

MATERIAIS COMPÓSITOS

Designa-se por material “composto”, ou “compósito” – termo de uso consagrado – o resultado da combinação de dois ou mais materiais distintos em suas propriedades físicas. Trata-se, portanto, de uma classe de um meio heterogêneo cujo objetivo é a obtenção de um material que, combinando as características de seus componentes de maneira adequada, apresente um desempenho estrutural melhor do que estes, sob condições específicas de utilização. A adoção e a importância da combinação de materiais está reportada na História da humanidade^[1,2], como a fabricação de tijolos no Egito Antigo e de espadas medievais. A estrutura a ser obtida deverá constituir-se de um novo material com características homogêneas, ao ser analisado macroscopicamente. A composição de materiais permite vantagens, especialmente no ponto de vista do comportamento mecânico, como, por exemplo, o aumento da rigidez e da resistência mecânica, melhores respostas à fadiga sob cargas cíclicas, diminuição de peso, mantendo-se o nível de resistência, etc. O objetivo é obter-se um material final com propriedades mecânicas superiores a de seus constituintes, para determinadas solicitações, consideradas no projeto.

Como opções aos materiais de engenharia convencionais, diversos tipos de materiais compósitos são hoje disponíveis, de acordo com seus processos de fabricação. Um grande avanço pode ser observado com o desenvolvimento da indústria aeroespacial desde meados do século passado. Nesta aplicação, uma das maiores vantagens se trata da capacidade de obtenção de elevada resistência mecânica com baixo peso final da estrutura global. Com o desenvolvimento de novos processos de fabricação, variados tipos de componentes estruturais tem sido obtidos: desde os mais comuns laminados planos, como coberturas moldadas em estruturas, a tubos de materiais compósitos, com larga aplicação nas indústrias petro-química, aeroespacial e de defesa.

A grande versatilidade de fabricação e manipulação e a capacidade mecânica em aplicações estruturais levam os compósitos às mais diferentes aplicações de engenharia, incluindo-se equipamentos esportivos, como tacos de golfe e raquetes de tênis mais modernas. Um outro setor, precursor na demanda

de tecnologia de última geração, a indústria bélica, assim como a aeroespacial, é grande investidor na aplicabilidade de materiais compósitos. Estes estão presentes na produção de armamentos e em proteção balística, cujas aplicações vão desde materiais para capacetes de soldados a coletes balísticos e blindagens para carros de combate e outros veículos militares, como lanchas e helicópteros. Os setores petrolíferos ou químicos, que notadamente requerem transporte de fluidos a altas pressões e temperaturas, também são potenciais usuários de estruturas tubulares cilíndricas, em particular. Outra importante recorrência a tubos é sua aplicação em projetos de armamentos. Desde as armas leves às pesadas, variando calibre e comprimento de seus tubos, sempre haverá demanda por menor peso, mantendo-se a capacidade primária de resistência. O cenário militar moderno requer o emprego de equipamentos portáteis e ágeis, desde pistolas e fuzis, a canhões de carros de combate e morteiros de grande calibre para Infantaria. A produção de mísseis e foguetes também requer o emprego de componentes cilíndricos, tanto na fuselagem externa quanto na produção do invólucro de seus motores. Deste modo, a adoção de materiais compósitos, para fabricação de tubos cilíndricos, é bastante promissora e, de fato, vem ocorrendo em escala crescente nas últimas décadas.

2.1

Classificação de Materiais Compósitos

De acordo com o tipo dos materiais constituintes e dos processos de fabricação, há diferentes classificações de materiais compósitos, associadas às suas características, comportamentos e vantagens específicas. Uma primeira divisão^[1] pode ser dada como:

- Compósitos Fibrosos
- Compósitos Laminados
- Compósitos Particulados

Os compósitos fibrosos constituem-se pela união de fibras longas, em meio de uma matriz, atuante como material de reforço. Inicialmente, a resistência de uma fibra em particular, à sua tração unidirecional, já é observada bem maior que a de sua matéria-prima bruta. Diversos fabricantes apresentam opções comerciais

de fibras, variando de média a altas resistências, e, em geral, com baixas densidades. A escolha para um projeto, salvo restrições econômicas, dependerá basicamente dos valores de razão entre a rigidez à tração e a densidade, quando o peso final também for crítico ao Projeto. Uma variante aos compósitos de fibras longas são conhecidos como “*Whiskers*”, os quais apresentam comprimentos bem menores, próximos aos valores diametrais, que são mantidos similares. Na constituição do material compósito, um material constituinte, matriz do compósito, é utilizado para a união das fibras ou *whiskers*, permitindo a transferência de carregamentos, apresentando, ainda, a capacidade de proteção e suporte das fibras. O arranjo de fibras pode ser unidirecional ou em duas ou mais direções. Um exemplo deste arranjo de fibras cilíndricas, unidirecionais, mantidas em posição por uma matriz sólida, é apresentado na Figura (2.1):

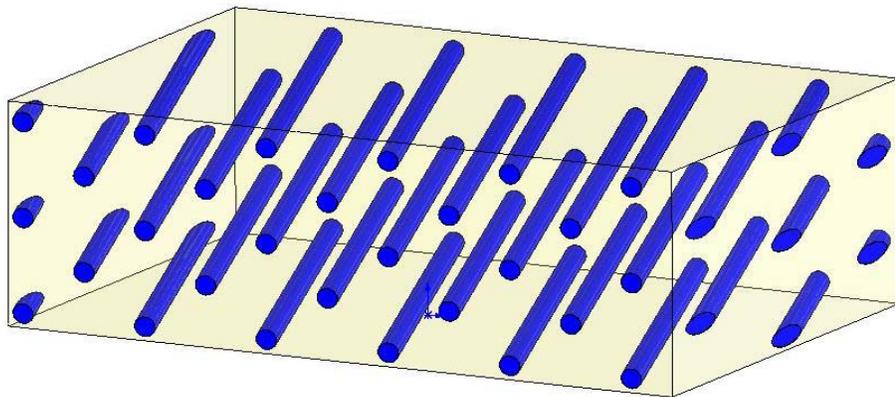


Figura 2.1: Exemplo de Arranjo de Fibras em Matriz para Compósito Fibroso

A segunda classe de compósitos apresenta-se como a laminação de diferentes camadas, de materiais distintos, combinando suas características mecânicas. Há diversos exemplos desta classe como laminados bimateriais, ou estruturas “sanduíche”, em que um núcleo mais espesso de material macio é coberto com chapas de maiores resistências mecânicas. Estruturas aeronáuticas normalmente adicionam chapas metálicas a núcleos de espumas sólidas. A resistência à corrosão também é uma característica importante no projeto e escolha destes materiais.

Uma importante aplicação consiste em utilizar a combinação dos materiais laminados e fibrosos, resultando nos compósitos laminados reforçados por fibras. Neste caso, o material é formado por camadas constituídas por fibras longas alinhadas em certas direções, com a finalidade de priorizar resistência mecânica. Um número ilimitado de camadas pode ser definido em variadas direções, empregando-se diferentes materiais. Este arranjo permite ao engenheiro várias soluções para o projeto de uma estrutura compósita, de forma a atender solicitações externas, de acordo com especificações definidas.

A classe dos compósitos particulados resulta da imersão de partículas de um ou mais materiais em uma matriz de composição. Um grande número de arranjos com partículas e matrizes, sejam metálicas ou não metálicas, é relatado na Literatura^[1]. Alguns exemplos desta classe são citados como o concreto, formado por partículas de areia e rocha em matriz de cimento, e os propelentes sólidos usados em mísseis e foguetes.

2.2

Compósitos Fibrosos

A classe de materiais fibrosos, especialmente a dos laminados por camadas, é capaz de permitir um projeto bastante específico. Com a definição de um número de camadas e dos ângulos de bobinamento, que definem as direções de alinhamento das fibras nos componentes, é possível maximizar as propriedades mecânicas de uma estrutura, para carregamentos conhecidos, *a priori*. A versatilidade do projeto mecânico com o emprego destes materiais traduz-se em uma grande qualidade para esta escolha, fora as já mencionadas vantagens obtidas com o emprego de materiais compósitos.

O desenvolvimento dos materiais compósitos fibrosos, além de coincidir com o advento da indústria aeroespacial, no século passado, se mostrou vinculado à capacidade das empresas deste ramo de atividade em obter fibras especiais, com altas resistências mecânicas e baixas densidades. Fibras referenciadas como “avançadas”^[5], têm sido testadas e fabricadas mediante diferentes e complexos métodos. Seus constituintes também são variados, permitindo desde os diferentes tipos de fibras de vidro, a opções como boro, grafite, alumina, carbono, aramida, e outras. As fibras, fabricadas com pequenos valores diametrais de suas seções

retas, são compostas em maior número, embebidas em material polimérico, formando uma camada a ser trabalhada posteriormente. A classificação das fibras para seleção é feita mediante valores específicos de rigidez e de resistência, para seus respectivos valores de massa específica.

Também, os materiais empregados como matrizes são selecionados segundo critérios de suas propriedades mecânicas. Usualmente, devido aos processos térmicos utilizados na fabricação, adotam-se matrizes poliméricas termoplásticas. Estas apresentam baixo peso, são adequadas termicamente, e são obtidas a preços competitivos. Metais e cerâmicos são outras possíveis escolhas na seleção das matrizes.

2.3

Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos Laminados – Análise Macromecânica

2.3.1

Modelos de Material

O material compósito formado por lâminas fibrosas é, do ponto de vista microscópico, um material heterogêneo. Porém, considerando-se dimensões do material na ordem das dimensões transversais das fibras, na esfera macroscópica o comportamento da estrutura sujeita a carregamentos se dá como um material homogêneo. Por esta razão, considera-se o comportamento “médio” do conjunto fibras-matriz, a ser medido.

A relação constitutiva para materiais compósitos é avaliada de modo mediano para a estrutura compósita, em uma análise linear elástica, pela Lei Generalizada de Hooke^[5]. Utilizando-se notação indicial reduzida, esta é representada por:

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j \quad (i,j = 1, \dots, 6) \quad (2.1)$$

As componentes C_{ij} do tensor constitutivo possui 21 constantes elásticas distintas, tratando-se de um tensor simétrico, devido à simetria dos tensores de tensão e de deformação. Desta forma,

$$[C]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

e a relação inversa da Lei de Hooke fornece:

$$\varepsilon_i = S_{ij} \cdot \sigma_{ij} \quad (2.3)$$

Os termos S_{ij} são os coeficientes de complacência, também representados matricialmente por $[S]_{6 \times 6}$, obtida da inversão de $[C]_{6 \times 6}$ e representada em (2.2). As 21 constantes independentes, na relação constitutiva mais geral, correspondem ao material anisotrópico. Um material pode, ainda, apresentar simetria em seu comportamento mecânico em relação a planos que passem pelo corpo considerado. Nestes casos a relação constitutiva apresenta simplificações no número de constantes independentes a definir a matriz $[C]$.

Considera-se um componente no espaço que, inicialmente, possua simetria nas respostas de deformações e de tensões em relação a um plano definido pelos eixos 1 e 2, tal como apresentado pela Figura (2.2). Definindo-se um sistema de coordenadas cartesianas por meio destes eixos e um adicional, “3”, ortogonal aos demais, o número de constantes necessárias na definição da relação constitutiva é reduzido, sendo o comportamento do material considerado como monoclinico. A matriz $[C]$ resultante, neste caso, para o material monoclinico, é:

$$[C]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

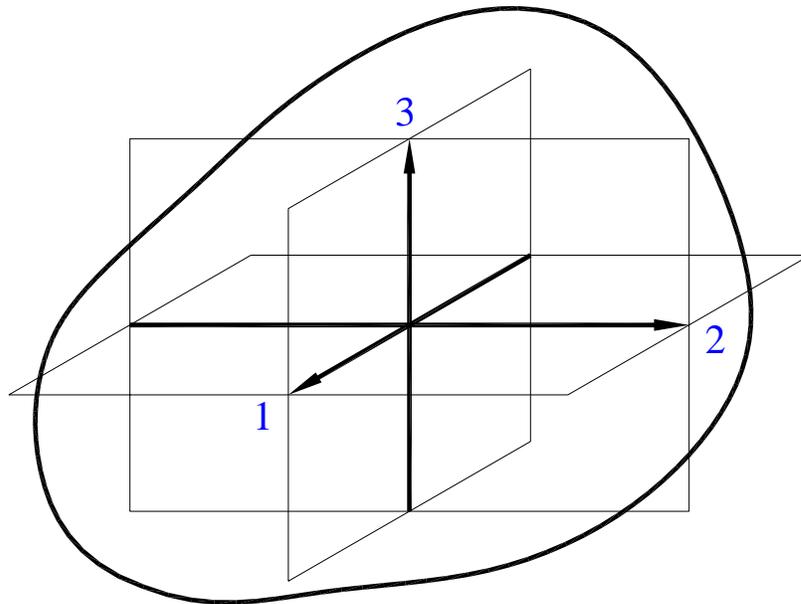


Figura 2.2: Definição de Planos de Simetria para o Comportamento Mecânico de um Corpo no Espaço

No caso do material apresentar simetria em relação a dois planos, 1-2 e 2-3, seu comportamento é dado por um modelo ortotrópico. Há, neste caso, novas simplificações na matriz constitutiva indicada por (2.4). Devido às relações de simetria, segundo os novos planos, a matriz $[C]$ resulta em nove constantes independentes, na forma a seguir:

$$[C]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Em um terceiro modelo, representa-se o material com isotropia de propriedades em um dos planos definidos e mencionados anteriormente. Neste caso, têm-se o material transversalmente isotrópico, e a matriz $[C]$ torna-se:

$$[C]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(C_{22} - C_{23})}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Na equação (2.6), o número de constantes elásticas independentes se reduz a apenas cinco. Na representação das relações constitutivas de materiais compósitos fibrosos laminados, os modelos de material acima descritos possuem larga aplicação prática. Por fim, a matriz da equação (2.6) é ainda simplificada, se adotada para materiais isotrópicos. Neste caso, com as propriedades mecânicas independentes das direções espaciais, como na Lei de Hooke, dependem apenas de duas constantes independentes.

2.3.2

Constantes de Engenharia

As relações constitutivas estabelecem a proporcionalidade, no caso de comportamento linear, entre componentes de tensões e de deformações. Compósitos fibrosos simples possuem fibras alinhadas ao longo de uma mesma direção, a qual apresenta propriedades mecânicas majoradas em relação às demais direções do corpo. Os modelos de material ortotrópico e transversalmente

isotrópico são normalmente apropriados, portanto, para a análise de tubos laminados com materiais compósitos fibrosos. Neste caso, a equação (2.3) é reescrita em função das constantes de engenharia, para um regime linear elástico:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & \frac{-\nu_{21}}{E_{22}} & \frac{-\nu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & \frac{-\nu_{32}}{E_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_{11}} & \frac{-\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

A equação (2.7) está representada nos eixos principais 1-2-3 de um modelo ortotrópico, onde as constantes E_{11} , E_{22} e E_{33} indicam os módulos elásticos, ou de *Young*, nestas direções. As demais constantes são os módulos transversais, ou coeficientes de *Poisson*, ν_{ij} , definidos por:

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_{jj}}{\varepsilon_{ii}} \quad (2.8)$$

Da condição de simetria da matriz [S], resulta-se na expressão:

$$\nu_{ij} = \frac{E_{ii}}{E_{jj}} \cdot \nu_{ji} \quad (i,j = 1,2,3) \quad (2.9)$$

Os módulos de cisalhamento G_{12} , G_{13} e G_{23} representam a relação entre as tensões de cisalhamento e as deformações angulares nos planos principais. No caso do modelo de materiais transversalmente isotrópicos, geralmente atribui-se a direção “1” àquela alinhada com as fibras, segundo a qual o módulo de elasticidade é maior do que nas outras duas direções principais. Desta forma, as seguintes relações entre as constantes em (2.7) são verificadas:

$$E_{11} \gg E_{22} (E_{22} = E_{33}) \quad (2.10)$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} \quad (2.11)$$

$$G_{12} = G_{13} \quad (2.12)$$

$$G_{23} = \frac{E_{22}}{2 \cdot (1 + \nu_{23})} \quad (2.13)$$

2.3.3

Relações Constitutivas em Coordenadas Cilíndricas

No desenvolvimento apresentado na seção anterior, as relações constitutivas estão referidas ao sistema de coordenadas 1-2-3. No entanto, para os modelos aplicados a materiais compósitos, esta escolha é local, e o eixo 1 está normalmente alinhado na direção das fibras. Neste estudo, considerou-se compósitos laminados unidirecionais para estruturas tubulares cilíndricas e definiu-se a direção “3” na direção radial do tubo, conforme mostrado pela Figura (2.3). Foram adotados os sistemas de coordenadas geométricas X- θ -R, para o cilindro, e 1-2-3, para as fibras. Considerando-se o ponto P ao longo de uma fibra bobinada, segundo um ângulo ϕ com o eixo longitudinal do cilindro, as relações entre as componentes nos eixos dos dois sistemas são estabelecidas.

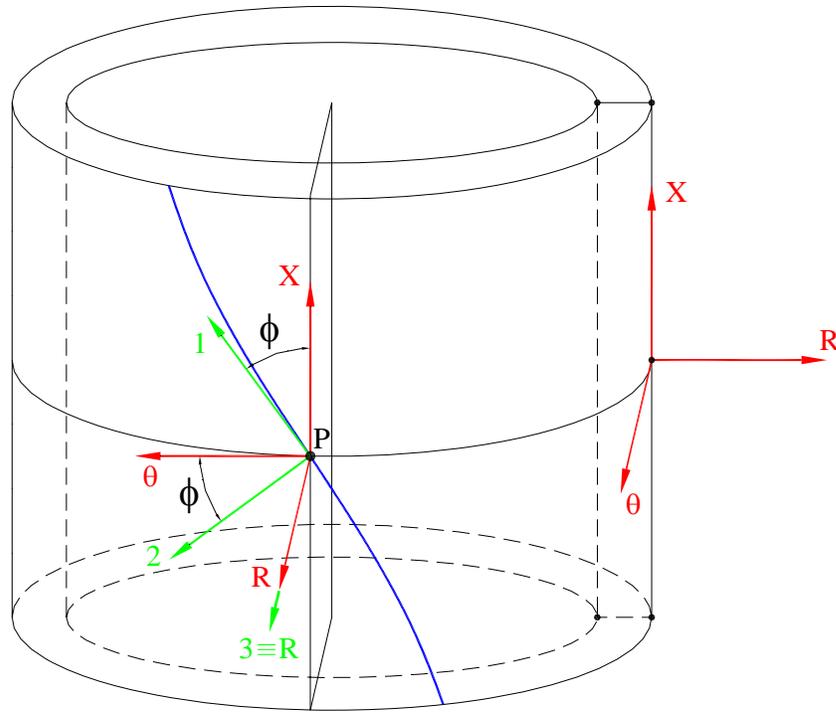


Figura 2.3: Definição da Estrutura e Sistemas de Coordenadas

Desta forma, as transformações lineares para os tensores de deformação e tensão entre ambos os sistemas de coordenadas são obtidas por meio da transformação rotação, em relação aos eixos comuns, “3” e “R”. Assim, as relações constitutivas presentes em (2.1) e (2.3), apresentadas no sistema local, deverão ser transformadas para o sistema global X-θ-R pela transformação:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \text{sen}(\phi) & 0 \\ -\text{sen}(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Considerando-se a natureza tensorial das grandezas tensão e deformação, a relação constitutiva, referida ao sistema de coordenadas global, é obtida utilizando-se as seguintes transformações:

$$[\sigma]_{123} = [T][\sigma]_{X\theta R}[T]^T \quad (2.15)$$

$$[\varepsilon]_{123} = [T][\varepsilon]_{X\theta R}[T]^T \quad (2.16)$$

Explicitando os resultados de (2.15) e (2.16), chega-se a:

$$[\sigma]_{123} = [M_1][\sigma]_{X\theta R} \quad (2.17)$$

$$[\varepsilon]_{123} = [M_2][\varepsilon]_{X\theta R} \quad (2.18)$$

e, por inspeção:

$$[M_1] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 2.m.n & 0 & 0 \\ n^2 & m^2 & 0 & -2.m.n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -m.n & m.n & 0 & (m^2 - n^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m & n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -n & m \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$[M_2] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & m.n & 0 & 0 \\ n^2 & m^2 & 0 & -m.n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2.m.n & 2.m.n & 0 & (m^2 - n^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m & n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -n & m \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

As equações (2.19) e (2.20) utilizam as abreviações $m = \cos(\phi)$ e $n = \text{sen}(\phi)$. Assim, a matriz constitutiva \bar{C} , no sistema de coordenadas global, é expressa substituindo-se (2.15) e (2.16) em (2.1), utilizada em:

$$[\sigma]_{X\theta R} = [\bar{C}][\varepsilon]_{X\theta R} \quad (2.21)$$

Sendo:

$$[\bar{C}] = [M_1]^{-1} \cdot [C] \cdot [M_2] \quad (2.22)$$

A matriz $[\bar{C}]$ apresenta-se simétrica, com a seguinte forma, similar a de um modelo de material monoclinico:

$$[\bar{C}]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{13} & \bar{C}_{14} & 0 & 0 \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{23} & \bar{C}_{24} & 0 & 0 \\ \bar{C}_{13} & \bar{C}_{23} & \bar{C}_{33} & \bar{C}_{34} & 0 & 0 \\ \bar{C}_{14} & \bar{C}_{24} & \bar{C}_{34} & \bar{C}_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{55} & \bar{C}_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{56} & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Cujos componentes, após desenvolvimento de (2.22), são dados por:

$$\begin{aligned} \bar{C}_{11} &= m^4.C_{11} + 2.m^2.n^2.C_{12} + n^4.C_{22} + 4.m^2.n^2.C_{44} \\ \bar{C}_{12} &= m^2.n^2.(C_{11} + C_{22}) + (m^4 + n^4).C_{12} - 4.m^2.n^2.C_{44} \\ \bar{C}_{13} &= m^2.C_{13} + n^2.C_{23} \\ \bar{C}_{14} &= m.n.(m^2.C_{11} + (n^2 - m^2).C_{12} - n^2.C_{22} + 2.(n^2 - m^2).C_{44}) \\ \bar{C}_{22} &= n^4.C_{11} + 2.m^2.n^2.C_{12} + m^4.C_{22} + 4.m^2.n^2.C_{44} \\ \bar{C}_{23} &= n^2.C_{13} + m^2.C_{23} \\ \bar{C}_{24} &= m.n.(n^2.C_{11} + (m^2 - n^2).C_{12} - m^2.C_{22} + 2.(m^2 - n^2).C_{44}) \\ \bar{C}_{33} &= C_{33} \\ \bar{C}_{34} &= m.n.(C_{13} - C_{23}) \\ \bar{C}_{44} &= (m.n)^2.(C_{11} - 2C_{12} + C_{22}) + C_{44}.(m^2 - n^2)^2 \\ \bar{C}_{55} &= m^2.C_{55} + n^2.C_{66} \\ \bar{C}_{56} &= m.n.(C_{55} - C_{66}) \\ \bar{C}_{66} &= n^2.C_{55} + m^2.C_{66} \end{aligned} \quad (2.24)$$

2.3.4

Propriedades de Compósitos Fibrosos Laminados Comerciais

Várias referências ou catálogos de fabricantes comerciais indicam, para diferentes materiais, informações de propriedades mecânicas, de acordo com os modelos considerados. No modelo transversalmente isotrópico, as características mecânicas são idênticas, segundo qualquer direção transversal à principal.

Geralmente os materiais compósitos recebem o nome do material das fibras seguido pelo da matriz. Em alguns casos, nomes comerciais são também utilizados.

A Tabela (2.1) apresenta propriedades importantes para seleção em projeto, de alguns compósitos^[5] comerciais, nas definições do sistema local de eixos, laminar, mostrado na Figura (2.3). A tabela fornece ainda as espessuras mínimas de cada lâmina, de acordo com o processo de fabricação utilizado.

Tabela 2.1: Algumas Propriedades Mecânicas de Materiais Compósitos Fibrosos

Propriedades Mecânicas	Compósitos Fibrosos / Referências Comerciais			
	T300 / 5208	<i>Kevlar</i> / Epoxy	Boro / Alumínio	<i>S-Glass</i> / Epoxy
Elasticidade Axial E_{11}	132 GPa 19,2 Msi	76,8 GPa 11,0 Msi	227 GPa 32,9 Msi	43,5 GPa 6,31 Msi
Elasticidade Transv. E_{22}	10,8 GPa 1,56 Msi	5,5 GPa 0,8 Msi	139 GPa 20,2 Msi	11,5 GPa 1,67 Msi
Coef. Poisson ν_{12}	0,24	0,34	0,24	0,27
Coef. Poisson ν_{23}	0,59	0,37	0,36	0,40
Mód. de Cisalhamento G_{12}	5,65 GPa 0,82 Msi	2,07 GPa 0,30 Msi	57,6 GPa 8,35 Msi	3,45 GPa 0,50 Msi
Mód. de Cisalhamento G_{23}	3,38 GPa 0,49 Msi	1,4 GPa 0,20 Msi	49,1 GPa 7,12 Msi	4,12 GPa 0,60 Msi
Densidade ρ	$1,54 \frac{g}{cm^3}$ $0,056 \frac{lb}{in^3}$	$1,38 \frac{g}{cm^3}$ $0,05 \frac{lb}{in^3}$	$2,65 \frac{g}{cm^3}$ $0,096 \frac{lb}{in^3}$	$2,00 \frac{g}{cm^3}$ $0,072 \frac{lb}{in^3}$
Espessura de Camada	0,127 mm 0,005 in	0,127 mm 0,005 in	0,178 mm 0,007 in	–