiver curado, o monômero da resina poliéster pode reagir com a resina do *gel coat* e reduzir a eficiência esperada. Da mesma forma, se a laminação da camada inicial ocorrer sobre o gel totalmente curado, poderá não haver uma boa adesão entre o compósito e o *gel coat*. O correto é iniciar a laminação após o teste de toque na camada do gel, sendo recomendada a situação em que a marca de um objeto possa deixar uma leve impressão, sem dar pega (grudar). Um leve toque com um dos dedos pode ser uma boa alternativa.

Há situações em que é necessária a aplicação na camada externa de um laminado, como quando são feitos reparos sobre laminados danificados ou quando se deseja proteção superficial de tubos ou tanques contra ação de intempéries. Para aplicação como camada externa de um laminado, os fabricantes recomendam o uso de *gel coat* parafinado para evitar a inibição da cura da resina exposta ao ar.

8.5 – Processos de fabricação

Conceitualmente, os processos de fabricação de peças, componentes e estruturas de material compósito podem ser divididos em processos de molde aberto e processos de molde fechado. A distinção está na qualidade do acabamento que se consegue nas superfícies do elemento fabricado e na quantidade de moldes necessários para a conformação da peça. Processos que utilizam molde aberto propiciam um acabamento liso e uniforme em apenas uma das faces da peça sendo necessário apenas um molde, enquanto que, nos processos que empregam molde fechado, consegue-se acabamento liso em ambas as faces e é necessário um par de moldes, chamados de macho e fêmea ou moldes de encaixe.

São exemplos de processos que utilizam molde aberto a laminação por contato (*hand lay-up*), a laminação por projeção (*spray-up*), o enrolamento filamental (*filament winding*) e a infusão. Os processos mais empregados de molde fechado são a moldagem por transferência de matriz (RTM/RTM *Light*) e a moldagem por prensagem (SMC e BMC), sendo que o BMC permite também o processo de injeção.

8.5.1 – Laminação por contato (*hand lay-up*)

Devido à praticidade, ao baixo custo de investimento e até facilidade, a laminação por contato, mais conhecida como laminação manual ou, *hand lay-up*, tornou-se o processo de fabricação mais utilizado em todo o mundo e domina ainda várias áreas da indústria de compósitos, para fabricação de uma grande variedade de produtos.

O processo permite uma fácil assimilação, tornando-se um negócio atraente. Essa facilidade, no entanto, pode criar uma falsa expectativa. Por vezes sucessivas, a ausência do conhe-

cimento que o material exige tem afetado a imagem dos compósitos no mercado consumidor, contribuindo para a formação de uma opinião errada de que o material é “fraco” ou inadequado às necessidades da engenharia. Embora simples, o processo de laminação manual exige conhecimento técnico.

O processo consiste na colocação de sucessivas camadas de reforço devidamente impregnadas pela matriz polimérica sobre a superfície de um molde que tem a forma negativa da peça a ser fabricada. Mantas, tecidos e fios picados são os materiais comumente utilizados para dar à estrutura a resistência mecânica desejada.

Tanques e tubulações, muitas vezes por acondicionarem e transportarem produtos químicos, necessitam da laminação de um não-tecido sobre o *gel coat*, chamado de véu de superfície. Essa fina camada não tem finalidade estrutural e deve ser laminada, utilizando-se uma resina resistente ao produto químico que será armazenado ou transportado, criando, dessa forma, uma barreira ao ataque dos produtos químicos no laminado estrutural. Véus de superfície são muito finos e têm gramatura de apenas 50 gm^{-2} .

Antes de iniciar a laminação, sugere-se a aplicação de uma camada de matriz sobre o *gel coat* ou sobre o véu, se for o caso, e sobre essa matriz uma camada de manta de baixa gramatura. Isso permite uma boa umectação da manta e melhor acomodação do reforço no molde, inclusive nas regiões de curvatura, e facilita a operação de roletagem para retirada do ar aprisionado na manta. Em situações em que o molde apresenta curvatura muito fechada, convém posicionar cordões de fios contínuos nos cantos, garantindo bom assentamento com auxílio de bastões apropriados. Sobre o fio contínuo é colocada a manta.

Laminados espessos devem ser feitos em etapas sucessivas de alguns grupos de camadas para evitar que o calor liberado na cura da matriz, provocado pela exotermia, aumente a contração do material polimérico, podendo até causar trinca no *gel coat*. Em casos extremos, pode ocorrer um empenamento do molde se este for construído com materiais que não tenham resistência a temperaturas, que podem facilmente passar de 100°C . A consolidação do laminado no molde é feita por passadas sucessivas de roletes sobre a fibra impregnada, preferencialmente em duas direções perpendiculares entre si, que têm a importante função de retirar o ar aprisionado no compósito durante a laminação. Há inúmeros tipos de roletes, conforme ilustra a figura 8.1, cada um para atender a uma necessidade específica. Para garantir uma boa umectação das fibras, recomenda-se que a viscosidade da matriz polimérica seja em torno de 300 mPa.s . Isso garante a formação de um compósito com uma distribuição mais homogênea de matriz, evitando-se regiões de elevada densidade do material polimérico.

A quantidade de camadas, os tipos de reforço, a orientação e a sequência de formação das camadas devem seguir rigorosamente as instruções colocadas no roteiro de laminação, muitas vezes chamado de *ply book*, que numa tradução literal seria livro de camadas. Nenhuma alteração deve ser feita na configuração de laminação sem uma análise ou um cálculo prévio.

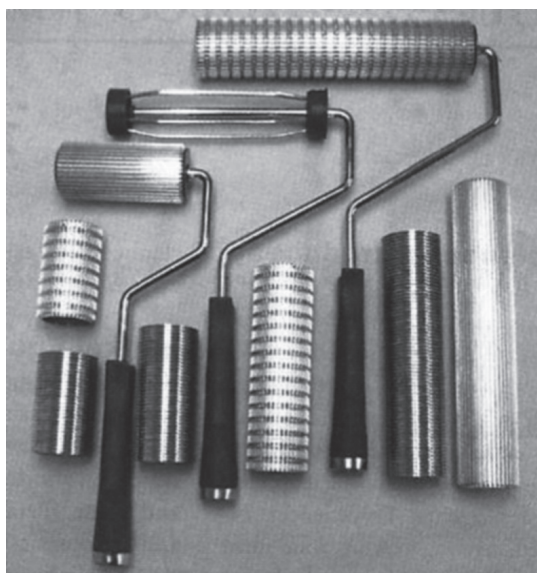


Figura 8.1 – Tipos de roletes para assentamento da fibra e retirada de ar

O processo de laminação manual praticamente não requer investimento em equipamentos, sendo necessário apenas produtos auxiliares como pincéis, roletes, espátulas, bastões, ferramentas de corte e recipientes para preparação da matriz. Equipamentos de proteção individual-EPI's são necessários e obrigatórios, bem como exaustão na área de laminação. Devido à necessidade contínua da limpeza dos materiais auxiliares, solventes apropriados devem fazer parte da rotina de qualquer fabricação. A acetona é um dos produtos mais eficientes para essa tarefa e os materiais devem ser limpos imediatamente após a utilização.

As vantagens associadas ao processo são a simplicidade, a flexibilidade de projeto, o baixo investimento, nenhuma restrição de tamanho de peça e a possibilidade de laminação no campo de trabalho. No entanto, a laminação por contato exige elevada incidência de mão-de-obra e produz acabamento em apenas uma das faces da peça. A qualidade do produto é fortemente dependente da habilidade do laminador.

8.5.2 – Laminação por projeção (*spray-up*)

A laminação por projeção representa uma evolução do processo de laminação por contato por possibilitar um aumento expressivo da produção. Esse benefício é alcançado por um investimento que demanda a compra de um equipamento que ajusta automaticamente as proporções da resina pré-acelerada e do iniciador de cura e faz, simultaneamente, o corte e a impregnação da fibra de acordo com determinados ajustes de pressão.

Dada à elevada produção que o processo permite, a laminação exige experiência do laminador para que tenha na peça, sobretudo, uma regularidade de espessura. Poucos segundos sem uma movimentação adequada da pistola poderão provocar uma acentuada diferença de material colocado em relação a uma região vizinha. Um benefício importante, no entanto, além do aumento da produtividade, é a regularidade nas frações volumétricas do laminado, que é dada pela regulagem

feita previamente no cabeçote da pistola e no motor do cortador, muito diferente da laminação por contato que tem interferência direta do laminador.

A figura 8.2 ilustra uma pistola utilizada no processo *spray-up*. A mistura da resina pré-acele-rada com o iniciador de cura (catalisador) é feita fora do bico do equipamento por dois orifícios, sendo conduzidas respectivamente pelas mangueiras na cor preta e azul. Uma das mangueiras na cor vermelha tem a função de controlar o gatilho e a outra o leque de matriz polimérica na saída da pistola, permitindo uma impregnação mais fechada ou mais aberta, respectivamente, para cobrir uma área menor ou maior de impregnação. A mangueira de maior diâmetro é o retorno de resina para a função de circulação em sistema fechado. A mangueira cinza, no plano superior da foto, alimenta o motor pneumático do picotador de fibra. A figura 8.3 mostra a impregnação da fibra pela matriz polimérica por uma pistola de um equipamento de *spray-up*.

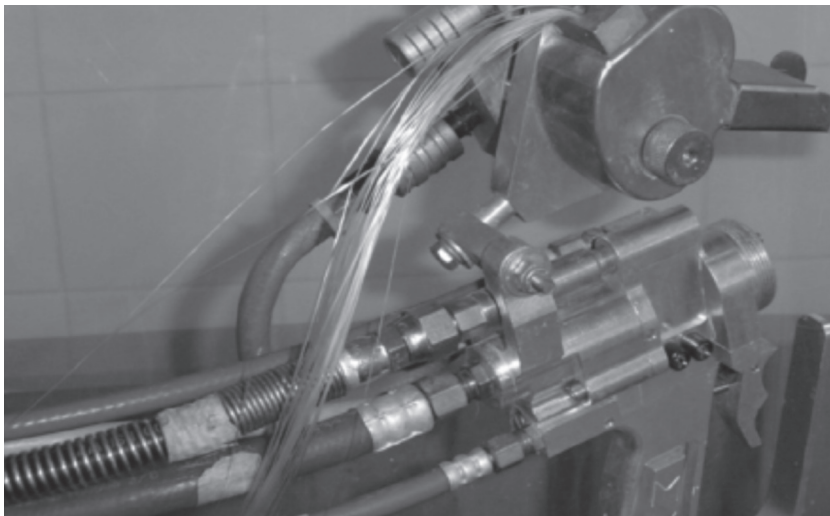


Figura 8.2 – Vista geral de uma pistola de *spray-up* (Cortesia: ABMACO)

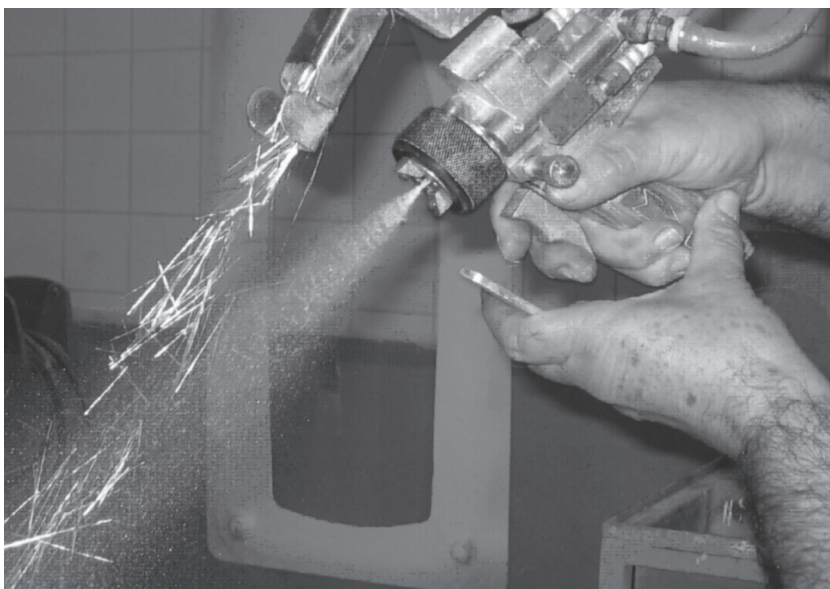


Figura 8.3 – Detalhe do bico de uma pistola de *spray-up* (Cortesia: ABMACO)

Antes de iniciar a laminação, uma camada de matriz sobre o *gel coat* ou sobre o véu de superfície pode ser colocada, ajustando-se facilmente as pressões na pistola de modo a permitir apenas a saída da matriz. A elevada quantidade de fios impregnados sobre o molde necessita de funcionários auxiliares para fazer a roletagem. A menos que o molde seja pequeno, o próprio laminador poderia fazer essa operação, porém isso não se justifica, porque o processo foi desenvolvido para altas taxas de produção, que pode chegar a 15 quilogramas de laminado por minuto. Várias passagens da pistola de laminação sobre o molde são necessárias para que seja atingida a espessura desejada.

A figura 8.4 ilustra o processo de *spray-up* em escala laboratorial numa peça de pequenas dimensões para ajuste dos parâmetros de processo. É possível identificar facilmente a impregnação do fio picado pelo jato de matriz pulverizada no bico da pistola.



Figura 8.4 – Laminação por projeção (*spray-up*) em escala laboratorial (Cortesia: ABMACO)

O processo oferece a vantagem de ter uma produtividade maior que a laminação por contato, como melhor aproveitamento das matérias-primas. Possibilita também a construção de moldes mais simples e baratos e não apresenta nenhuma restrição quanto ao tamanho das peças a ser laminadas. Devido à portabilidade do equipamento, permite a laminação de estruturas no campo de trabalho. Como no processo de laminação por contato, recomenda-se que a viscosidade da matriz polimérica seja em torno de 300 mPa.s.

8.5.3 – Enrolamento filamental (*filament winding*)

Um dos grandes benefícios que deve ser explorado na utilização dos materiais compósitos com reforço contínuo é usufruir das propriedades que a fibra apresenta em sua direção longitudinal. O processo no qual melhor se consegue essa vantagem, recomendado para fabricação

de peças cilíndricas e esféricas, é o de enrolamento filamentar ou bobinamento de filamentos contínuos (*filament winding*). Vasos de pressão, reservatórios e tanques, tubulações de alta pressão, cilindros para armazenamento de gás e estruturas aeronáuticas são exemplos de alguns produtos, que podem ser utilizados nas indústrias petroquímicas, de papel e celulose, irrigação e saneamento, aeroespacial e bélica.

Componentes fabricados por esse processo têm como objetivo conseguir uma das mais altas relações resistência-peso entre os materiais empregados para aplicações estruturais. Entretanto, para alcançar esse resultado, é necessário garantir que a orientação da fibra esteja na direção das tensões principais e que ao mesmo tempo se utilize uma quantidade de reforço na matriz proporcional à magnitude dessas tensões. Como ilustração, vale mencionar que dados obtidos de componentes bobinados a 45° não poderiam ser aplicados para projetos onde um ângulo eventualmente maior fosse utilizado.

O produto fabricado por enrolamento filamentar é fortemente influenciado por variáveis independentes, as quais são função do processo, do tipo de fibra e matriz, do manuseio e polimerização da matriz e devem ser permanentemente controladas e registradas. Qualquer alteração tal como tensão de bobinagem, viscosidade e ciclo de cura da matriz, condições ambientais, orientação do reforço ou quebra de filamentos pode afetar a qualidade do produto e comprometer o seu desempenho. Determinados produtos exigem também a utilização de máquinas de bobinagem multiaxiais, ou seja, aquelas que apresentam “eixos” com vários graus de liberdade e a operação é auxiliada por computador. Nas máquinas mais sofisticadas é possível ter de cinco a seis eixos, todos controlados por um sistema CNC ou por um *software* específico para o processo.

No equipamento de bobinagem existe o controle da tensão exercida na fibra, como também da temperatura do banho que contém a matriz (resina-endurecedor-acelerador). Deve existir um perfeito sincronismo entre os movimentos de rotação do mandril, deslocamento longitudinal do carro que contém o banho de impregnação e demais eixos auxiliares. Também é recomendado que o ambiente no qual se realiza o trabalho apresente temperatura e umidade pré-estabelecidos e que a matriz obedeça a ciclos de cura controlados. O dispositivo de alimentação dos fios deve ser projetado de modo a evitar ao máximo a quebra de filamentos, empregando-se em seu conjunto materiais cerâmicos de reduzida abrasividade. A técnica requer, portanto, equipamentos especialmente desenvolvidos para essa atividade, cujo funcionamento automatizado possibilite um controle preciso da trajetória de deposição da fibra de acordo com as direções de máxima solicitação. A figura 8.5 ilustra uma máquina de enrolamento filamentar.

Para a produção de componentes estruturais que necessitam de um longo tempo de fabricação, como aqueles formulados com resina epóxi e acelerador anidrido, há a necessidade de cura térmica que demanda longos períodos de permanência do conjunto mandril-compósito na estufa. Nesses casos, é fundamental que a estufa seja dotada de um conjunto moto-redutor e mancais rotativos para permitir o giro do mandril e garantir uma distribuição e cura homogênea da matriz, bem como estar ligada a um sistema gerador para evitar a perda da peça em caso de interrupção de energia elétrica.

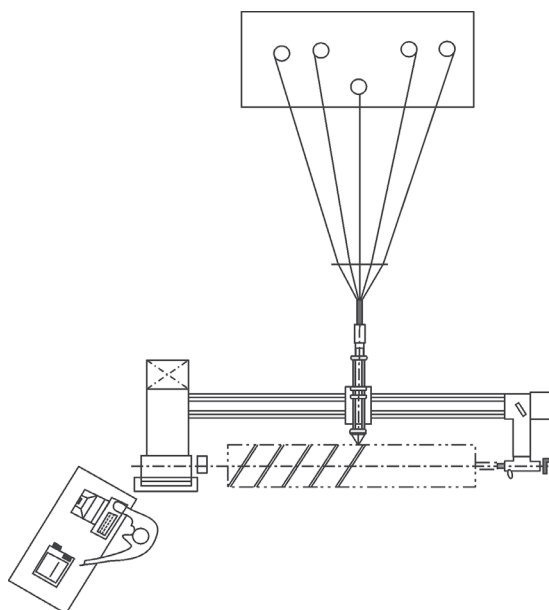


Figura 8.5 – Desenho ilustrativo com vista superior de uma máquina de enrolamento filamentar

Nesse processo, os filamentos transportando a matriz (sistema *wet winding*) são bobinados de forma contínua sobre um mandril que gira com rotação controlada e cujo formato deve corresponder ao componente a ser produzido. A fibra é mergulhada em um banho que contém a matriz previamente preparada e que está posicionado sobre um carro que percorre uma trajetória paralela ao eixo do mandril (eixo longitudinal). Esse banho deve ser mantido sob temperatura controlada de modo a manter a viscosidade da matriz adequada para que os filamentos sejam convenientemente impregnados.

O ângulo de bobinagem desejado é obtido pela ação coordenada da rotação do mandril com o movimento longitudinal do carro, permitindo, assim, que as fibras sejam posicionadas na direção das tensões principais. Esse é um dos parâmetros mais importantes do processo e define o comportamento estrutural do elemento fabricado. Por exemplo, para vasos de pressão que estarão sujeitos ao estado biaxial de tensões (carregamento tanto na longitudinal quanto na direção circunferencial), o ângulo indicado é 54° . Basicamente os métodos empregados no processo são identificados como circunferencial (*hoop*), helicoidal e polar, sendo usual, em muitos trabalhos, optar-se pela composição dos mesmos.

Estruturas cilíndricas podem ser produzidas desde pequenos até grandes diâmetros, com comprimento apenas limitado pela capacidade da máquina bobinadeira. Um exemplo é o do ônibus espacial americano em que os tanques de combustível sólido (os dois menores que se vêem nas fotos do veículo) têm diâmetro de 3,7 m e segmentos de 5,9 e 8,2 m de comprimento. Há equipamentos também que produzem tubos de 300 mm a 3000 mm de modo contínuo e que não estão limitados ao comprimento da máquina. Esse processo é conhecido como Drostholm.

Na bobinagem circunferencial, ilustrada pela figura 8.6a, a fibra é depositada na posição normal em relação ao eixo de rotação do mandril. A maior parcela de resistência estrutural, nesse caso, encontra-se na direção tangencial ou circunferencial, de tal forma que os filamentos fiquem submetidos a esforços de tração. Na direção longitudinal, há apenas a resistência relativa à matriz que é significativamente menor que a do reforço.

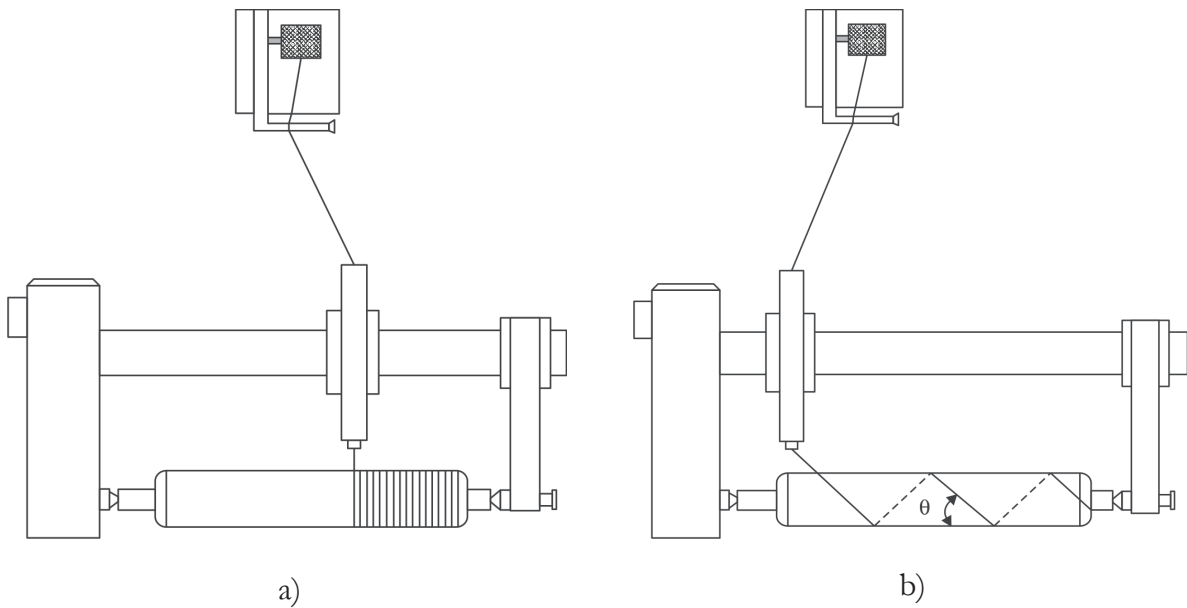


Figura 8.6 – Enrolamento filamentar: a) bobinagem circunferencial, b) bobinagem helicoidal

A bobinagem helicoidal permite a deposição dos fios segundo um ângulo pré-determinado formado com o eixo de rotação do mandril, de maneira que haja um balanceamento entre resistência circunferencial e longitudinal da peça, capacitando a estrutura a resistir às tensões que a solicitem e que agem nos filamentos de reforço. O ângulo de bobinagem é estabelecido em função da banda (*bandwidth*), definida como a largura dada pelo conjunto de fibras que estão sendo enroladas no mandril, do diâmetro do mandril ou do diâmetro interno desejado para o cilindro e do número de passadas requeridas para a cobertura completa do mandril. A figura 8.7b ilustra o processo.

Na bobinagem polar, o mandril gira com baixa rotação, enquanto que o eixo alimentador rotaciona inclinado de um ângulo pré-estabelecido em torno do eixo longitudinal do mandril, que avança da largura da banda ou largura do fio a cada rotação completa do mandril. Desse modo, os filamentos são posicionados de um extremo ao outro no mandril, obtendo-se, preferencialmente, elevada resistência na direção axial ou longitudinal. Esse método é representado na figura 8.7. Raros são os componentes fabricados com a bobinagem polar, porque é possível, empregando-se a bobinagem helicoidal, a orientação de fibras num ângulo mínimo de 10° .

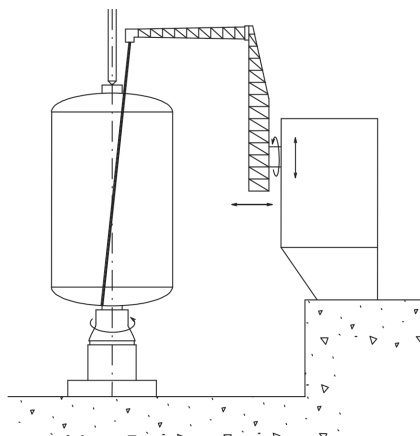


Figura 8.7 – Bobinagem polar

Há também a possibilidade de se intercalar fibras picadas na peça bobinada, cujo benefício é garantir resistência nas direções em que não há a fibra contínua. Assim, as propriedades mecânicas da estrutura são otimizadas na direção circunferencial (ângulo de 90°), enquanto as fibras picadas com distribuição aleatória fornecem as propriedades que são necessárias em outras direções, como por exemplo, na direção axial. Ao balancear a quantidade de cada tipo de reforço, o processo *hoop-chop* tem a flexibilidade de construir laminados com percentuais de vidro que podem variar de 30%, como nos processos de laminação manual ou a pistola, até 70%, como no processo de enrolamento filamentar. A Figura 8.8 ilustra a fabricação de um tubo pelo processo *hoop-chop* utilizando o equipamento Drosthholm.



Figura 8.8- Processo *hoop-chop* de bobinagem contínua com máquina Drosthholm (cortesia Ameron/Polyplaster)

Na fabricação de vasos para armazenamento de produtos químicos, como também na fabricação de dutos, lavadores de gases e outras estruturas sujeitas ao ataque de agentes agressivos, é recomendada uma sequência de laminação formada principalmente por uma barreira de proteção, camadas intermediárias com manta, camada estrutural e eventualmente uma camada de acabamento. O processo *hoop-chop* combina lâminas de resina pura (*liner*), de fibras de vidro picadas (barreira de corrosão), de areia (núcleo) e de fibras de vidro contínuas (fibras unidirecionais) garantindo produtos altamente eficientes para essas áreas de atuação.

Desse modo, o processo *hoop-chop* pode oferecer algumas vantagens adicionais sobre o processo de enrolamento filamentar convencional como:

- Melhor balanceamento das propriedades mecânicas nas direções axial e circunferencial;
- Possibilidade de construir barreiras de corrosão ricas em fibras de vidro picadas em qualquer espessura que seja requisitada;

- Possibilidade de construir lâminas ricas em resina;
- Possibilidade de construir lâminas estruturais ricas em fibra de vidro que atendam as aplicações que envolvem altas pressões e grandes diâmetros;
- Possibilidade de construir lâminas de fibras de vidro picadas com percentual de vidro inferiores a 30%. Essa é uma característica altamente desejável para tubos que são usados em processos industriais químicos.

O mandril de bobinagem deve atender a requisitos de projeto onde deve-se considerar que o peso determinará não só as condições de manuseio e transporte, como também a possibilidade de apresentar deflexão devido ao peso próprio. Exigências como forma, acabamento superficial, capacidade de suportar esforços de bobinagem e os vários ciclos de cura ao qual estará submetido ao longo de sua vida útil estão entre as mais importantes para garantir a qualidade da peça bobinada.

Para trabalhos com cura térmica da matriz deve-se considerar também a sua expansão térmica, lembrando que, após a cura, a peça bobinada terá um diâmetro superior àquele do início do processo que correspondia exatamente ao diâmetro do mandril. Essa condição física é especialmente importante em trabalhos nos quais o produto final deve atender a requisitos dimensionais rigorosamente estabelecidos.

A situação mais favorável para a desmoldagem é aquela em que a peça é “descolada” do mandril após completado o ciclo de cura da matriz, permitindo sua extração sem nenhum esforço. Tal condição, no entanto, não é alcançada facilmente. A cura da matriz pode promover contrações que podem chegar a 9% para as resinas poliéster e 3% para as resinas epóxi, havendo, portanto, uma clara tendência de o compósito ficar preso no mandril, contribuindo assim para dificultar sua extração. Este ponto ilustra uma vez mais a importância da correta seleção do material do mandril.

As propriedades mecânicas de um compósito são dependentes da fração volumétrica de fibra. Essa é uma variável que é função de parâmetros de processo, tais como tensão no fio, temperatura do banho de impregnação, viscosidade da matriz, velocidade do carro e rotação do mandril. Para produzir componentes estruturais recomenda-se proporções de reforço de $65 \pm 2\%$ e fração de poros inferior a 2%, sendo que em componentes aeronáuticas muitas vezes se requer apenas 1% de poros.

No processo de enrolamento filamentar existem dois métodos para se fabricar estruturas cilíndricas, chamados de bobinagem cruzada e bobinagem por superposição de camadas. A bobinagem cruzada (*interweaving*) consiste numa estrutura entrelaçada onde cada cobertura completa do mandril representa efetivamente duas camadas de material, sendo estas posicionadas a $+\theta$ e a $-\theta$ em relação ao eixo longitudinal do mandril, conforme ilustração da figura 8.9. O número de cruzamentos que ocorre no mandril define o tipo de padrão de bobinagem, sendo primário quando ocorre apenas um cruzamento, secundário quando ocorrem dois e terciário quando ocorrem três, como no exemplo da figura.

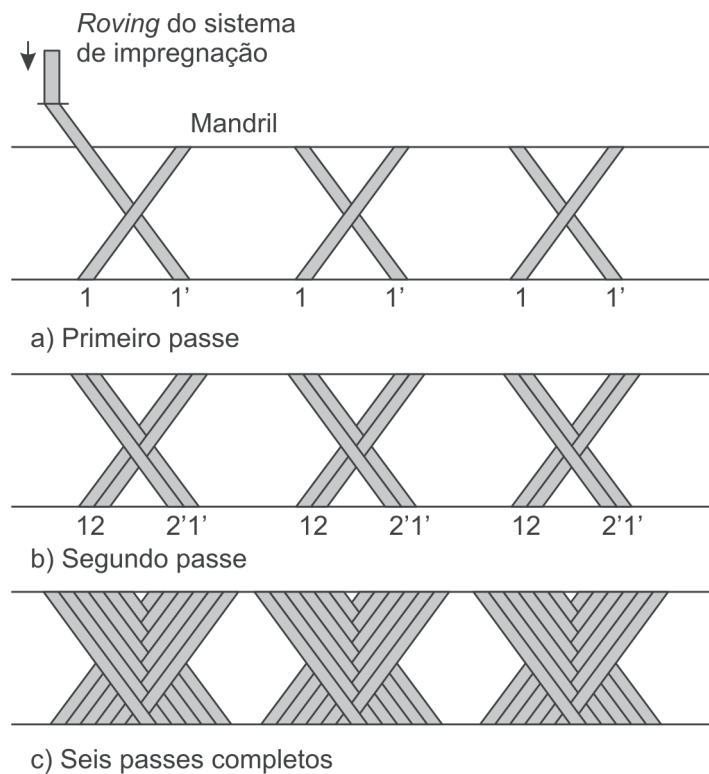


Figura 8.9 – Ilustração da bobinagem cruzada

No método de bobinagem por superposição de camadas, as camadas posicionadas $+\theta$ e $-\theta$ são bobinadas de modo independente, conforme ilustração da figura 8.10. Nesse método, os domos em vez de serem formados por curvaturas geodésicas, como aqueles do método cruzado, são compostos por pinos, posicionados radialmente em um disco metálico.

Na primeira etapa, todo o mandril é completamente recoberto com a camada, por exemplo, $+\theta$. Somente após essa etapa é que tem início a colocação da camada seguinte, a qual será orientada na posição $-\theta$. Isso permite que o reforço seja colocado em camadas, a exemplo do processo de laminação.

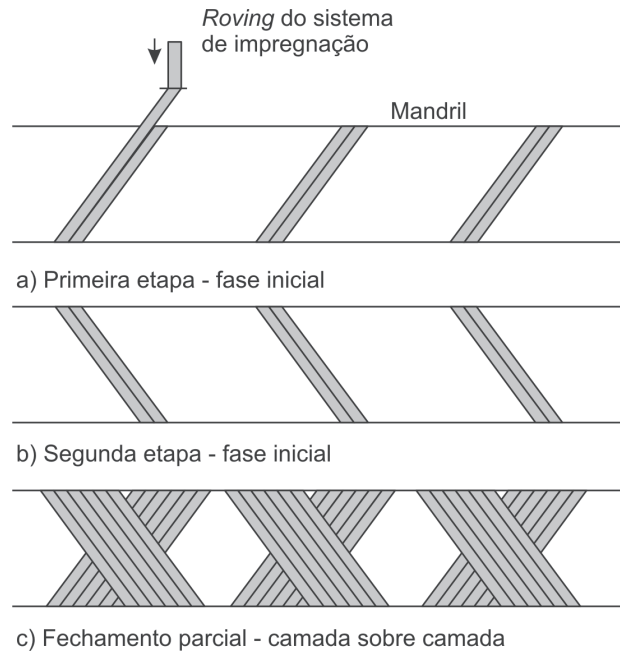


Figura 8.10 – Ilustração da bobinagem por superposição de camadas

O posicionamento do reforço sobre o mandril para os dois métodos apresentados é reproduzido na figura 8.11. No esquema na figura 8.11a é representada a bobinagem cruzada na qual, como já foi mencionado, cada cobertura completa do mandril representa duas camadas e na figura 8.11b o bobinamento por superposição de camadas.

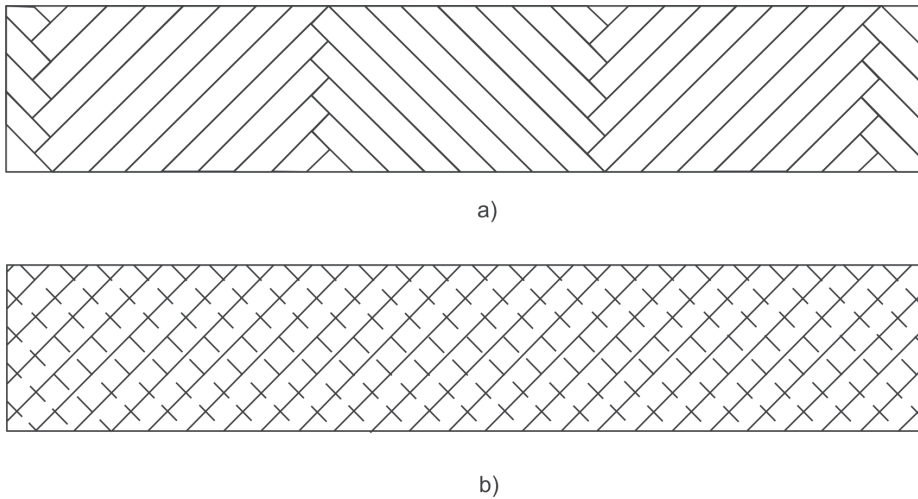


Figura 8.11 – Sequência do posicionamento do reforço na fabricação pelo processo de enrolamento filamen-
tar: a) bobinagem cruzada e b) bobinagem por superposição de camadas

O enrolamento filamenar é o processo que oferece a possibilidade de colocar o reforço na forma de fibras contínuas, tiras (*tapes*) ou fibras picadas, permitindo que no caso de fibras contínuas, essas sejam alinhadas com a direção do carregamento. Isso torna o processo capaz de se fabricar estruturas

em que é possível se extrair toda a capacidade de resistência mecânica que as fibras oferecem e otimizar o projeto para se obter peças com a melhor relação resistência/peso e módulo de elasticidade/peso.

No processo de enrolamento filamental uma boa impregnação da fibra deve ser sempre obtida, não só para garantir uma eficiente transferência de carga da matriz para os filamentos, como também manter as proporções dessas matérias-primas de acordo com o estabelecido em projeto, uma vez que esses são alguns dos parâmetros mais importantes relacionados à resistência do compósito. Por isso, o sistema de impregnação deve ser bem projetado para alcançar esse fim.

8.5.4 – Moldagem por prensagem a quente

São processos que se caracterizam pelo uso de prensas com moldes aquecidos e que apresentam alguma semelhança com o processo de estampagem de chapas metálicas. Possibilitam a fabricação de peças com elevada produtividade, baixa incidência de mão-de-obra, redução do desperdício de matérias-primas e permitem acabamento liso em ambas as faces do produto fabricado. O aumento da produtividade exige, no entanto, alto investimento no ferramental que deve ser de aço, não só pelo acabamento e detalhes, mas também pela resistência para suportar pressões de até 14 MPa e temperaturas de 150°C.

De acordo com as propriedades desejadas do compósito, o processo pode ser dividido em moldagem de massa (pasta) ou BMC (*bulk molding compound*) e moldagem de placas (folhas) ou SMC (*sheet moulding compound*). Os fabricantes utilizam basicamente as mesmas matérias-primas para fabricação da massa e da placa, variando o comprimento da fibra que no SMC é de 13 a 50 mm e no BMC é de 3 a 15 mm. O composto polimérico é constituído por fibra de vidro picada, resina poliéster, iniciador de cura, pigmento, aditivo termoplástico, agente desmoldante, espessante, inibidores e cargas, podendo ainda conter absorvedores de ultravioleta e retardantes de chama. No entanto, resinas fenólicas e viniléster, embora de aplicações mais específicas, encontram utilização na composição do material. Normalmente o que define o tipo de resina a ser empregada na formulação são as propriedades mecânicas, resistência química, resistência a temperatura e o tempo de cura, que está associado à reatividade da resina.

Considerando as diferenças no comprimento das fibras e nos métodos para moldagem, os resultados esperados de propriedades não são iguais para o BMC e para o SMC. O método de prensagem de massa tem um custo menor e as propriedades de componentes fabricados pelo método são inferiores às fabricadas pelo SMC, em que as placas têm de 2 a 6 mm de espessura, contendo de 25 a 30% fibra de vidro. Para aplicações estruturais, no entanto, é possível adquirir placas com até 50% de fibra picada o que permite alcançar peças com elevadas propriedades mecânicas.

A figura 8.12^{72,73} ilustra o processo de fabricação de placas para utilização no SMC. O material é produzido na forma de rolos ou bobinas, sendo envelopado em ambos os lados por filmes de polietileno, contendo no interior o composto polimérico. O conjunto é compactado por roletes de aço no final da linha de produção, que possuem ranhuras para melhor assentamento do reforço na matriz polimérica e eliminação do ar retido durante a fabricação.

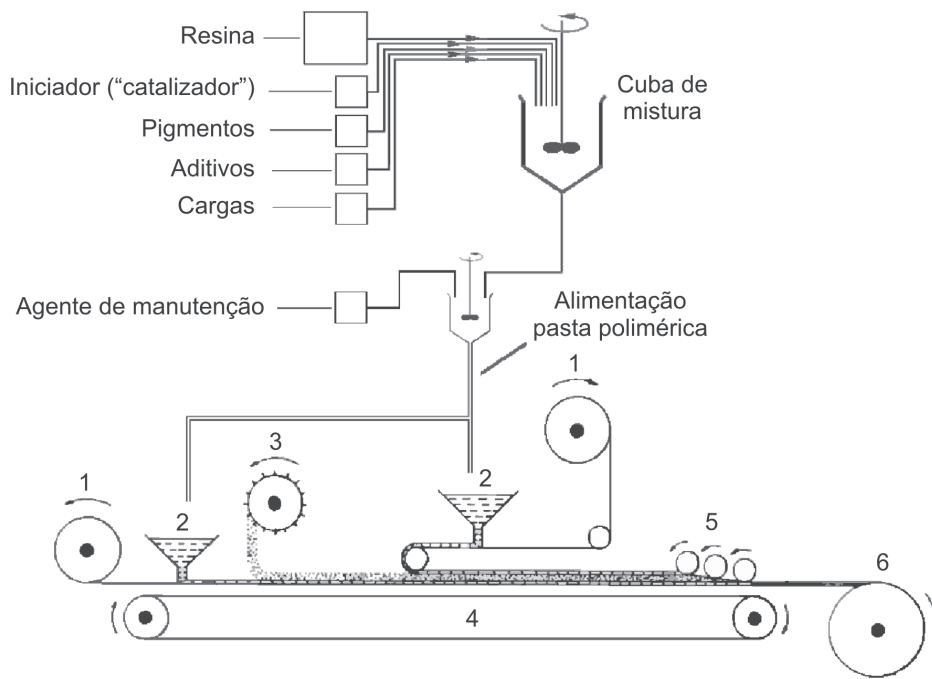


Figura 8.12 – Ilustração da fabricação de placas para SMC^{72,73}

Nessa figura, os números representam: (1) filme plástico para fechamento da placa e contenção do composto, (2) matriz polimérica, (3) picotador de fibra, (4) esteira, (5) roletes compactadores e (6) bobinas de SMC. A figura 8.13 ilustra a etapa correspondente à compactação para a formação da placa (*sheet*), representada pelo número 5 na figura 8.12. Observa-se que o elemento de reforço está envolvido por um filme plástico inferior e outro superior, que contém o composto polimérico. Ao passar pelos rolos de compactação, a fibra é impregnada pela matriz, formando a placa.

As bobinas são colocadas em embalagens hermeticamente fechadas para evitar a evaporação dos solventes contidos no composto polimérico e mantidas em câmara aquecida na temperatura de 30 a 35°C, de 1 a 7 dias, visando um aumento da viscosidade devido à ação do espessante. Após esse período na câmara de maturação, o SMC é armazenado em câmara fria na faixa de temperatura de 17 a 20°C, tendo uma durabilidade de 25 a 30 dias sem afetar a qualidade dos produtos moldados.

Nas etapas de maturação, armazenamento e manipulação para corte e fabricação, é recomendado especial cuidado com o filme plástico que envolve o composto polimérico, pois caso ocorra um rompimento desse filme o material ficará exposto à umidade e suscetível à perda de monômero vinílico, componente intrínseco da formulação do produto, o que poderia alterar o aspecto visual do composto para um material "seco" sólido, porém não curado. O filme deve permanecer íntegro até a separação da massa polimérica e, quando separado, não deve arrastar nenhum resíduo do composto.

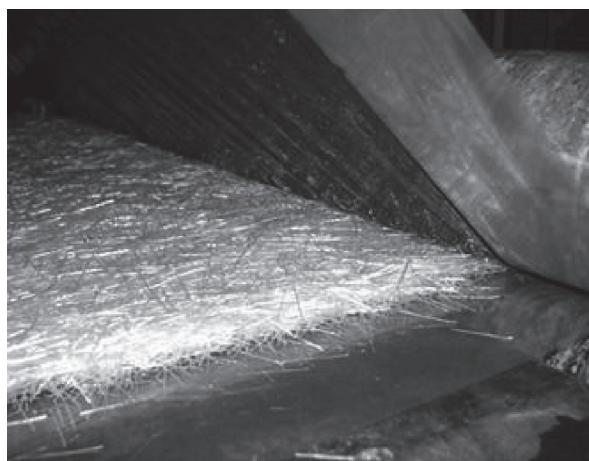


Figura 8.13 – Compactação para formação da placa (Cortesia: BMC do Brasil)

Produtos fabricados por SMC com fibra de vidro apresentam excelente estabilidade dimensional, elevadas propriedades mecânicas, boa resistência química e isolamento elétrico. Por causa da baixa contração apresentam ótimo acabamento para posterior pintura. O processo é utilizado principalmente para fabricação de componentes para indústria de caminhões e tratores e para produção de isolantes elétricos.

A alta produtividade na fabricação de peças pelo SMC é conseguida pela praticidade de preparação do material. Segmentos de placas são cortados de acordo com a dimensão e massa desejada para a peça final, geralmente de 40% a 80% da superfície do molde, e colocados na cavidade dos moldes para a prensagem, que pode variar de 1 a 4 minutos, de acordo com a formulação da massa polimérica. A cura do compósito, além da influência do iniciador de cura, sofre ação da temperatura do molde que tem relação direta com os tempos de fabricação.

Um mercado consumidor crescente de peças fabricadas pelo SMC é o de veículos de transporte de carga. Um exemplo é a grade frontal de caminhões da linha de semi-pesados e pesados, com uma área que pode ter até 2 m². São fabricados também para-choques, para-lamas, tetos, estribos e componentes do motor e inúmeros outros componentes.

A rota de fabricação da matéria-prima para o BMC é mais curta que a do SMC, porque o processo utiliza apenas o composto na forma de massa, a qual se apresenta numa constituição disforme, com semelhança e consistência de massa de vidraceiro e na forma de tarugos extrudados.

Para fabricação de peças pelo processo de compressão, uma determinada quantidade de massa, previamente estabelecida, é pesada e colocada no centro do molde, com o posterior fechamento da prensa. É comum também a moldagem de BMC pelos processos de transferência e injeção. Tempos de fabricação, pressão de fechamento do molde e temperatura de aquecimento do molde têm semelhanças às usadas no SMC. A indústria automobilística é um dos grandes consumidores de peças e componentes fabricados por BMC. Refletores de faróis, soquetes de velas de ignição (que eram feitos de baquelite), tampa do comando de válvulas e tampa frontal da correia dentada são alguns dos componentes cada vez mais comuns em novos projetos de automóveis, caminhões, ônibus e tratores. A figura 8.14 ilustra aspecto e forma do SMC e do BMC.

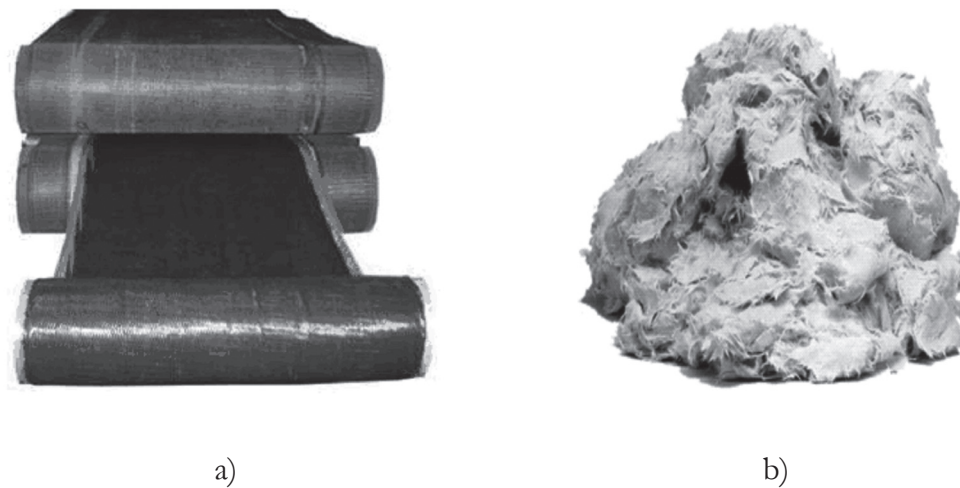


Figura 8.14 – Aspecto do produto final: a) SMC, b) BMC (Cortesia: BMC do Brasil)

O BMC, que se apresenta na forma de uma massa pastosa, pode, de acordo com o produto final, ser tanto prensado quanto injetado. Nesse último caso, diferente de uma injetora de termoplástico, o equipamento não possui o sistema de aquecimento do canhão e sim um sistema de resfriamento, para que não se inicie o processo de reticulação da matriz polimérica durante a dosagem e transferência do BMC para dentro do molde, o que poderia impedir um fluxo adequado do material durante a passagem para o ferramental, alterando suas características cinéticas e reológicas.

Para o sistema de dosagem e transferência do BMC para o molde, é possível se utilizar, respectivamente, rosca sem fim e sistema de pistão, sendo que a cura do material, dependendo do produto, da formulação e das condições de processo, ocorre com temperatura de moldagem entre 140° e 180° C.

8.5.5 – Moldagem por transferência de matriz polimérica

Esse processo é bastante conhecido pelas iniciais do nome em inglês RTM (*resin transfer molding*) que pode ser traduzido como processo de moldagem por transferência de resina. Tem como princípio básico a injeção sob pressão da resina pré-acelerada e do iniciador de cura numa cavidade onde o material de reforço está devidamente posicionado. O espaço para colocação do reforço é delimitado por um par de moldes tipo macho-fêmea.

No processo, o reforço seco é colocado em um dos moldes, geralmente o molde fêmea, com a inserção de núcleos inerciais quando necessário. Após o fechamento dos moldes com um sistema de garras, a matriz polimérica é injetada com pressão que pode chegar a 6 bar, o que representa uma carga de 6 toneladas/m². A pressão, o tempo de injeção e tempo de desmoldagem são dependentes da área da peça e da proporção de reforço na estrutura. Por exemplo, um para-lama de caminhão com uma superfície de 2 m², massa de 13,5 kg e proporção de vidro em volume de 19% exige pressão de injeção de 2 bar, tempo de injeção de dois minutos e tempo de desmoldagem de nove minutos, podendo se ter uma produção de quatro peças por hora⁷⁴.

O RTM é um processo recomendado para produção de componentes de pequeno e médio porte, que variam de 30 cm² até 4 m², e necessitam de acabamento liso em ambas as faces e não têm uma escala de produção que justifique a utilização dos processos de prensagem. O investimento é inferior ao SMC ou BMC, sendo possível a fabricação do ferramental utilizando metal ou compósitos, que depende do número de peças desejadas e da durabilidade esperada. Moldes de compósitos são indicados para produção de uma série piloto, após aprovação dos protótipos, ou para uma produção limitada que não justifica o investimento em moldes metálicos.

A figura 8.15⁷⁵ ilustra o processo RTM. Devido à elevada pressão a que os moldes são submetidos, esses são presos a estruturas que dão suporte e resistência ao conjunto para resistir às forças de injeção e aos repetidos ciclos de abertura e fechamento. Em todo o perímetro do molde são colocados elementos de vedação ou selantes que servem como material de contenção da matriz injetada, bem como pinos guias que têm a finalidade de alinhar o molde tanto na direção vertical quanto na direção lateral. Um investimento adicional que o processo exige é a compra de equipamentos para içamento e fechamento dos moldes devido ao alto peso.

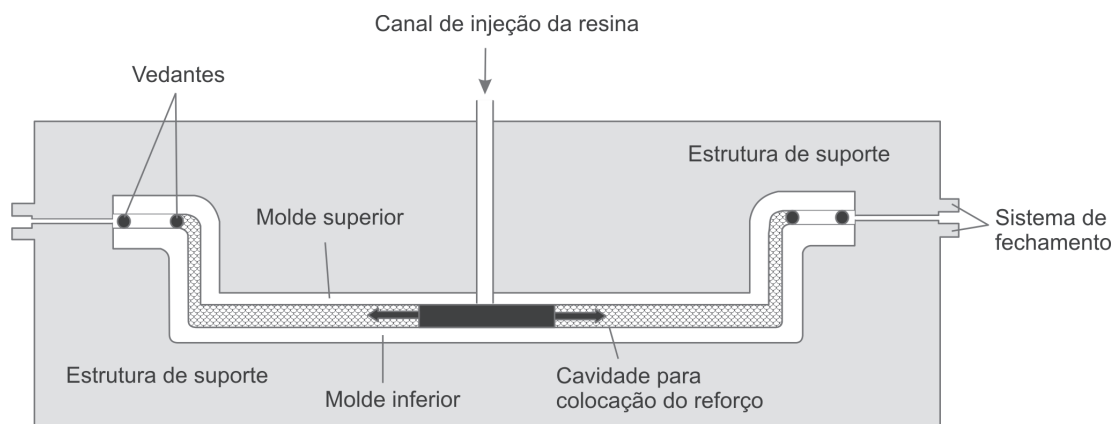


Figura 8.15 – Ilustração do processo RTM⁷⁵

Dependendo da exigência do produto a ser fabricado, podem ser inseridas, por exemplo, resistências elétricas nos moldes ou canais para circulação de óleo quente. Os moldes aquecidos trabalham com temperaturas acima de 70°C.

Em peças de elevado volume de produção, o elemento de reforço em vez de ser acomodado na superfície do molde pode já estar preformado. Apesar de o processo produtivo ter uma etapa a mais com a preformagem do reforço, há um ganho significativo de produtividade, bastando ao operador apenas a colocação da preforma sobre o molde o fechamento e a injeção.

Uma das vantagens que o processo oferece é na fabricação de peças de grande área superficial, como o painel dianteiro e traseiro de ônibus urbanos e de turismo, que seria inviável pelo processo SMC devido à grande capacidade de prensagem que seria exigida dos equipamentos. Como o processo utiliza pressões de 6 a 7 bar, é possível a fabricação de peças de grande espessura e/ou que tenham formas geométricas complexas, com acabamento liso em ambas as faces e boa precisão dimensional.

A matriz polimérica é injetada na cavidade entre os moldes por uma ou duas bombas volumétricas e deve ter propriedades adequadas ao processo, como baixa viscosidade, para permitir a perfeita impregnação do reforço e enchimento da cavidade entre os moldes. Como o processo é fechado, as condições de trabalho são melhoradas, pois não há contato direto dos laminadores com resina, estireno e acetona, o que proporciona também o controle da emissão de voláteis na fábrica. Isso torna o ambiente mais limpo e agradável ao trabalho.

8.5.6 – Moldagem por transferência de matriz polimérica e vácuo

Esse processo, conhecido como RTM *light*, surgiu da combinação da moldagem por transferência de matriz polimérica (RTM) com as vantagens da moldagem a vácuo e se tornou uma alternativa à fabricação de peças por molde aberto, que pode dobrar ou até triplicar a produção de peças se comparado ao processo de laminação manual.

O processo tem semelhança com o RTM, porém utiliza vácuo para fechamento dos moldes. A transferência da matriz para impregnação do reforço é feita empregando-se baixas pressões e à temperatura ambiente, o que requer moldes mais simples e baratos que os do processo RTM. Isso permite fabricar moldes de material compósito que aliam resistência e baixo peso e oferecem grande versatilidade ao projeto.

Como em todo processo de moldes fechados, há necessidade de se utilizar um molde e um contra-molde, ou molde macho e molde fêmea, o que garante acabamento em ambos os lados da peça. Estes são construídos com dois canais periféricos, sendo um mais externo para fechamento do molde e outro mais interno para sucção da matriz polimérica para impregnar o reforço. O processo é simples, não exige funcionários especializados e garante a redução de material volátil da matriz polimérica.

Após preparação, o reforço é posicionado em um dos moldes, geralmente o molde fêmea, e o fechamento é feito pelo vácuo do canal externo. Em seguida é acionado o vácuo do canal interno que tem duas funções: uma para retirada do ar aprisionado nas fibras e outra que auxilia na impregnação do reforço pela sucção da matriz que é injetada por um bico (ou mais de um) estrategicamente colocado(s) no molde macho. Quase sempre são utilizadas proteções adicionais ao sistema de sucção, tais como reservatórios (*traps*), para que o excedente de matriz (resina) que é extraída do laminado não alcance a bomba de vácuo. A figura 8.16⁷⁵ ilustra o processo de moldagem por transferência de matriz (resina), com alimentação periférica e sucção central, como o mostrado na figura 8.17. Há processos que utilizam alimentação central e sucção periférica.

Possivelmente uma desvantagem associada ao processo é a necessidade de se utilizar reforços de alta permeabilidade, como as mantas com núcleo de polietileno, por exemplo, uma vez que tecidos e mantas, devido à baixa permeabilidade, podem impedir o fluxo de resina e prejudicar a correta molhabilidade do reforço.

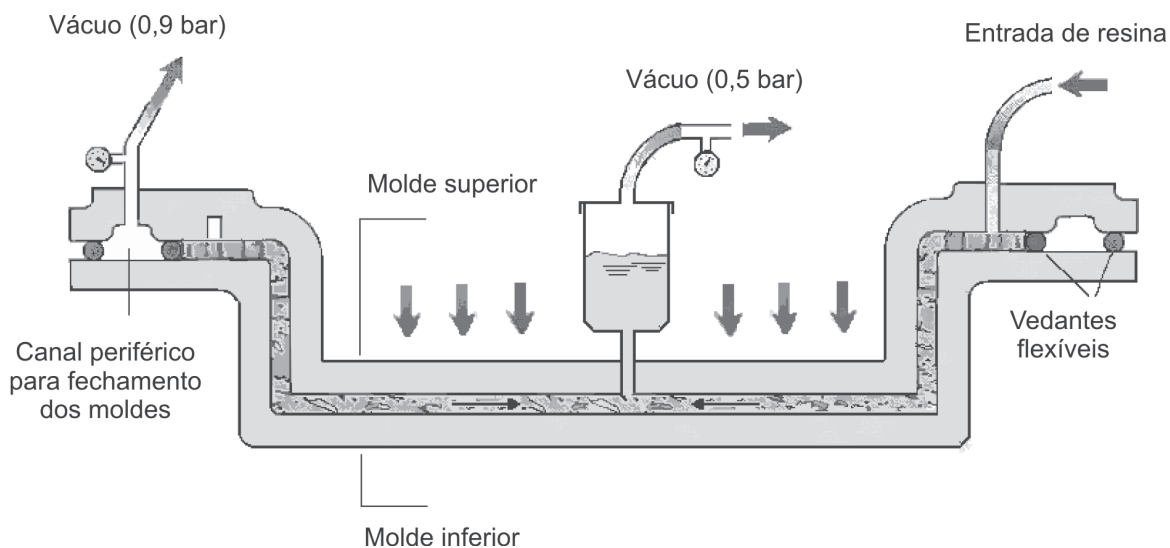


Figura 8.16 – Ilustração do processo de moldagem por transferência de matriz⁷⁵



Figura 8.17 – Evolução da impregnação no processo de moldagem por transferência de matriz: a) início da impregnação, b) finalização da impregnação (Cortesia: ABMACO)

Como se percebe na figura 8.17, há um avanço perimetral da matriz polimérica, seguida de um deslocamento diferenciado para o ponto de sucção. Assim, a localização correta do ponto de vácuo é uma decisão importante na construção do molde, pois isso garantirá que ocorra uma impregnação total do reforço antes que a matriz alcance o copinho (*trap*), indicando que o processo deve ser encerrado. Como na maioria das vezes a peça a ser fabricada não apresenta geometria regular (mesma distância entre dois pontos opostos em relação ao ponto de vácuo), a localização do ponto de sucção exige conhecimento e experiência do projetista do molde. Para uma peça retangular, por exemplo, seria correto estabelecer dois pontos de injeção caso a sucção fosse posicionada no centro do molde, como mostra a figura 8.18.

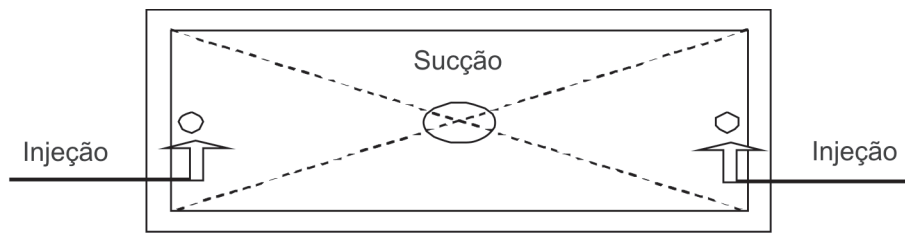


Figura 8.18 – Ilustração de um molde com dois pontos de injeção lateral e sucção central

O processo oferece vantagens que permitem reduzir custo, melhorar a qualidade do produto fabricado e aumentar a produtividade. É possível ainda diminuir o consumo de matérias-primas, garantir acabamento liso em ambos os lados da peça, eliminar a presença de poros, obter melhor regularidade de espessura e bom controle dimensional.

8.5.7 – Moldagem a vácuo

É um processo para fabricação de peças de pequeno e médio porte, com pouca espessura e em séries relativamente pequenas, que exigem acabamento liso em ambas as faces, característica que não pode ser conseguida pelos processos de molde aberto. Exige baixo investimento em equipamentos, sendo necessário apenas moldes, bomba de baixo vácuo e dispositivo para retenção do excesso de matriz (*trap*) para proteção da bomba de vácuo.

O processo é similar ao RTM *light*, porém sem a injeção da matriz por um equipamento dosador. Dependendo da qualidade do acabamento interno das peças, permite que o molde macho, em vez de rígido, possa ser fabricado de um material elastomérico que tenha certa flexibilidade e seja facilmente moldado no formato do molde fêmea para a conformação da peça.

Após a colocação do reforço na cavidade do molde fêmea, uma quantidade de matriz já “catalisada” que permita a impregnação total do reforço, é vazada no centro do molde. Imediatamente o molde superior é posicionado e acionado o vácuo pelo canal externo para fechamento dos moldes. Não se detectando nenhum vazamento, é acionado o vácuo do canal interior que fará a matriz migrar do centro para a periferia, impregnando o reforço de maneira uniforme e homogênea. Esse vácuo promove não só a sucção da matriz, como também permite a retirada de ar retido nas camadas do reforço, colaborando para a fabricação de uma peça com reduzido volume de poros (vazios). A matriz deve ter viscosidade abaixo de 400 MPa.s para fluir com facilidade e produzir uma perfeita impregnação do reforço. A figura 8.19⁷⁵ ilustra o processo.

Para maior produtividade, é recomendado que as mantas estejam devidamente cortadas e pesadas antes do início do trabalho. No caso de apenas um par de moldes e um funcionário, essa tarefa poderia ser feita durante a cura da matriz, que pode levar de 10 a 15 minutos.

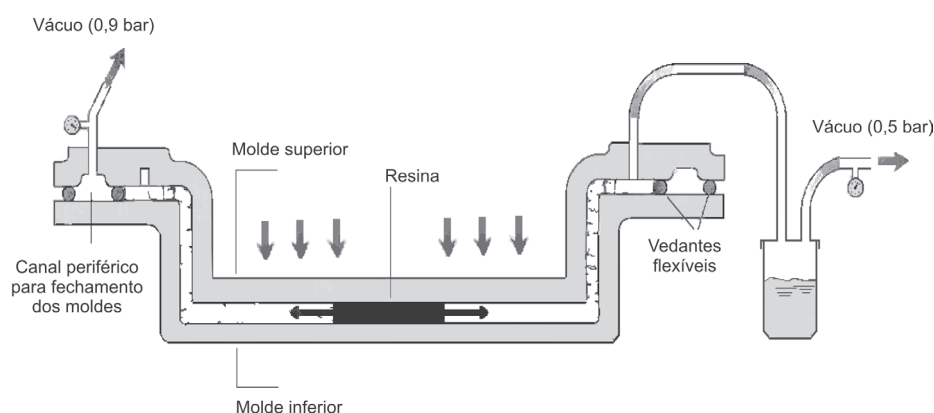


Figura 8.19 – Ilustração do processo de moldagem a vácuo⁷⁵

É possível também que no processo se utilize tecidos, ou ainda uma combinação de tecidos e mantas, que podem ser impregnados camada a camada e montados em uma sequência que atenda ao requisito estrutural da peça.

8.5.8 – Infusão

O processo de infusão a vácuo, conhecido como VIP – *vacuum infusion process*, é uma técnica que pode ser considerada como sendo de moldagem fechada, embora não tenha um par de moldes como nos processos vistos anteriormente. Isto porque utiliza apenas o molde que dará a forma geométrica à peça e um saco de vácuo.

O processo na sua concepção é simples e dispensa a necessidade de mão-de-obra especializada, necessitando de um arranjo cuidadoso na montagem do saco de vácuo. A figura 8.20 ilustra as quatro etapas básicas do processo.

Após a preparação do molde (limpeza, aplicação do *gel coat* e do desmoldante), núcleos, mantas e/ou tecidos são posicionados na quantidade necessária para obter a espessura final desejada para a estrutura, executando um trabalho que se costuma chamar de alfaiataria. Sobre o reforço é colocado um filme plástico que deve ser devidamente selado por um adesivo que envolve toda a parte periférica do molde, formando o que se denomina de saco de vácuo. Utilizando uma bomba de vácuo, o ar que eventualmente esteja aprisionado no reforço é retirado e ocorre simultaneamente uma compactação do reforço contra o molde. Finalmente, a impregnação da manta é feita pela matriz que é succionada pelo vácuo criado sob o filme.

O processo é indicado para fabricação de peças de grande porte, como peças de ônibus, partes de veículos ferroviários e rodoviários de transporte de carga, iates, veleiros e pás eólicas. Devido à preparação do molde, o processo é indicado para baixa escala de produção. Oferece peças com regularidade de espessura e melhor controle dimensional e substitui com vantagens o processo de laminação com molde aberto devido à dificuldade que esse oferece na laminação de grandes áreas.

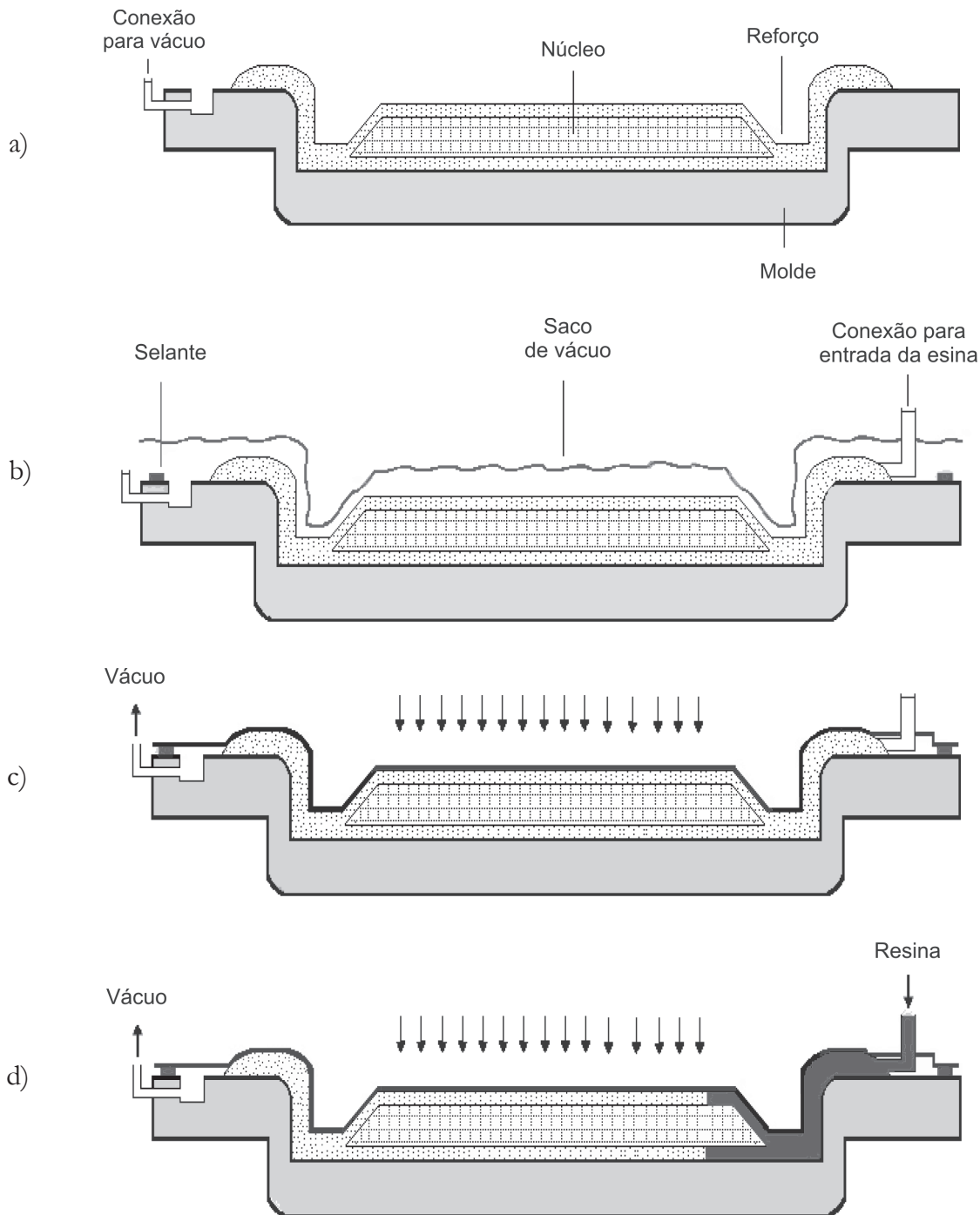


Figura 8.20 – Etapas do processo de infusão: a) posicionamento da fibra e núcleos inerciais, b) fechamento do saco de vácuo, c) vácuo, d) injeção da matriz polimérica

O projeto de injeção necessita de estudos preliminares para dimensionamento de pontos de vácuo e pontos de injeção no molde para que todo o reforço possa ser impregnado adequadamente. Entende-se que o tempo de infusão para fabricação de uma determinada estrutura pode ser reduzido se forem inseridos mais pontos de injeção no molde. Para simulação do processo, há softwares que analisam o percurso e a injeção da matriz utilizando vários canais de alimentação, conforme ilustração da figura 8.21⁷⁶.

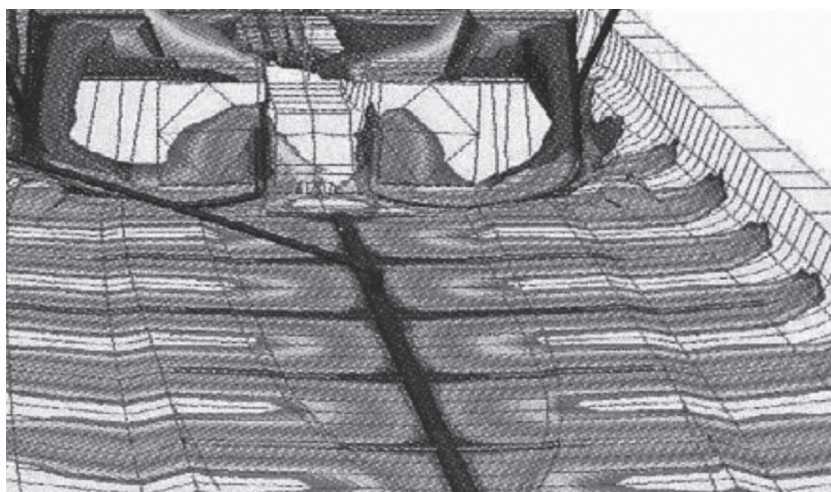


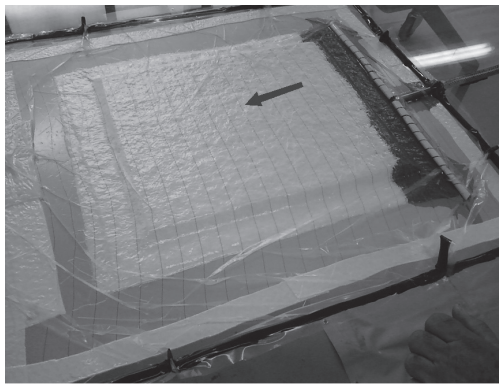
Figura 8.21 – Simulação do processo de infusão⁷⁶

No processo, o tempo (t) para saturar uma placa plana pode ser obtido pela Lei de Darcy, representada pela equação (8.1)⁷⁷. Essa equação leva em conta a permeabilidade (k) e a porosidade (φ) do reforço, a variação da pressão (Δp), a viscosidade da matriz (η) e a distância percorrida (l). As simulações podem otimizar o processo, reduzir o tempo de trabalho e o desperdício. A compactação do laminado sobre o molde é feita pela ação da pressão atmosférica, que corresponde à pressão de 1 bar ou 0,1 MPa.

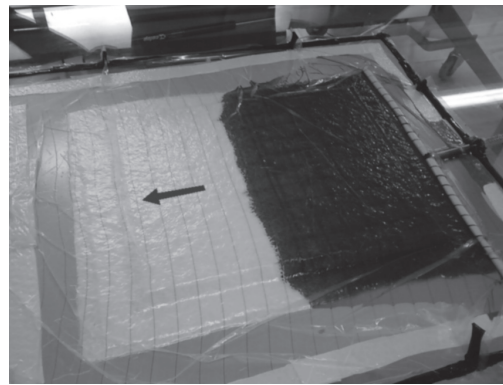
$$t = \frac{\eta \cdot \varphi l^2}{2k \cdot \Delta p} \quad (8.1)$$

Deve-se também selecionar um sistema polimérico livre de agente tixotrópico, que apresente um *gel time* compatível com a fluidez da resina e a distância a ser percorrida, que garanta a total impregnação do reforço e que produza um reduzido volume de vazios. Recomenda-se um controle do pico exotérmico, cuja temperatura pode comprometer o material do saco de vácuo. Para manter a matriz polimérica com boa fluidez e permitir o preenchimento do molde, sugere-se uma viscosidade de 150 a 200 mPa.s e uma vazão de 5 a 20 m³h⁻¹. O vácuo normalmente empregado é de 0,65 bar (650 mmHg)⁷⁸.

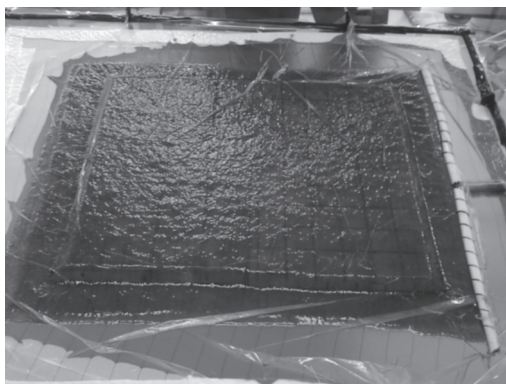
Nas figuras 8.22a e 8.22b é apresentada a evolução do processo de impregnação do reforço, sendo o sentido do fluxo indicado pela seta. Na figura 8.22c se observa o saco de vácuo envolvendo todo o elemento a ser fabricado e o processo concluído, com o reforço completamente impregnado pela matriz polimérica. Na figura 8.22d é colocada uma outra vista do dispositivo, onde se observa na parte de baixo da foto, na região clara, a linha de vácuo, e na parte alta da foto, a linha de entrada da matriz polimérica. No perímetro do molde, o elemento na cor preta é o vedante flexível.



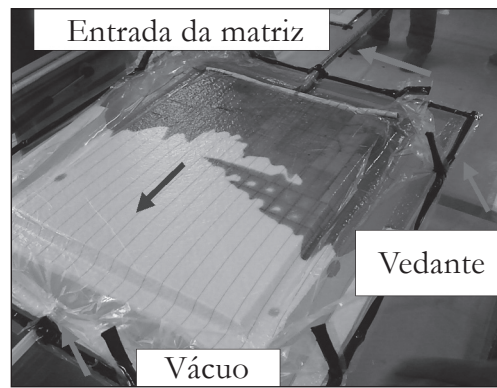
a)



b)



c)



d)

Figura 8.22 – Etapas do processo de infusão: a e b) evolução da impregnação do reforço, c) processo concluído, d) vista geral do dispositivo (Cortesia: ABCOL)

No exemplo da foto, observa-se apenas uma linha de vácuo e um canal de entrada da matriz, que estão em lados opostos, denominados de sequencial simples. Dependendo da extensão do laminado (área), há critérios bem estabelecidos do arranjo das linhas de injeção e vácuo. A figura 8.23 ilustra alguns desses arranjos para o processo de infusão. Nessa figura estão representados o sequencial simples, o sequencial duplo, o sequencial alterado, o composto, o central, o espinha de peixe.

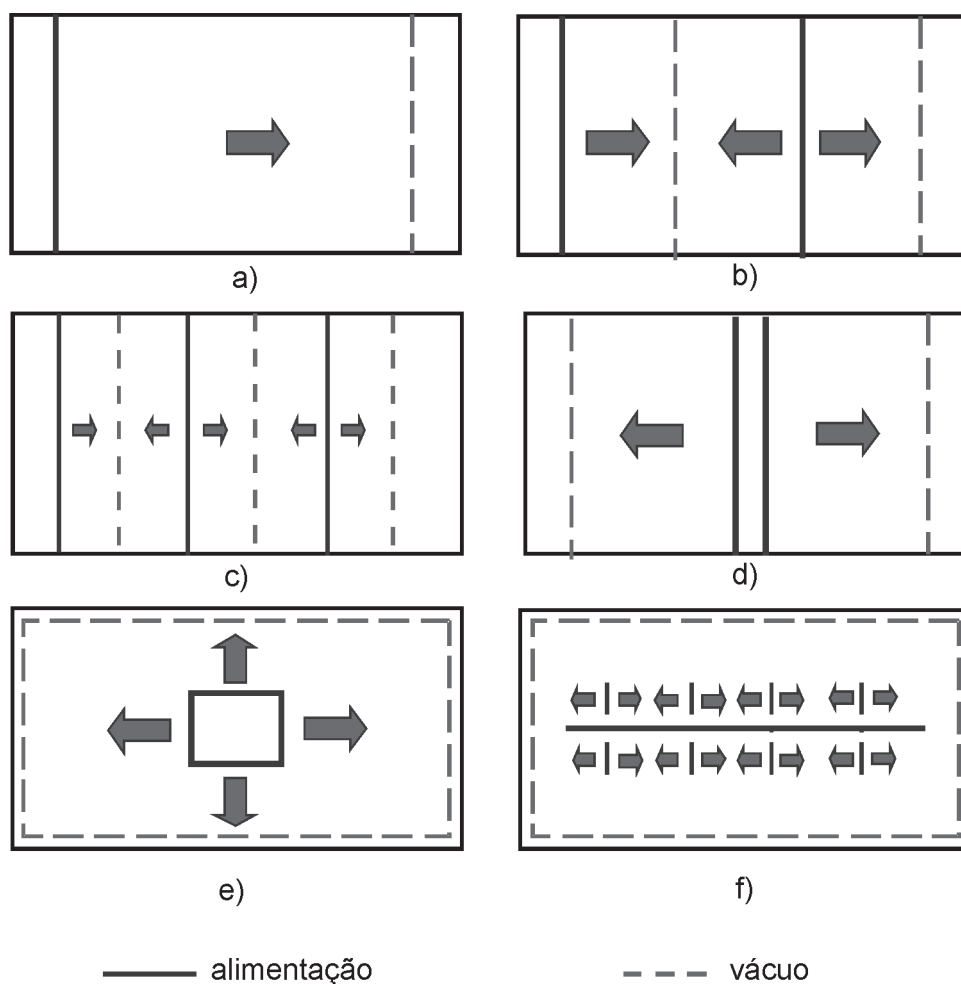


Figura 8.23 – Tipos de arranjo das linhas de alimentação da matriz e vácuo: a) sequencial simples, b) sequencial duplo, c) sequencial alternado, d) composto, e) central, f) espinha de peixe

Componentes fabricados por infusão têm boa qualidade, boas propriedades mecânicas e baixo volume de vazios. Possibilitam também economia de resina e reduzem quase que totalmente a emissão de produtos orgânicos voláteis no ambiente de trabalho. Entretanto, permitem acabamento em apenas uma das faces.

Os maiores mercados para o processo de infusão são os setores náutico e o de energia eólica, esse último com a fabricação de pás que têm, entre outras dimensões, comprimentos que podem alcançar mais de 50 metros. O processo alia alta qualidade, rapidez e repetibilidade, fatores que contribuem para substituir os processos de laminação por contato e laminação por projeção.

8.5.9 – Pultrusão

Novos e arrojados projetos arquitetônicos podem também se beneficiar das vantagens que os perfis de compósito oferecem, como baixo peso específico, elevada rigidez, resistência às intempéries, elevada vida útil e facilidade de montagem.

A tecnologia de pultrusão foi desenvolvida no início dos anos 1950, mas com quase nenhuma expansão até os anos 1980, provavelmente devido ao desconhecimento do potencial do produto. Basta citar que na segunda metade da década de 70 os perfis pultrudados correspondiam a apenas cerca de 8% do mercado de materiais resistentes à corrosão, saltando para 25% na década seguinte.

O processo consiste na impregnação de um conjunto de fios contínuos por uma matriz polimérica e um sistema de roletes que guiam os fios de modo a dar a esse conjunto uma preforma do perfil a ser fabricado. A consolidação da matriz polimérica e a formação final da geometria do perfil se dão num molde aquecido que tem uma ferramenta com a exata geometria desejada para o produto. Não raro, a cura da matriz polimérica pode ser feita utilizando três zonas de temperatura, que pode iniciar com o primeiro aquecimento em torno de 70°C e ter uma terceira zona de aquecimento de 140°C, como representado na figura 8.24. A velocidade de fabricação depende do grau de tecnologia dos equipamentos da linha e do tipo de perfil a ser fabricado, mas uma velocidade de 0,5 a 1,0 metro por minuto é razoável para uma planta de pultrusão. O tracionador (puxador) e o sistema de corte podem ser mecânicos, hidráulicos ou pneumáticos e com sistemas de regulação e controle automatizados.

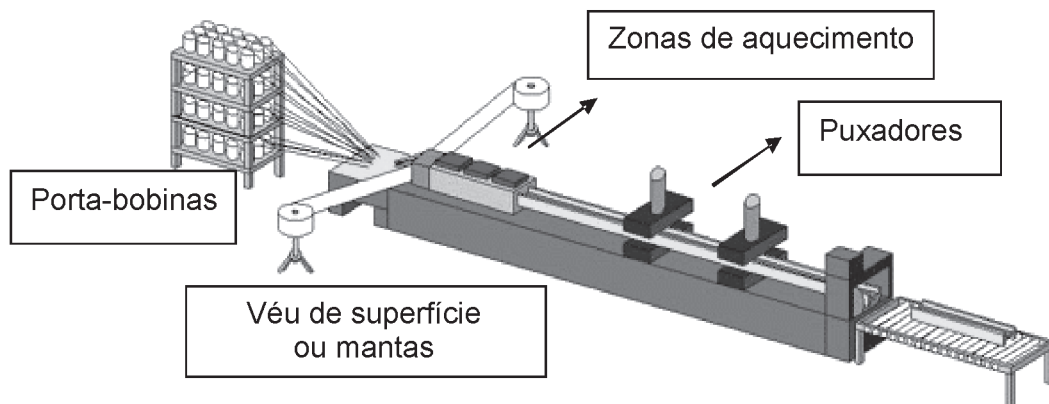


Figura 8.24 – Desenho esquemático de uma máquina de pultrusão

Os perfis são continuamente puxados por um tracionador, e daí o nome pultrusão que teria alguma relação com o verbo puxar em inglês, e cortados em barras de acordo com a dimensão desejada. O processo permite a fabricação de peças inteiriças o que resulta em um melhor aproveitamento do material. A operação contínua assegura uniformidade de características ao longo da extensão do produto, como a relação entre reforço e matriz polimérica, importante para garantir propriedades mecânicas homogêneas.

Perfis e barras sólidas de materiais compósitos oferecem uma solução prática e versátil para aplicações que têm a presença de atmosferas corrosivas e contato com produtos químicos, que de outra forma exigiriam materiais especiais, como aços inoxidáveis. Indústrias petroquímicas, indústrias químicas, plataformas de petróleo, navios petroleiros e de transporte de produtos químicos e abatedouros estão entre os usuários que necessitam de grades de piso, guarda-corpo e escadas fabricadas de compósito. Caminhões baús frigoríficos também oferecem um grande mercado para utilização dos perfis pultrudados em substituição aos perfis de alumínio e estruturas de madeira.

A utilização de véu de superfície em perfis pultrudados para ambientes que necessitam de resistência química é feita da mesma forma que a utilizada normalmente no revestimento de tanques e tubos. Assim, uma camada de véu forma uma barreira química por meio de uma camada superficial mais rica em resina que age como um *liner*, além de melhorar o acabamento superficial do produto. A combinação de véu e filamentos contínuos pode ser ilustrada na figura 8.24 pelos rolos laterais após a impregnação dos fios contínuos.

De modo geral, os perfis pultrudados proporcionam elevadas propriedades apenas na direção longitudinal, consequência de se utilizar apenas fio contínuo nessa direção, o que exige, em condições de esforços transversais à direção longitudinal e flexão, perfis fabricados com mantas ou tecidos. Essa talvez seja uma das limitações encontradas para sua ampla utilização, necessitando, desse modo, de especificação correta para a aplicação desejada. Portanto, a combinação dos reforços utilizados na fabricação de um determinado tipo de perfil está associada à resistência esperada nas direções longitudinal e transversal.

A especificação da matriz polimérica está intimamente ligada à utilização que será dada ao perfil, sendo normalmente empregada a matriz com resina poliéster isoftálica ou com resina viniléster, considerando aplicações que envolvam exposição a ambiente ácidos e alcalinos. Matrizes poliméricas com resinas epóxi atendem a requisitos para aplicações que exigem rigidez do produto em temperaturas elevadas.

A baixa densidade, cerca de 3 a 4 vezes menor que a do aço, permite que estruturas sejam fabricadas dispensando equipamentos especiais para manuseio e montagem. O corte e furação podem ser feitos utilizando-se ferramentas convencionais, sendo indicado o uso de serra diamantada apenas para produção seriada. A figura 8.25 ilustra barras e perfis fabricados pelo processo de pultrusão.

Como se observa, os perfis podem ser produzidos coloridos, o que dispensa a etapa de pintura, muitas vezes até para atender à orientação de normas. Para isso, basta apenas a pigmentação da matriz polimérica na cor especificada pelo comprador, conforme ilustra a figura 8.26. Há também uma grande variedade de geometrias que podem ser obtidas, cabendo apenas alteração dos moldes.

8.5.10 – Centrifugação

O processo utiliza um conceito simples da física, em que a massa de um objeto em rotação é deslocada do centro para a periferia devido ao efeito da força centrífuga. No caso do processo de centrifugação, as matérias-primas, ao serem lançadas contra a parede interna de um molde giratório, sofrem um processo de compactação pelo efeito da força centrífuga e assumem a geometria do circular do molde, proporcionando ao mesmo tempo uma ótima regularidade de espessura.

Utilizando esse princípio, pesquisadores da empresa sueca Höganäs e da empresa suíça Basler Stückerfärberei, reuniram o conhecimento de cada uma em relação ao processo, e formaram a empresa Hobas. Por isso, o processo de centrifugação também é conhecido em muitos países como o processo Hobas, que é uma associação das letras iniciais de ambas as empresas.

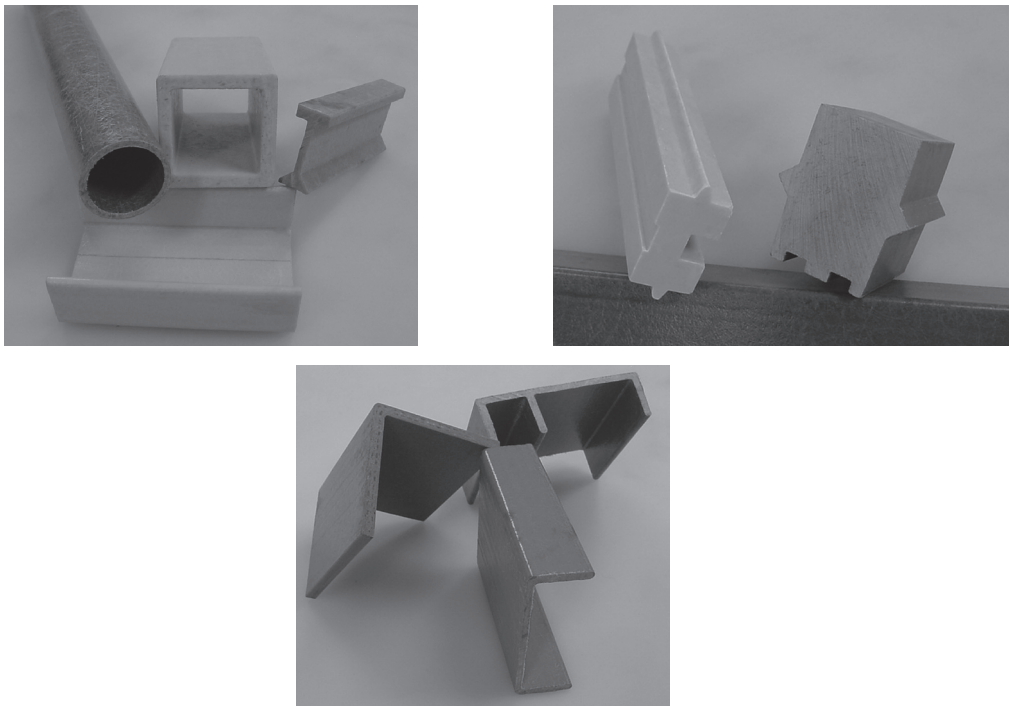


Figura 8.25 – Barras sólidas e perfis fabricados por pultrusão (Cortesia: RGC Moldados)

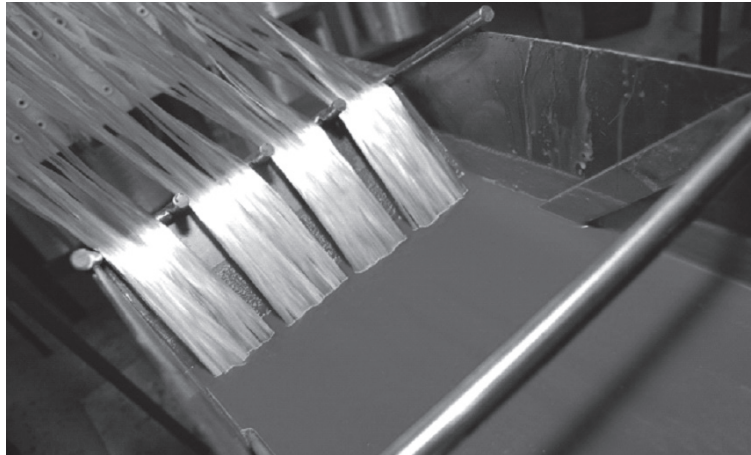


Figura. 8.26 – Pigmentação da matriz polimérica (Cortesia: RGC Moldados)

A alimentação das matérias-primas é feita por um engenhoso dispositivo, que consiste de uma peça tubular tendo no seu interior os canais de alimentação da matriz polimérica, das cargas e areia e das fibras de vidro. Esses componentes se misturam na extremidade do sistema de alimentação, que percorre todo o comprimento do molde depositando as matérias-primas. Desse modo, o sistema de alimentação é inserido em toda extensão do molde utilizando um carro que tem um deslocamento ao longo do eixo do tubo, no qual o sistema de alimentação está fixado. A figura 8.27 ilustra o esquema de uma máquina do processo de centrifugação e a figura 8.28 mostra o detalhe da alimentação das matérias-primas.

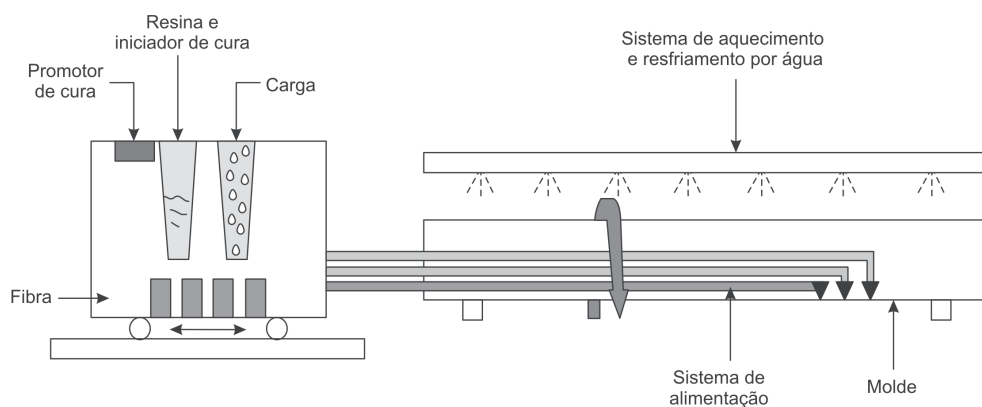


Figura 8.27 – Esquema do sistema de alimentação do processo de centrifugação



Figura. 8.28 – Sistema de alimentação das matérias-primas (Cortesia: Amitech)

No início do processo, o molde gira numa rotação lenta para permitir a correta colocação das matérias-primas sobre sua superfície interna. Após concluída essa etapa, a rotação do molde é aumentada para, devido ao efeito da força centrífuga, o material ser compactado contra a superfície do molde. A superfície interna do tubo fabricado possui uma camada de resina sem reforço que, além de garantir uniformidade dimensional, apresenta uma elevada resistência química a resíduos alcalinos ou ácidos.

A cura da matriz polimérica é quase instantânea e utiliza o calor gerado por água quente pulverizada na superfície externa do molde. Ao final do processo, o resfriamento é feito pelo mesmo modo, porém utilizando água fria.

O processo de centrifugação oferece tubos cujos diâmetros variam de 200 a 3600 mm e comprimento de 6 metros e são utilizados para sistema de baixa e média pressão interna⁷⁸, que podem chegar a 20 bar, com elevada resistência às cargas de compressão (esmagamento). Normalmente são destinados à condução e distribuição de água, sistema de coleta de esgotos sanitários, galerias de águas pluviais, linhas adutoras de usinas hidroelétricas e emissários submarinos.

O baixo peso específico dos tubos oferece maior flexibilidade nas instalações, podendo ser

movimentados com auxílio de poucos homens e simples dispositivos de içamento. Esses atributos garantem uma vantagem competitiva em relação aos tubos de metal, pois em muitos casos os locais de instalação são inóspitos e com dificuldade de adequados meios de transporte.

8.5.11 – Laminação contínua

8.5.11.1 – Introdução

A demanda por placas planas sempre foi uma necessidade em todos os ramos de atividade e sempre recebeu das empresas investimento no processo produtivo. Os painéis de alumínio e fibrocimento apresentavam-se como os produtos principais que atendiam ao mercado.

Os painéis corrugados de compósito polimérico apresentam vantagens sobre os dois principais concorrentes por aliar resistência mecânica e química ao baixo peso específico. Enquanto os fabricados de alumínio e fibrocimento têm massa em quilograma por unidade de área em metro quadrado de respectivamente de 2,7 e 3,0, os de fibra de vidro/poliéster apresentam um valor de 1,2, considerando espessura de 1 milímetro. Essa diferença de massa pode agregar benefícios importantes como os representados por painéis ondulados (telhas), por exigir uma estrutura com menor rigidez para a sustentação da cobertura.

Inicialmente eram fabricados pelo processo manual. Como o aumento da demanda, houve necessidade de um processo que pudesse oferecer um preço competitivo ao produto e também acelerar a produção. Para atender a esses requisitos, foi desenvolvido o processo de laminação contínua, que como o próprio nome diz, trata-se de um processo que produz o material em larga escala, não só na forma plana, mas também com uma grande variedade de geometrias, podendo inclusive oferecer o produto opaco e colorido ou translúcido, que é um outro grande benefício do o produto.

Os painéis fabricados por esse processo podem ser expostos à luz do sol e às intempéries e por isso são utilizados em uma grande variedade de produtos, como placas de sinalização viária, painéis para estrutura sanduíche, laminados para revestimento, placas para fabricação de materiais elétricos isolantes e telhas. Especialmente em relação às telhas, existe hoje um selo de qualidade da ABMACO – Associação Brasileira de Materiais Compósitos, que é uma certificação dadas às empresas que obedecem a rigorosas exigências de controle de processo e garantia da qualidade, cumprindo exigências mínimas para a colocação do produto no mercado, tais como proporção das matérias-primas e espessura.

8.5.11.2 – Sistema de fabricação

Consiste de um equipamento que pode alcançar 50 metros de comprimento, formado basicamente um dispositivo de alimentação da matriz polimérica, corte das fibras, impregnação, calandra, estufa de cura, tracionador e corte. Um sistema de esteiras serve de apoio para um filme de poliéster que transporta o material durante todo o processo.

Inicialmente componentes da matriz polimérica (resina-iniciador de cura-pigmentos-cargas) são despejados sobre um filme de poliéster na mesa de alimentação, onde há uma régua calibradora que controla a quantidade de material polimérico que receberá as fibras picadas. Deve haver um

sistema que coordena as duas ações de modo a garantir os teores de fibra e matriz especificadas para o produto final. Um conjunto de pentes compactadores assegura a impregnação da fibra pela matriz, proporcionando uma mistura homogênea entre os dois materiais. A placa formada é compactada em uma calandra que controla a espessura em décimos de milímetros, sendo revestida pelo filme de poliéster superior, que confere ao conjunto a forma de um sanduíche.

Após essas etapas, a placa entra na estufa onde estão posicionados os moldes e contramoldes para conformação do perfil desejado, ao mesmo tempo em que o calor oferece energia para a cura da matriz polimérica. A placa já solidificada e moldada na forma de um perfil é tracionada para o sistema de cortes laterais e transversal. Na representação da figura 8.29, o processo é dividido em nove etapas, sendo os números indicativos das etapas descritas.

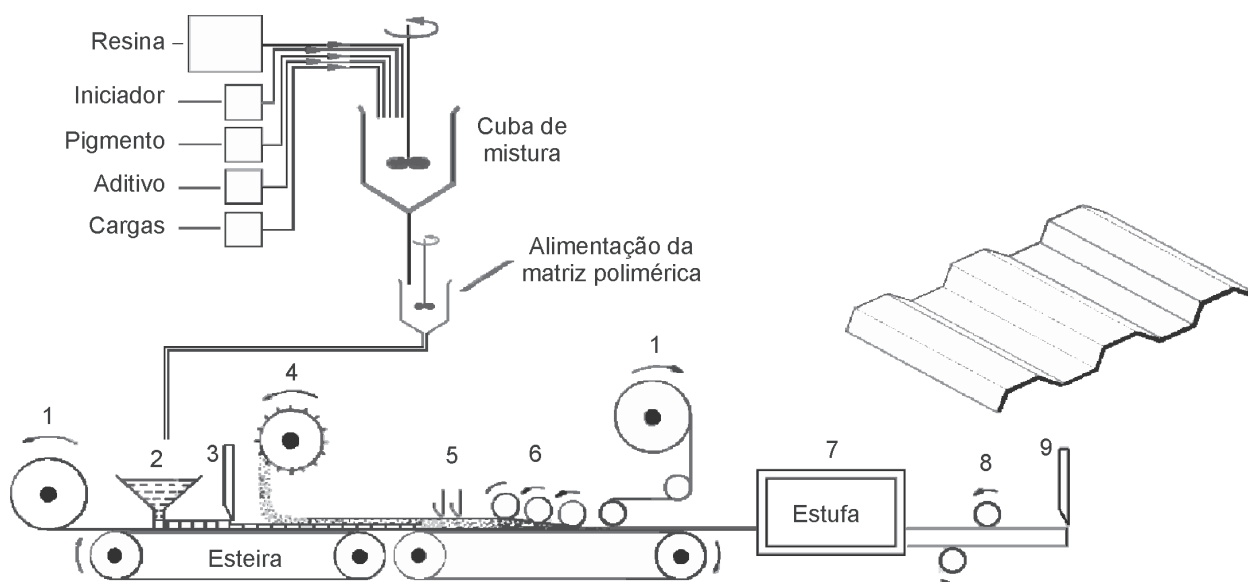


Figura 8.29 – Esquema de uma máquina de laminação contínua

São quatro os principais parâmetros controlados no processo:

- Velocidade da máquina que é dada pela esteira;
- Volume de resina;
- Teor de fibra;
- Controle da calandra de regulagem da espessura.

O controle da espessura da placa deve ser feito com precisão, uma vez que placas fora da dimensão estabelecida entre o molde e contramolde poderão gerar atrasos significativos no processo. Uma placa em que a espessura esteja maior provocará um empolamento na entrada do sistema de conformação, também coloquialmente chamado de espastelamento, obrigando a uma parada do processo e ajuste dos parâmetros de processo. Caso a placa apresente uma espessura menor, o perfil não será conformado.