

(a)

MATERIAIS COMPÓSITOS

LOM3066

Prof. Associado Cassius O. E. Terra Ruchert

0.5 mm

cassiusterra@usp.br

FAMÍLIAS DE MATERIAIS DE ENGENHARIA



- VÁRIAS TECNOLOGIAS ATUAIS EXIGEM MATERIAIS QUE APRESENTEM COMBINAÇÕES INCOMUNS DE PROPRIEDADES, QUE NÃO PODEM SER ATENDIDAS PELAS LIGAS METÁLICAS, CERÂMICAS E MATERIAIS POLIMÉRICOS.

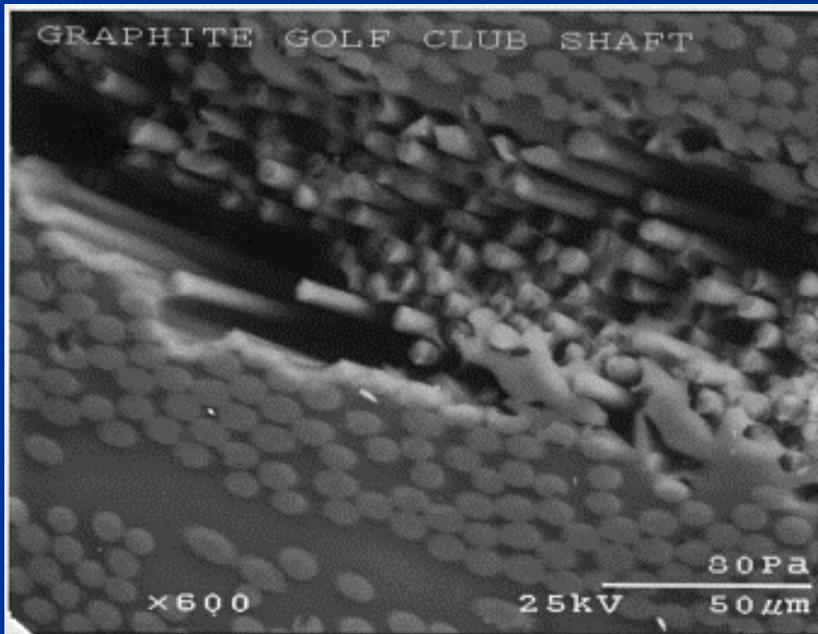
Ex : APLICAÇÕES AERONÁUTICAS E AEROESPACIAIS, SUBAQUÁTICAS E DE TRANSPORTE

- OS MATERIAIS ESTRUTURAIS DEVEM APRESENTAR :
 - BAIXA DENSIDADE
 - BOAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
 - RIGIDEZ
 - RESISTÊNCIAS À ABRASÃO E AO IMPACTO
 - RESISTÊNCIA À CORROSÃO

ESTAS NÃO SÃO COMBINAÇÕES USUAIS DE PROPRIEDADES

CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS

■ Compósitos



- Materiais compósitos são constituídos de mais de um tipo de material insolúveis entre si (multifásicos)
- Os compósitos são “desenhados” para apresentarem a combinação criteriosa das melhores características de cada material constituinte (ação combinada)
- Muitos dos recentes desenvolvimentos em materiais envolvem materiais compósitos
- Um exemplo clássico é o compósito de matriz polimérica com fibra de vidro. O material compósito apresenta a resistência da fibra de vidro associada à flexibilidade do polímero

EXEMPLOS

- **AÇOS PERLÍTICOS** : camadas alternadas de:

- FERRITA α : mole e dúctil
- CEMENTITA : dura e frágil

As propriedades mecânicas combinadas da PERLITA são superiores às de ambas as fases constituintes

- **MADEIRA** :

- FIBRAS DE CELULOSE : resistentes e flexíveis
- LIGNINA : material rígido

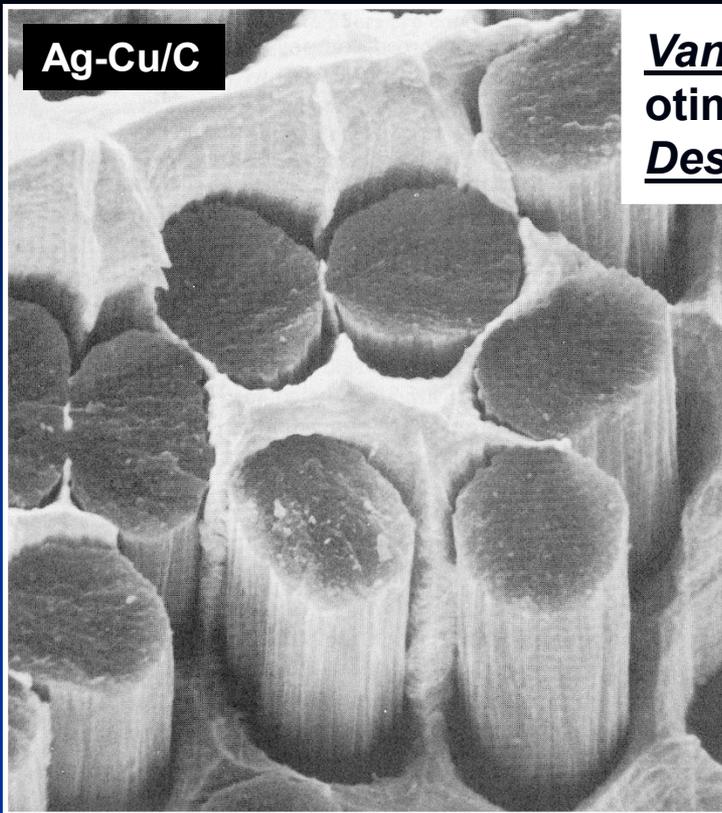
- **OSSOS** :

- COLÁGENO : proteína forte, porém mole
- HIDROXIAPATITA (HIDRÓXIDO DE Ca) : mineral duro e frágil

COMPÓSITO

- MATERIAL MULTIFÁSICO, CONSTRUÍDO ARTIFICIALMENTE, EM CONTRASTE COM UM MATERIAL QUE OCORRE OU SE FORMA NATURALMENTE.
- AS FASES CONSTITUINTES DEVEM SER FÍSICO-QUIMICAMENTE DIFERENTES E DEVEM ESTAR SEPARADAS POR UMA INTERFACE DISTINTA.
- A MAIORIA DAS LIGAS METÁLICAS E VÁRIOS MATERIAIS CERÂMICOS NÃO SE ENQUADRAM NESTA DEFINIÇÃO. SUAS FASES SÃO FORMADAS COMO CONSEQÜÊNCIA DE FENÔMENOS NATURAIS.

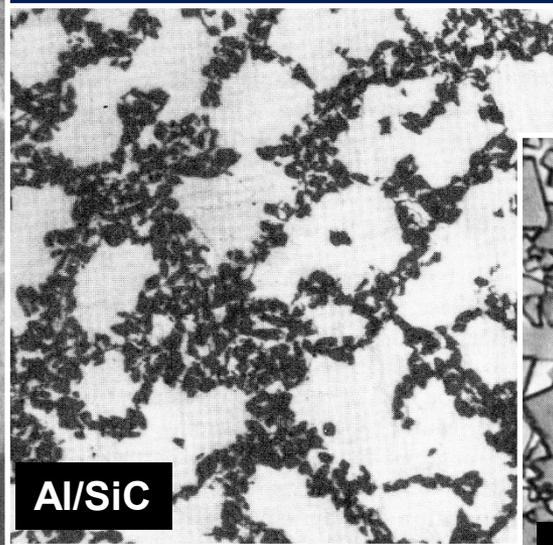
Ag-Cu/C



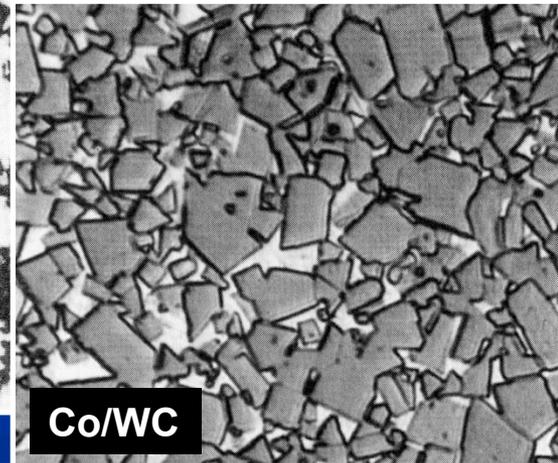
Vantagens: adequação ao uso (compatibilização-otimização de propriedades individuais);
Desvantagens: processamento, custo, reciclagem

COMPÓSITOS

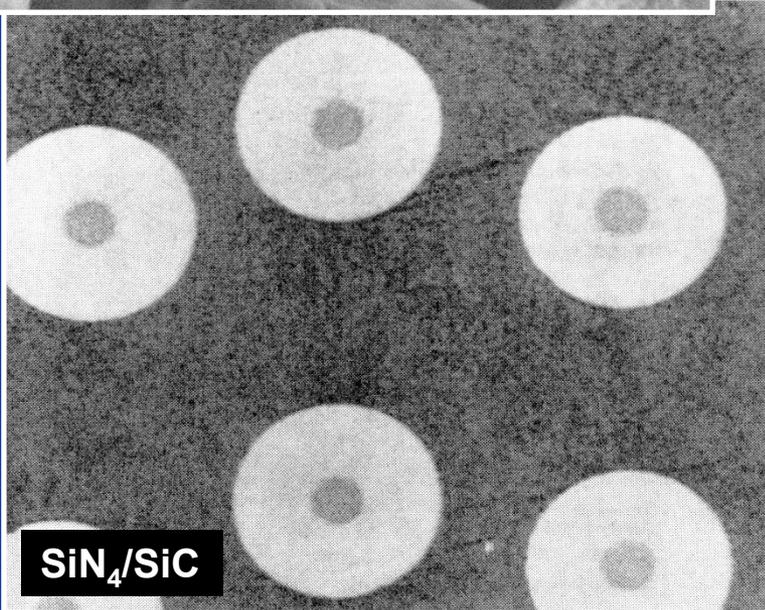
Al/SiC



Co/WC



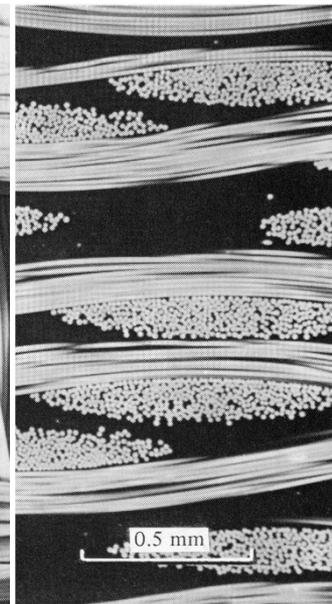
SiN₄/SiC



(a)



Epóxi/Vidro



0.5 mm



(McLaren MP4-1).

Compósito: Carbono/Epoxi

Chassis totalmente em compósito (1981)



FIGHTER AIRCRAFT MATERIALS

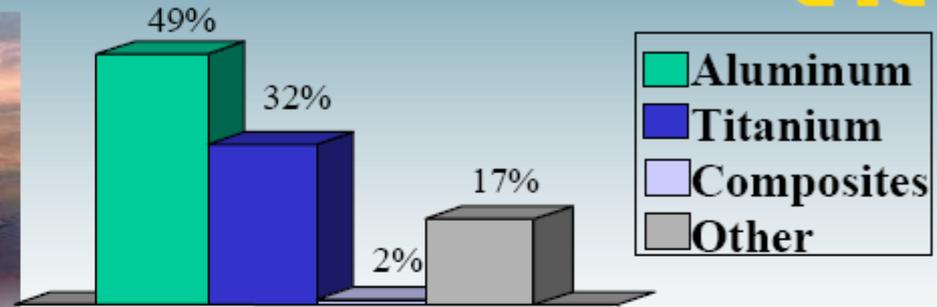
Utilization Of High Cost Airframe Materials Has Been Increasing To Improve Aircraft Performance



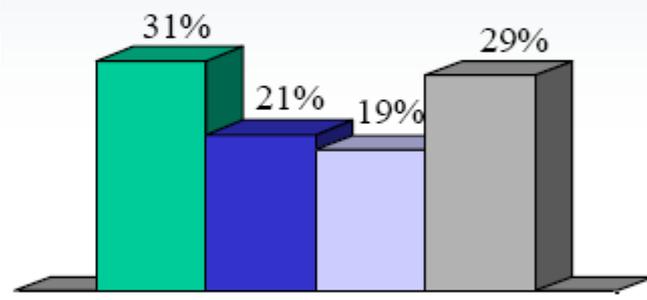
1987



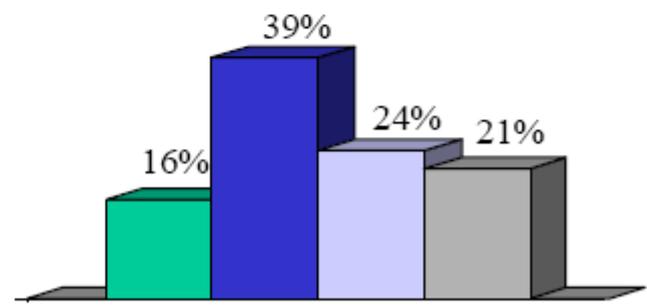
F-15E



F/A-18E/F



F-22



present

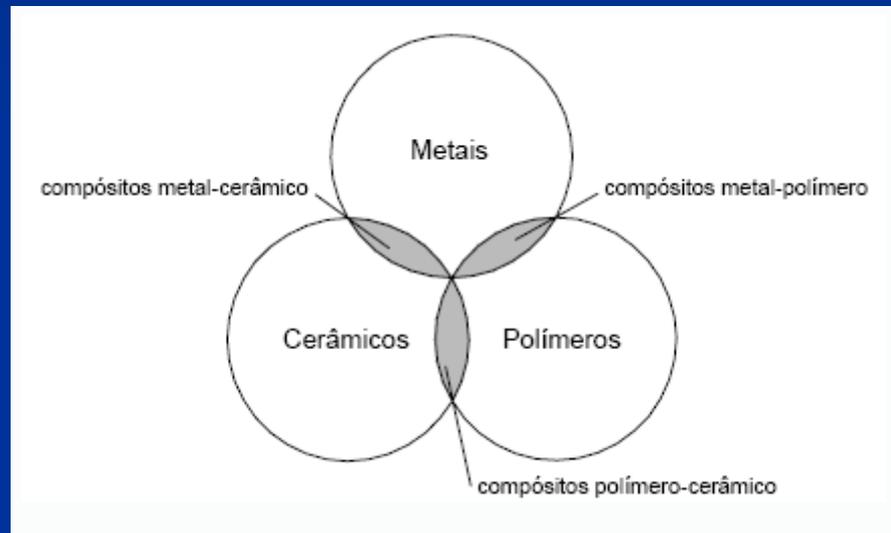
Affordability Is Now Being Emphasized When Selecting Airframe Materials

MATERIAIS COMPÓSITOS

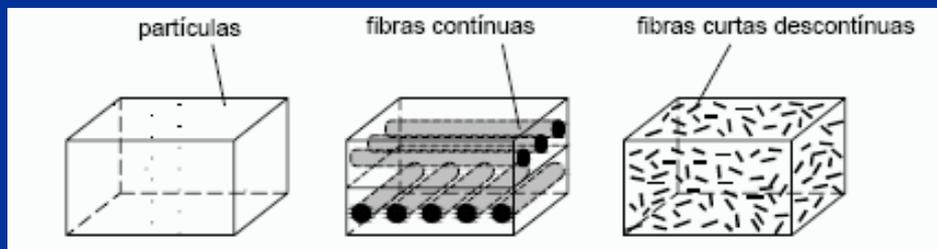
- **EM GERAL, FORMADOS POR DUAS FASES :**
 - MATRIZ CONTÍNUA
 - FASE DISPERSA
- **AS PROPRIEDADES MECÂNICAS SÃO FUNÇÃO DAS:**
 - PROPRIEDADES DAS FASES CONSTITUINTES
 - QUANTIDADES RELATIVAS DESTAS FASES
 - GEOMETRIA DA FASE DISPERSA
 - FORMA
 - TAMANHO
 - DISTRIBUIÇÃO
 - ORIENTAÇÃO DAS PARTÍCULAS

MATERIAIS COMPOSTOS

- *Os materiais compostos são misturas ou combinações de dois ou mais materiais que podem ser agrupados em três grupos distintos: polímero-cerâmico, metal-polímero e metal-cerâmico*



A estrutura característica de um composto é formada por um material ligante (que serve de matriz) e por um material de reforço (ou de enchimento). O material de reforço pode ser incluído na estrutura sob a forma de partículas, de fibras contínuas ou de fibras descontinúas.

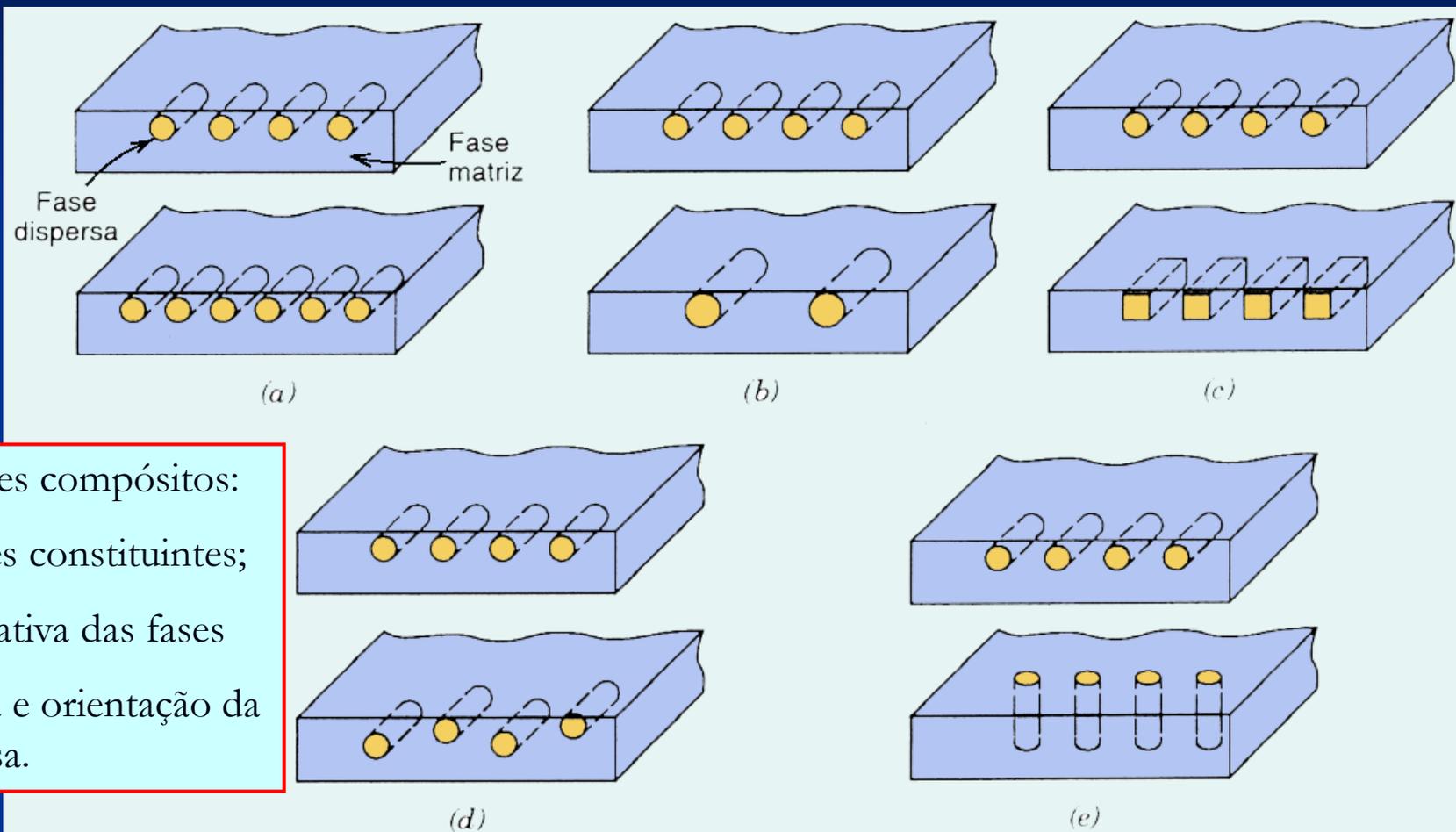


MATERIAIS COMPOSITOS

- *A importância dos materiais compostos resulta da combinação de dois ou mais materiais diferentes (ação combinada), com a finalidade de se produzir um material cujas propriedades sejam, em alguns aspectos, superiores às propriedades individuais dos materiais que o constitui.*
- *As propriedades físicas e mecânicas dos materiais compostos são extremamente influenciadas pelas percentagens relativas dos seus componentes elementares e pelo modo como esses componentes estão dispostos entre si. Ex. a resistência mecânica de um compósito é maior segundo a direção paralela às fibras e menor numa direção que lhe seja perpendicular.*
- *Compósito consiste em um material multifásico projetado artificialmente em contraste do material que se forma naturalmente e suas fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e separadas por uma interface distinta.*



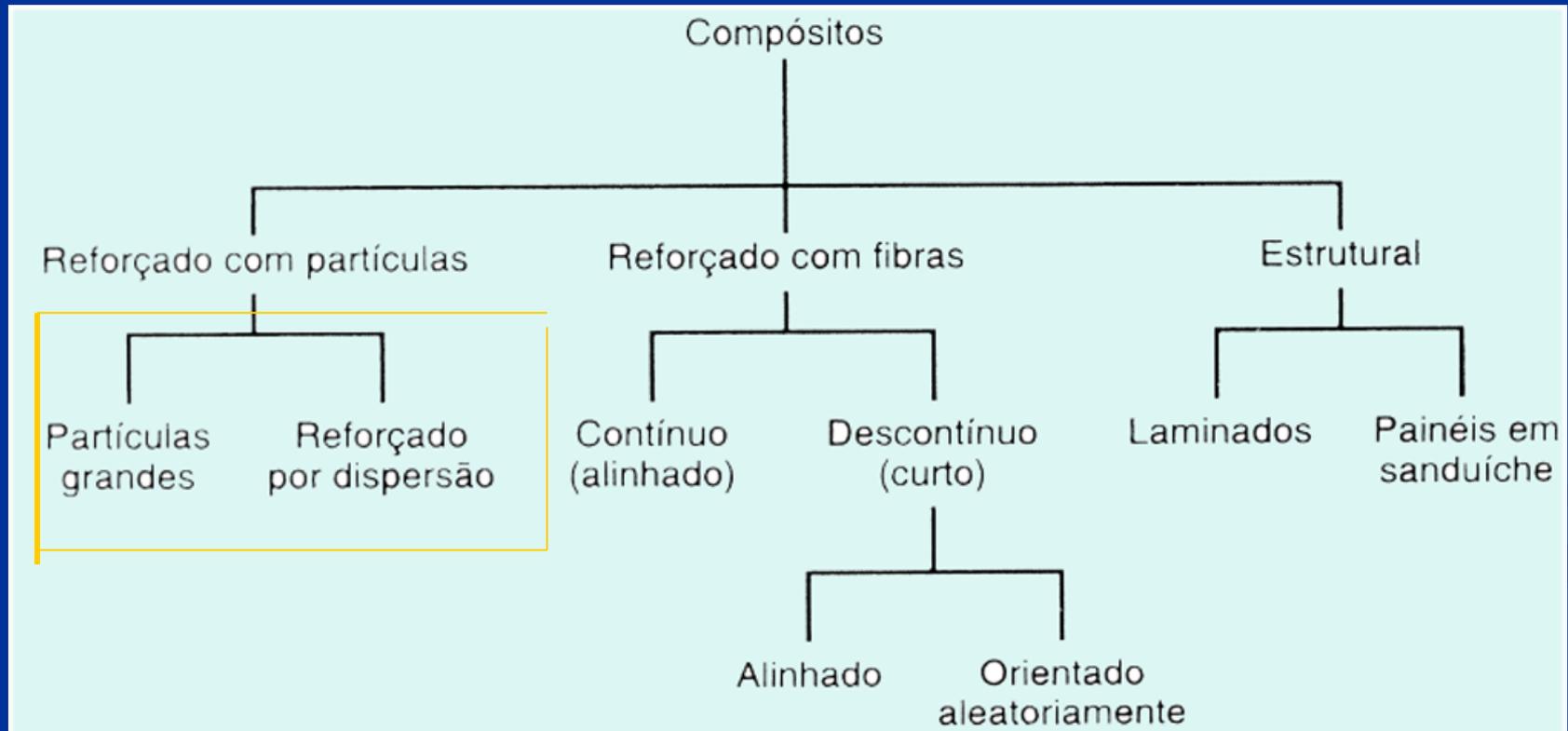
REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE MATERIAS COMPOSTOS

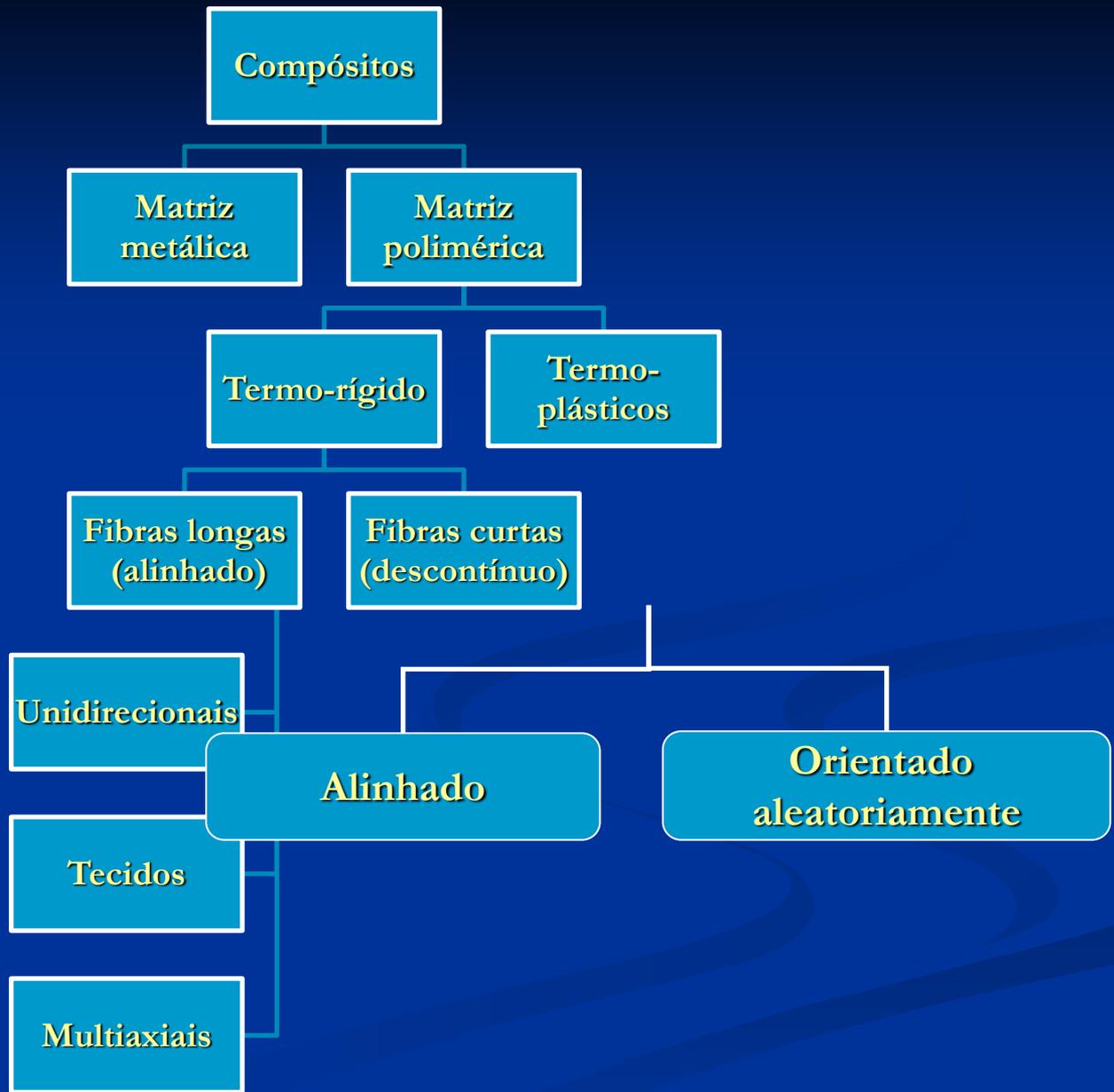


Representação esquemática das diversas características geométricas e espaciais da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos (a) concentração (b) tamanho (c) forma (d) distribuição (e) orientação.

MATERIAIS COMPOSTOS

- *Um esquema simples para a classificação dos materiais compósitos é mostrado na figura. Esse esquema consiste em três divisões principais que são os compósitos reforçados com partículas, com fibras e os compósitos estruturais; ainda existem duas subdivisões para cada uma delas.*





MATER.COMPOSTOS REFORÇADOS COM PARTÍCULAS

1. COMPÓSITOS REFORÇADOS COM PARTÍCULAS GRANDES

- Em geral, a fase particulada é mais dura e mais rígida que a matriz
- Partículas restringem o movimento da matriz
- A matriz transfere parte do esforço aplicado às partículas
- Mecanismo só é efetivo se houver uma ligação forte na interface matriz-partícula

2. COMPÓSITOS REFORÇADOS POR DISPERSÃO

- Diâmetro das partículas entre 0,01 e 0,1 μm (10 a 100 nm)
- Mecanismo de aumento de resistência mecânica é semelhante ao do processo de endurecimento por precipitação.
- Matriz suporta maior parte do esforço e as partículas evitam ou dificultam o movimento das discordâncias. A deformação plástica é restringida, o que aumenta a dureza, σ_e e σ_R .

COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS GRANDES

EXEMPLOS :

ALGUNS MATERIAIS POLIMÉRICOS AOS QUAIS FORAM ADICIONADOS **CARGAS** SÃO COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS GRANDES (SERRAGEM, TALCO ETC..)

■ **CARGAS :**

- MELHORAM AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL
- SUBSTITUEM O VOLUME DO POLÍMERO POR UM MATERIAL MAIS BARATO

■ **CONCRETO :**

- MATRIZ - CIMENTO
- PARTICULADOS - AREIA E BRITA (CARGA)

COMPÓSITOS REFORÇADOS COM PARTÍCULAS GRANDES

■ PARTÍCULAS :

- VARIEDADE DE GEOMETRIAS
- EIXOS DEVEM SER APROXIMADAMENTE IGUAIS MESMAS DIMENSÕES NAS TRÊS DIREÇÕES

■ REFORÇO EFICAZ :

- PARTÍCULAS PEQUENAS
- DISTRIBUIÇÃO POR IGUAL AO LONGO DA MATRIZ
- A FRAÇÃO VOLUMÉTRICA INFLUENCIA O COMPORTAMENTO DO MATERIAL
- PROPRIEDADES MECÂNICAS SÃO MELHORADAS COM O AUMENTO DO TEOR DO MATERIAL PARTICULADO.

COMPÓSITOS REFORÇADOS COM PARTÍCULAS

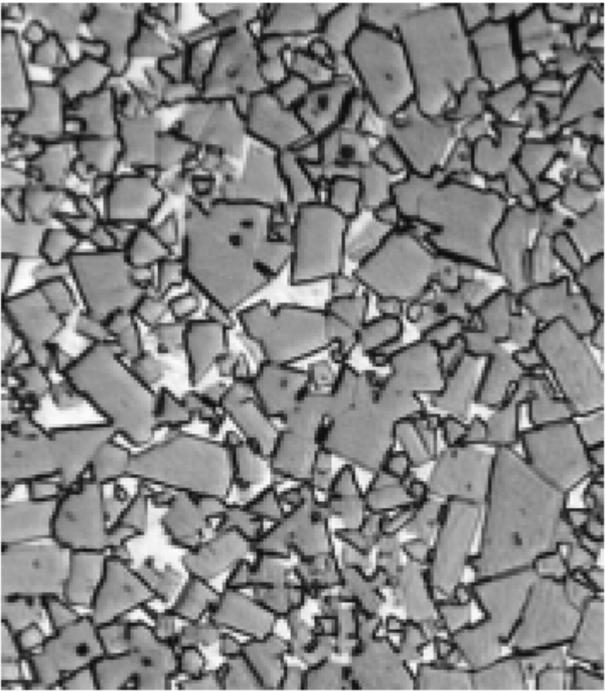
• *Compósitos com partículas grandes*

- As partículas podem ter uma grande variedade de geometrias, porém elas devem possuir aproximadamente as mesmas dimensões em todas as direções
- Para que ocorra um reforço eficaz, as partículas devem ser pequenas e devem estar distribuídas ao longo de toda a matriz

- *Compósitos com partículas grandes são utilizados com os três tipos de materiais (metais, polímeros e cerâmicas)*

- *Os Cermets são exemplos de compósitos cerâmica-metal. Ele é composto por partículas extremamente duras de cerâmica à base de carbeto (carbeto de tungstênio, carbeto de titânio) em uma matriz de um metal como cobalto ou níquel. São utilizados como ferramentas de corte para aços endurecidos. Os carbetos proporcionam a superfície de corte e a matriz metálica aumenta a tenacidade prevenindo a nucleação e propagação de trincas*

- *frações volumétricas grandes, da ordem de 90%, são utilizadas para maximizar a ação abrasiva do composto*



ex. Cermeto (WC, TiC envolvidos em metal) – partícula grande

COMPÓSITOS REFORÇADOS COM PARTÍCULAS GRANDES

■ ELASTÔMEROS E PLÁSTICOS

TERIAM SEU USO LIMITADO SEM A ADIÇÃO DE SISTEMAS PARTICULADOS

■ BORRACHAS MODERNAS:

ADIÇÃO DE NEGRO DE FUMO – PARTÍCULAS DE CARBONO

■ REFORÇO SIGNIFICATIVO:

- PARTÍCULAS EM GERAL ESFÉRICAS, COM TAMANHOS ENTRE 20 e 50nm

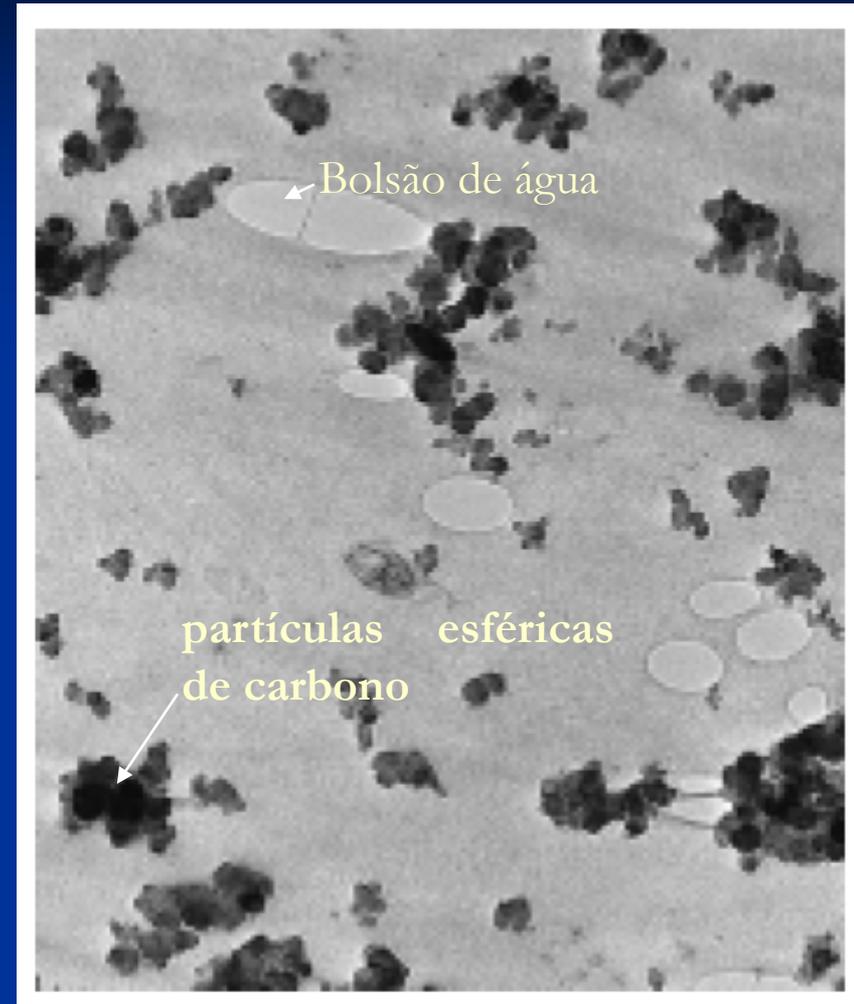
■ PNEUS AUTOMOTIVOS (BORRACHA VULCANIZADA):

- 15 A 30% DE NEGRO DE FUMO DISTRIBUÍDOS POR IGUAL
- FORTE ADESÃO COM A MATRIZ DE BORRACHA

COMPÓSITOS REFORÇADOS COM PARTÍCULAS

Compósitos com partículas grandes

- Tanto os elastômeros como os plásticos são frequentemente reforçados com vários materiais particulados;
- O negro de fumo consiste em partículas muito pequenas (20 a 50 nm) e esféricas de carbono, produzidas pela combustão de gás natural ou óleo. Quando adicionado à borracha vulcanizada esse material extremamente barato melhora o limite de resistência à tração, a tenacidade, a resistência à ruptura e à abrasão;
- Pneus de automóveis contém aproximadamente 15 a 30% de negro de fumo



MEV mostrando partículas esféricas de carbono (negro de fumo) usadas como reforço da borracha sintética do pneu.

Cortesia de Carboloy Systems Department,
General Electric Company

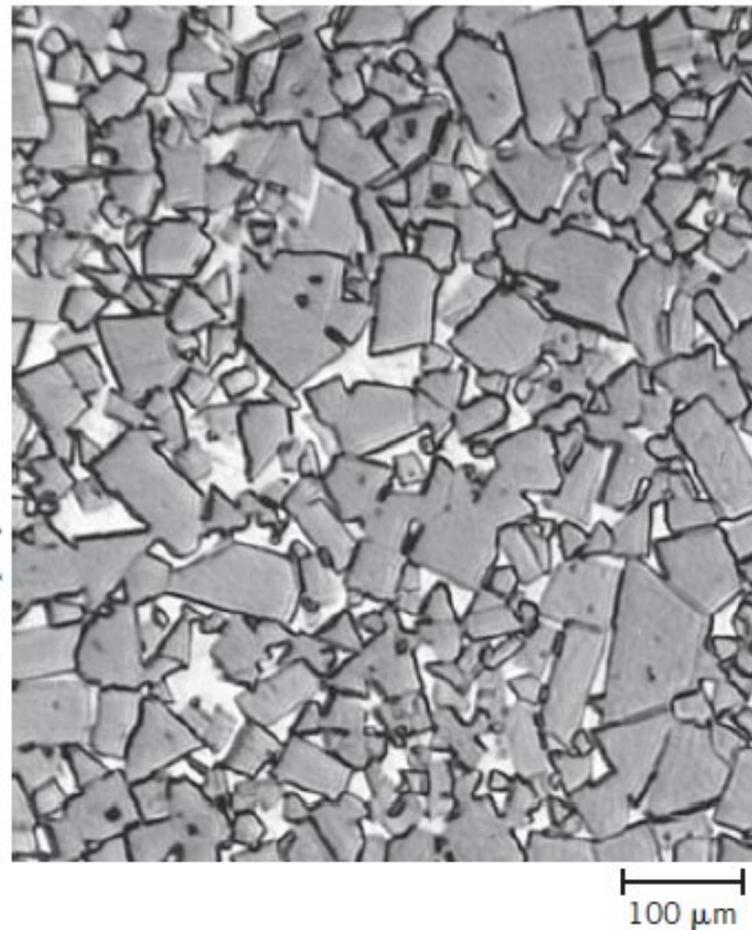
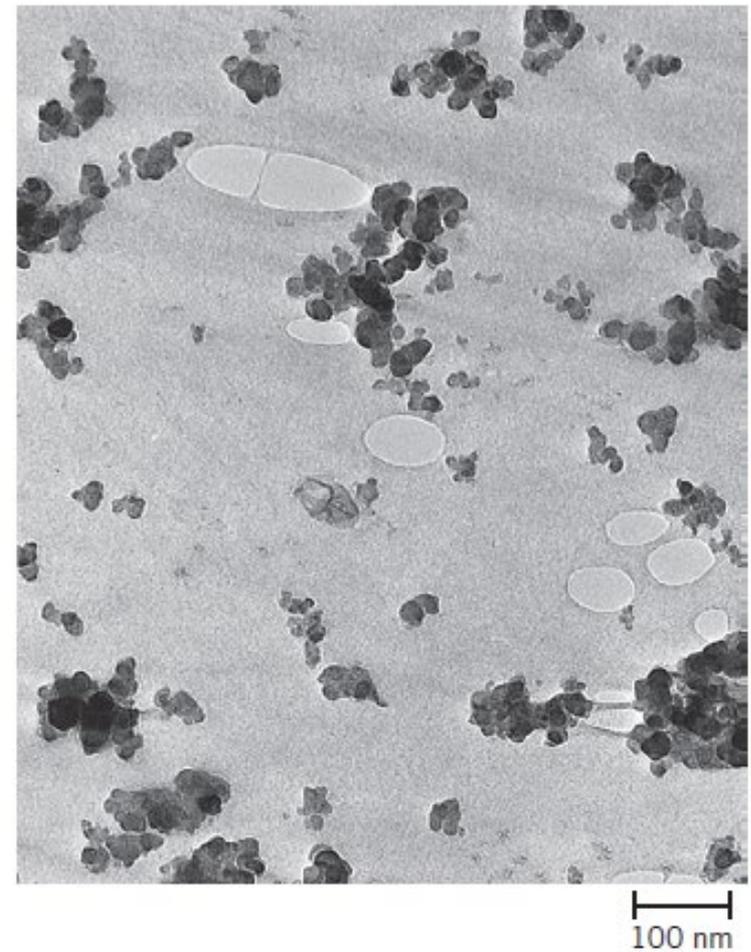


Figura 16.4 Micrografia de um carbeto cimentado WC-Co. As áreas claras são a matriz de cobalto; as regiões escuras são as partículas de carbeto de tungstênio. Ampliação de 100×.



Cortesia da Goodyear Tire & Rubber Company

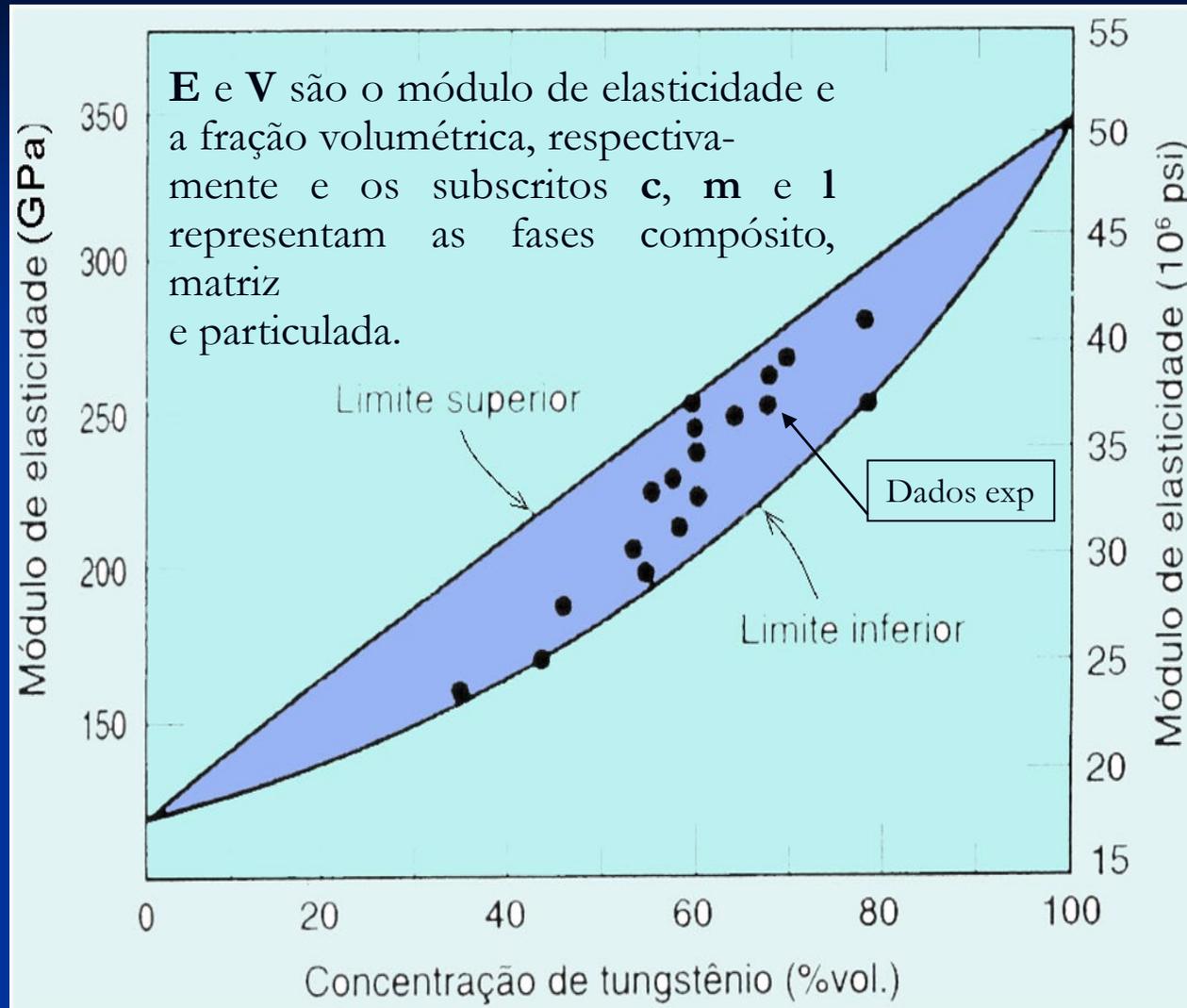
Figura 16.5 Micrografia eletrônica mostrando as partículas de reforço esféricas de negro de fumo em um composto que compõe a face de rolamento de um pneu de borracha sintética. As áreas que lembram marcas d'água são minúsculos bolsões de ar na borracha. Ampliação de 80.000×.

COMPÓSITOS REFORÇADOS COM PARTÍCULAS

Compósitos reforçados por dispersão

- Os metais e ligas metálicas podem ter sua resistência aumentada e ser endurecida através da dispersão uniforme de uma certa porcentagem volumétrica de partículas finas de um material muito duro
- A fase dispersa pode ser metálica ou não metálica(muitos materiais à base de óxidos são utilizados)
- O mecanismo de aumento de resistência envolve interações entre as partículas e as discordâncias no interior da matriz, como ocorre com o endurecimento por precipitação
- Ex. a resistência das ligas de níquel pode ser aumentada com a adição de aproximadamente 3% de óxido de tório (ThO_2) . Esse material é conhecido por níquel com óxido de tório disperso (TD).
- O mesmo efeito é produzido no sistema alumínio-óxido de alumínio, ou seja, alumínio metálico (matriz) envolto por partículas de óxido de alumínio (fase dispersa com 0,1 a 0,2 μm de espessura).

COMPÓSITOS REFORÇADOS COM PARTÍCULAS



No composto bifásico duas expressões matemáticas foram desenvolvidas para relacionar o módulo (**E**) com a fração volumétrica (**V**) das fases.

Limite superior (16.1)

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p$$

Limite inferior (16.2)

$$E_c(l) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m}$$

Módulo de elasticidade em função do percentual volumétrico de partículas de **W** dispersas em uma matriz de **Cu**.

CONCRETO

■ CONCRETO –

MATERIAL COMPÓSITO QUE CONSISTE DE UM AGREGADO DE PARTÍCULAS LIGADAS POR CIMENTO UMAS ÀS OUTRAS, PARA FORMAR UM CORPO SÓLIDO.

- FASES DISPERSA E MATRIZ MATERIAIS CERÂMICOS



- 2 TIPOS PRINCIPAIS, CUJOS AGREGADOS SÃO A BRITA E A AREIA
 - **ASFÁLTICO – MATERIAL DE PAVIMENTAÇÃO**
 - **CIMENTO PORTLAND – MATERIAL ESTRUTURAL DE CONSTRUÇÃO**

CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

- **INGREDIENTES –**
 - Cimento Portland, agregado fino (areia), agregado grosseiro (brita) e água.
 - devem ser adicionados nas proporções corretas, para atingir máxima resistência e operacionalidade
- **PARTÍCULAS AGREGADAS –**
 - Material de enchimento entre 60 e 80% do volume total, para redução de custos.
 - Partículas de areia preenches os espaços vazios da brita.
- **ÁGUA –**
 - Pouca água : ligação incompleta entre os ingredientes
 - Muita água : porosidade excessiva
- **IMPORTANTE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO –**
 - Vazado nos moldes no local da construção
 - Endurece à Tamb, mesmo quando submerso em água.

CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

■ DESVANTAGENS :

- Material fraco e frágil. O valor do limite de resistência à tração, σ_R , é de 10 a 15 vezes menor que sua resistência à compressão.
- Estruturas podem apresentar considerável contração e expansão térmica, devido a flutuações de temperatura.
- A água pode penetrar nos poros externos, causando trincamentos severos em condições de clima frio, como consequência de congelamentos e descongelamentos.

■ A MAIORIA DESTAS DESVANTAGENS PODE SER ELIMINADA OU REDUZIDA POR MEIO DE REFORÇO E/OU A INCORPORAÇÃO DE ADITIVOS.

CONCRETO ARMADO

AUMENTO DA RESISTÊNCIA DO CIMENTO PORTLAND

- VERGALHÕES, ARAMES, BARRAS OU MALHAS DE AÇO SÃO INSERIDAS NO CONCRETO FRESCO E NÃO CURADO
- ESTRUTURA ENDURECIDA PELO REFORÇO PODE SUPORTAR MAIORES TENSÕES DE TRAÇÃO, COMPRESSÃO E CÍSLHAMENTO
- REFORÇO CONSIDERÁVEL AINDA É MANTIDO SE HOUVER DESENVOLVIMENTO DE TRINCAS
- MATERIAL DE REFORÇO :
 - **AÇO**
 - COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA É PRATICAMENTE O MESMO QUE O DO CONCRETO.
 - O AÇO NÃO É CORROÍDO RAPIDAMENTE NO AMBIENTE DO CIMENTO. É ESTABELECIDADA UMA ADESÃO FORTE ENTRE O AÇO E O CONCRETO CURADO, QUE PODE SER MELHORADA PELA INCORPORAÇÃO DE CONTORNOS NA SUPERFÍCIE DO REFORÇO, LEVANDO A UM MAIOR GRAU DE INTERTRAVAMENTO MECÂNICO.

OUTROS REFORÇOS DO CONCRETO ARMADO

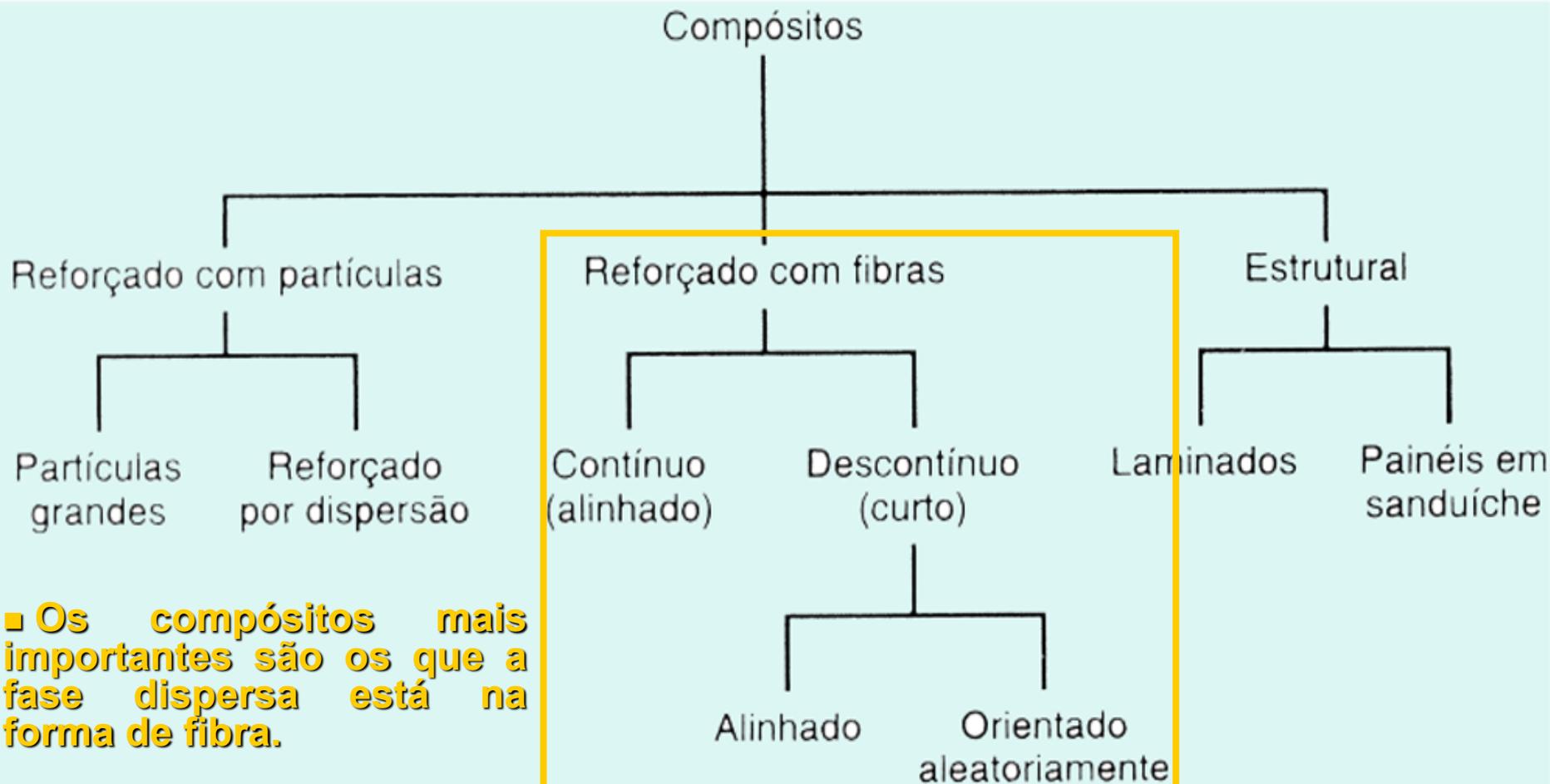
■ VIDRO, NAILON e POLIETILENO

- SÃO FIBRAS DE MATERIAIS DE MÓDULO ELÁSTICO ELEVADO. DEVE-SE TOMAR ALGUNS CUIDADOS NA UTILIZAÇÃO DO REFORÇO, POIS ALGUNS MATERIAIS FIBROSOS SOFREM UMA RÁPIDA DETERIORAÇÃO EM CONTATO COM O CIMENTO.

■ CONCRETO PROTENDIDO

- O AUMENTO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO PROTENDIDO ENVOLVE A INTRODUÇÃO DE TENSÕES DE COMPRESSÃO RESIDUAL NO COMPONENTE ESTRUTURAL. UMA DAS TÉCNICAS É A DO POSICIONAMENTO DE CABOS DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA DENTRO DOS MOLDES VAZIOS E COLOCADOS SOB TRAÇÃO, QUE É MANTIDA CONSTANTE. EM SEGUIDA, O CONCRETO É VAZADO NOS MOLDES, ENDURECIDO E A TRAÇÃO DOS CABOS É LIBERADA. À MEDIDA QUE OS CABOS SE CONTRAEM, COLOCAM A ESTRUTURA SOB COMPRESSÃO, POIS A TENSÃO É TRANSMITIDA AO CONCRETO ATRAVÉS DA LIGAÇÃO CONCRETO-CABO, QUE FOI FORMADA. O CONCRETO DEVE SER DE BOA QUALIDADE, DEVE POSSUIR UMA PEQUENA CONTRAÇÃO E BAIXA TAXA DE FLUÊNCIA. EM GERAL SÃO PRÉ-FABRICADOS.

CLASSIFICAÇÃO DOS COMPÓSITOS



Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos

COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

- Exigência de projeto : altas resistência e/ou rigidez

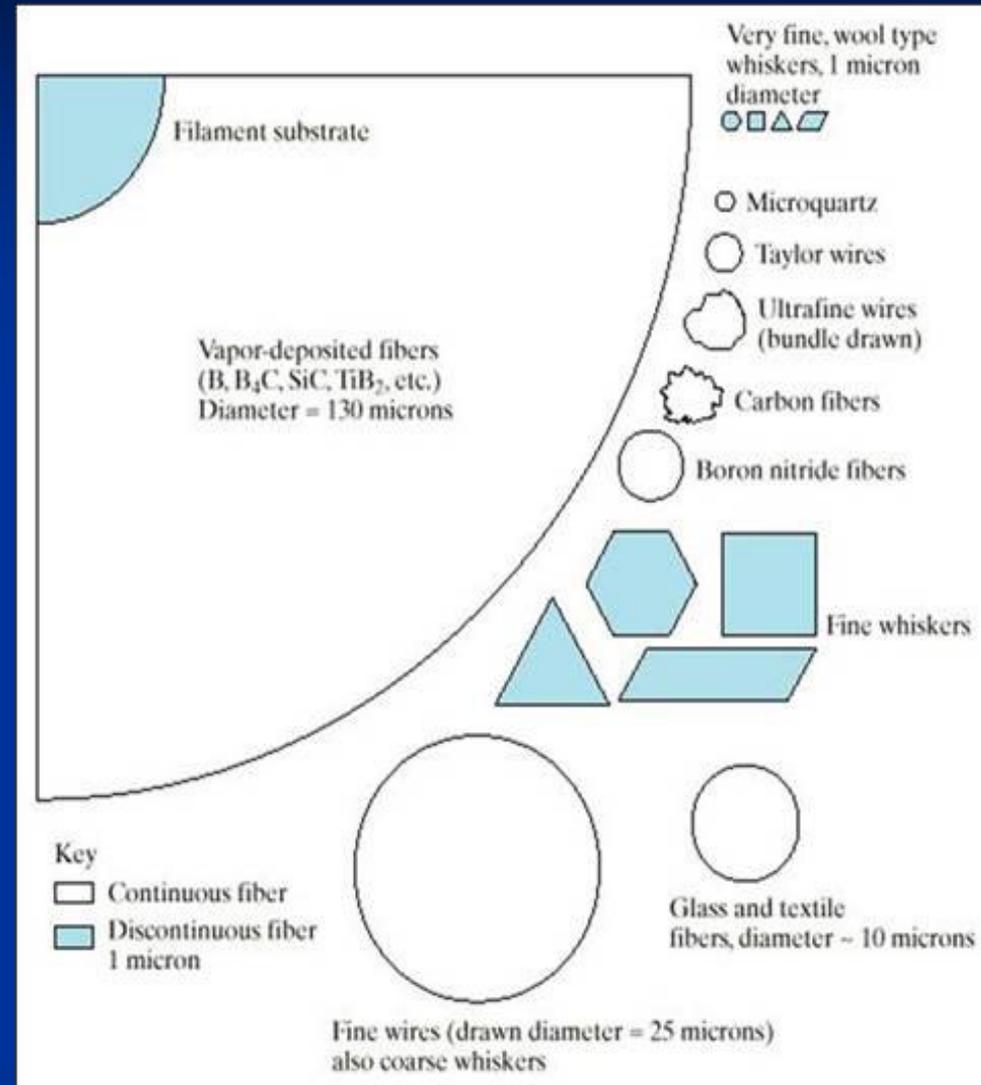
- **Resistência específica**- limite de resistência à tração / densidade relativa

- **Módulo específico** - módulo de elasticidade / densidade relativa

- Já foram produzidos compósitos reforçados por fibras com resistências e módulos específicos extremamente altos, que empregam materiais de baixa densidade para a fibra e a matriz.

- Estes compósitos são subclassificados de acordo com o comprimento da fibra

- Fibras muito curtas podem não produzir melhora significativa



FASE FIBRA

Em relação ao diâmetro e à natureza, as fibras são agrupadas em três classificações diferentes: uísqueres, fibras e arames :

- **Uísqueres:** consistem em monocristais muito finos que possuem razões comprimento- diâmetro extremamente grandes. Possuem elevado grau de perfeição cristalina e são virtualmente isentos de defeitos, o que é responsável pelas suas resistências excepcionalmente elevadas(materiais mais resistentes que se conhece). Não são amplamente utilizados devido ao custo;
- **Fibras:** materiais policristalinos ou amorfos e possuem diâmetros pequenos. Os materiais fibrosos são geralmente polímeros e cerâmicas(por exemplo, vidro, carbono, boro, óxido de alumínio e carbetto de silício);
- **Arames:** possuem diâmetros relativamente grandes. Dentre os materiais típicos estão o aço, molibdênio e o tungstênio. Os arames são utilizados como reforço radial de aço em pneus, carcaças de motores e mangueiras de alta pressão.

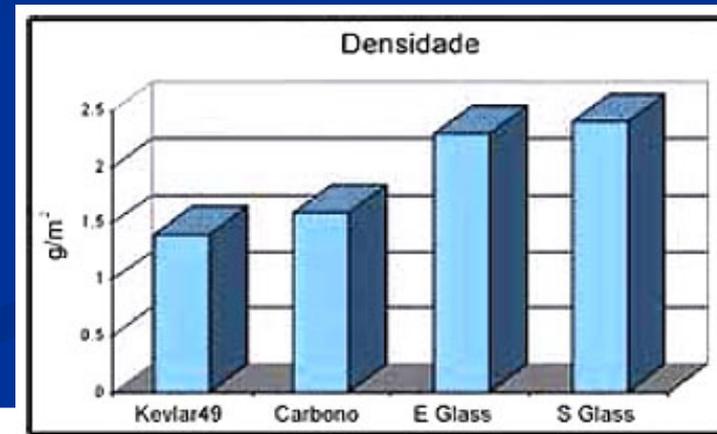
Fibras

Os três tipos de fibras sintéticas mais comuns que se usam para reforçar materiais poliméricos são:

- As fibras de **vidro** (as mais baratas e as mais usadas);
- As fibras de **aramida** (kevlar);
- As fibras de **carbono** (apresentam resistências mecânicas elevadas e baixas densidades, apesar do seu preço mais elevado são utilizadas em muitas aplicações).

Materiais Fibrosos usados em menor intensidade:

- Boro
- Carbetto de silício
- Óxido de alumínio



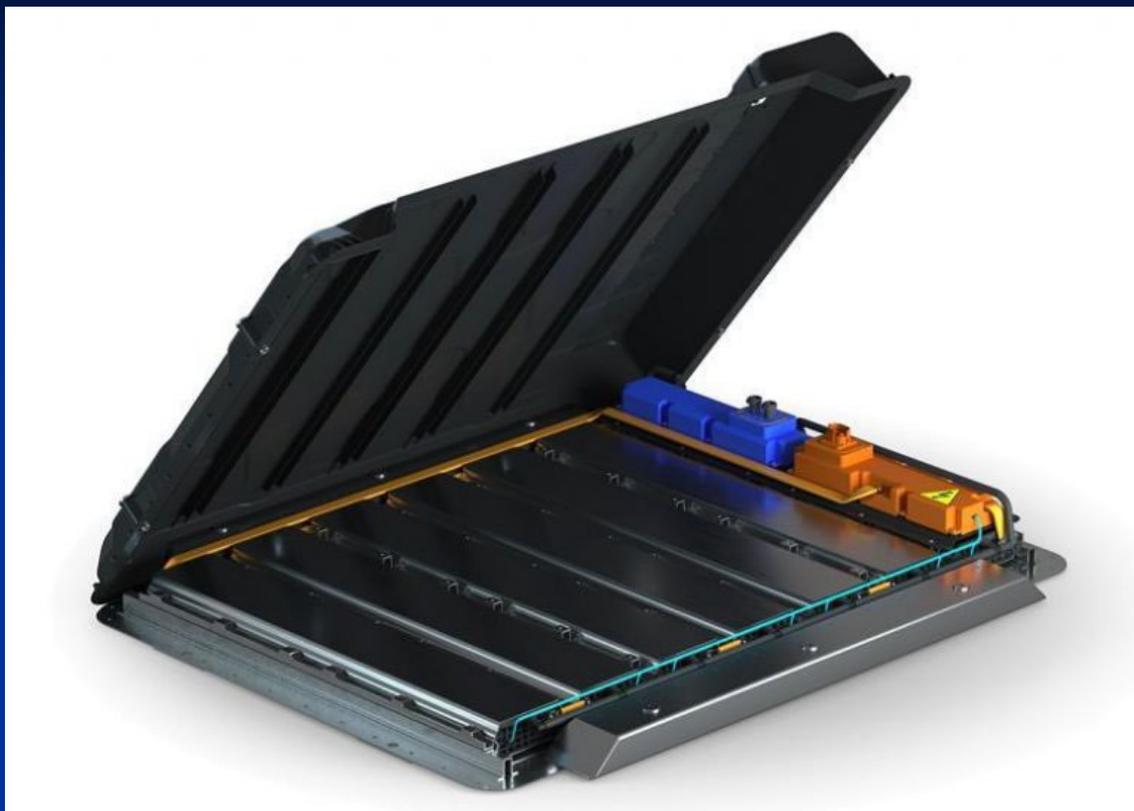
EXEMPLO DE COMPÓSITOS NA INDUSTRIA AUTOMOTIVA



Sistema de suspensão traseira Rassini para o modelo da picape 2021 F-150 da Ford Motor Co. Crédito da foto: Hexion Inc., Rassini

Esta peça é fabricada através do processo de moldagem por transferência de resina (RTM) para moldar um reforço de fibra de vidro com resina . De acordo com a empresa, o aglutinante de resina EPIKOTE TRAC 06720 é essencial para estabilização de tecido e pré-formação automatizada de uma grande pilha direcional de camadas de tecido e é totalmente compatível com o sistema de resina de cura rápida.

EXEMPLO DE COMPÓSITOS NA INDUSTRIA AUTOMOTIVA



Outro fator importante para os compósitos no setor automotivo é o impulso global para emissões zero até 2050 (data depende do País) , o que está levando a um maior desenvolvimento e produção de veículos elétricos (VEs).

EXEMPLO DE COMPÓSITOS NA INDUSTRIA AUTOMOTIVA



Uma roda de 22 polegadas totalmente em fibra de carbono para o SUV Bentayga. Crédito da foto: Bucci Composites

As primeiras rodas de fibra de carbono totalmente comercializadas para a indústria automotiva foram as produzidas por uma empresa Australiana e lançada no mercado em 2008. Em 2015, a Carbon Revolution introduziu rodas de fibra de carbono para o Ford Mustang Shelby GT350R por US \$ 15.000 por conjunto....!!!!!! Muito caro ainda.

EXEMPLO DE COMPÓSITOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL



Superior esquerdo, sentido horário: Coberturas compostas para tanque de água de 38 milhões de galões em Bogotá, Colômbia; Plataforma de ponte composta sobre a rodovia A27 na Holanda; Tubos FRP para instalações de dessalinização ; e vergalhões FRP .

EXEMPLO DE COMPÓSITOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL



Ponte composta desenvolvida pela Structural Composites e instalada no centro-norte do Tennessee.

Os compósitos oferecem leveza, resistência à corrosão, alta resistência e longa vida útil — qualidades que os tornam um ajuste natural para projetos de infraestrutura. Os compósitos estão sendo usados para reabilitar estradas, pontes, sistemas de água/drenagem e paredões, para reforçar concreto e construir estruturas resilientes. E enquanto o uso está crescendo, os compósitos ainda representam menos de 1% em volume de materiais usados em infraestrutura.

EXEMPLO DE COMPÓSITOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL



Aproximadamente 11.000 quilômetros de vergalhões GFRP reforçam este canal de mitigação de inundações de concreto em Jizan, Arábia Saudita, e permitem sua vida útil de 100 anos.

EXEMPLO DE TANQUES DE FIBRA DE VIDRO



Tanque de aço corroído

VANTAGENS DE TANQUES DE FIBRA DE VIDRO

- Resistência a Corrosão
- Relação alta resistência/peso (resistência específica)
- Transparência não condutora (EMI/RFI)
- Economia
- Flexibilidade em tamanho e formatos

A interferência eletromagnética (EMI) ou interferência de radiofrequência (RFI) é crucial para levar em consideração quando você possui equipamentos ou instrumentação que dependem de leituras precisas. O material FRP é transparente a interferências eletromagnéticas e de radiofrequência. Além disso, o FRP não é condutivo, por isso funciona bem como isolante elétrico

Uma vantagem considerável do FRP é seu custo mais baixo. Em muitos casos, o FRP pode oferecer uma solução satisfatória para problemas de corrosão e o menor custo entre as opções de material. Devido à sua excelente resistência à corrosão, o FRP pode economizar mais de 70% nos custos de manutenção.

INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA FIBRA

■ CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

- PROPRIEDADES DA FIBRA
- MANEIRA COMO UMA CARGA APLICADA É TRANSMITIDA PARA A FIBRA PELA A FASE MATRIZ – LIGAÇÃO INTERFACIAL
- NÃO EXISTE TRANSMISSÃO DE CARGA DA MATRIZ PARA CADA EXTREMIDADE DA FIBRA

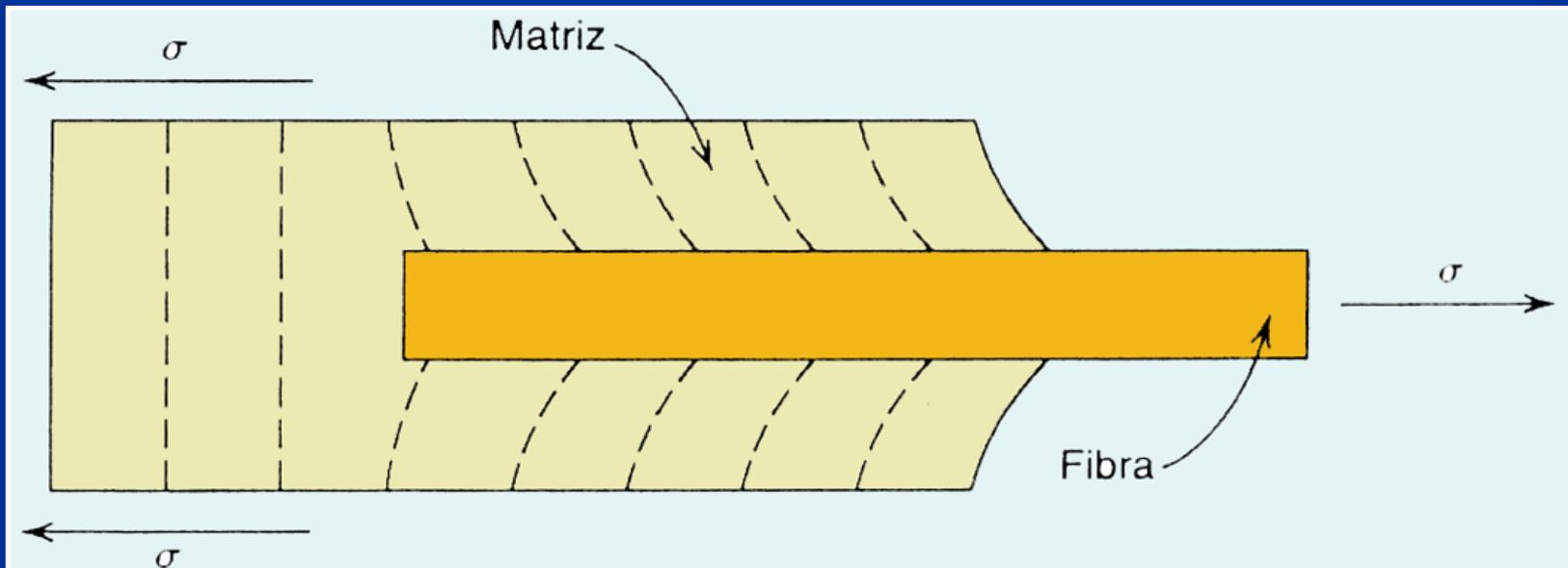


Fig. 17.6 O padrão de deformação na matriz em volta de uma fibra que está sujeita à aplicação de uma carga de tração.

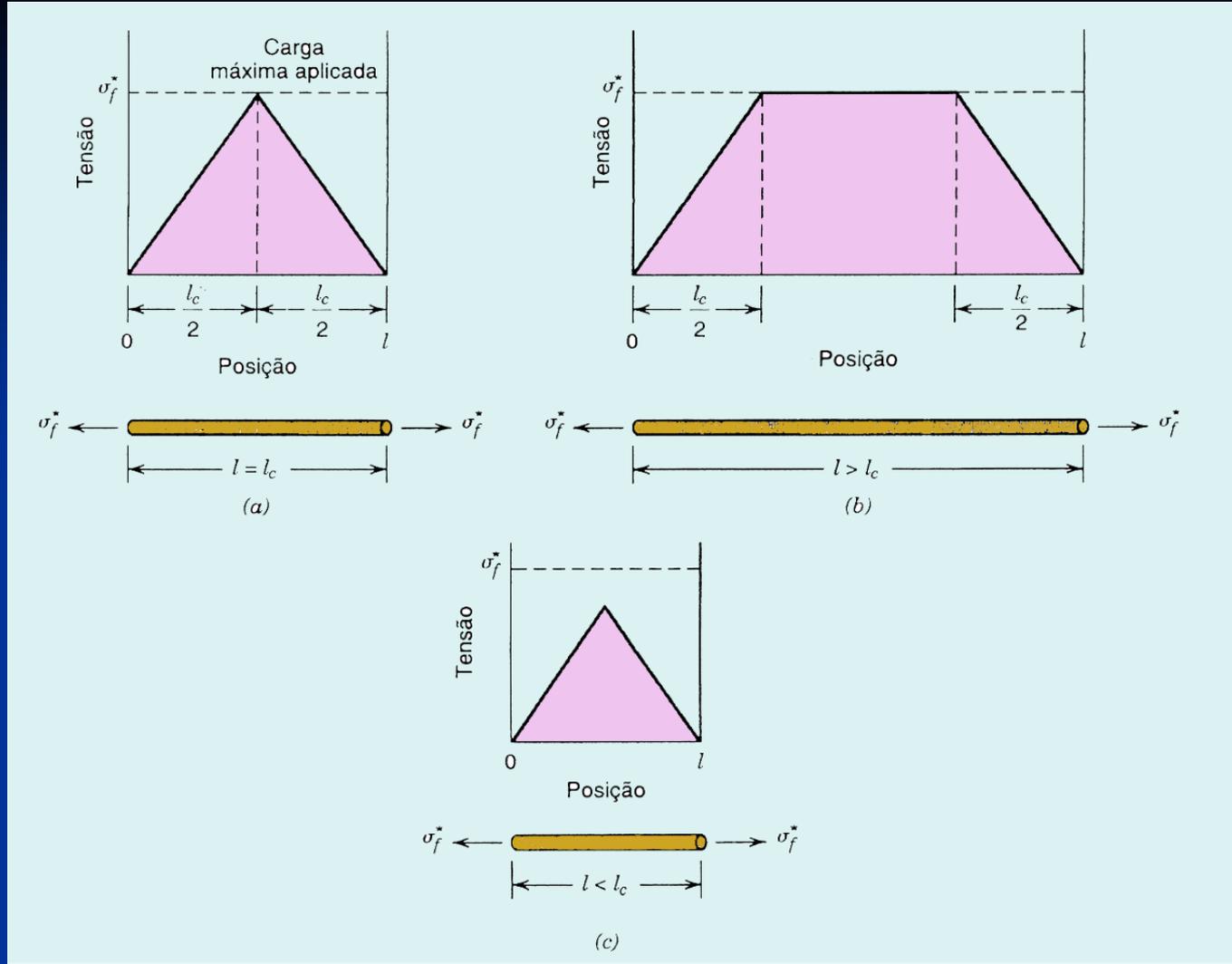
INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA FIBRA

- É necessário um certo COMPRIMENTO CRÍTICO, l_c , da fibra, para que haja um aumento efetivo da resistência mecânica e da rigidez do compósito.

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2 \tau_c} \quad (16.3)$$

onde d é o diâmetro da fibra, σ_f^* é o limite de resistência à tração e τ_c é o limite cisalhante da matriz.

- PARA VÁRIAS COMBINAÇÕES MATRIZ-FIBRA DE VIDRO OU DE CARBONO, O COMPRIMENTO CRÍTICO É DA ORDEM DE 1mm, VARIANDO ENTRE 20 E 150 VEZES O DIÂMETRO DA FIBRA.



Perfis tensão–posição quando o comprimento da fibra, l_c , é (a) $l = l_c$ (b) $l > l_c$ (c) $l < l_c$, para um compósito reforçado com fibras submetido a uma tensão de tração igual ao limite de resistência à tração da fibra, σ_f^* .

INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA FIBRA

- Para $l \gg l_c$ (normalmente $l > 15 l_c$),

FIBRAS CONTÍNUAS.

- Para comprimentos menores, $l < l_c$

FIBRAS DESCONTÍNUAS OU CURTAS

Quando $l \ll l_c$, a matriz deforma-se ao redor da fibra, quase não existe transferência de tensão e ocorre apenas um pequeno reforço devido à fibra. Estes são os compósitos particulados, já descritos.

AS FIBRAS DEVEM SE CONTÍNUAS, PARA QUE OCORRA UMA MELHORA SIGNIFICATIVA NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO COMPÓSITO.

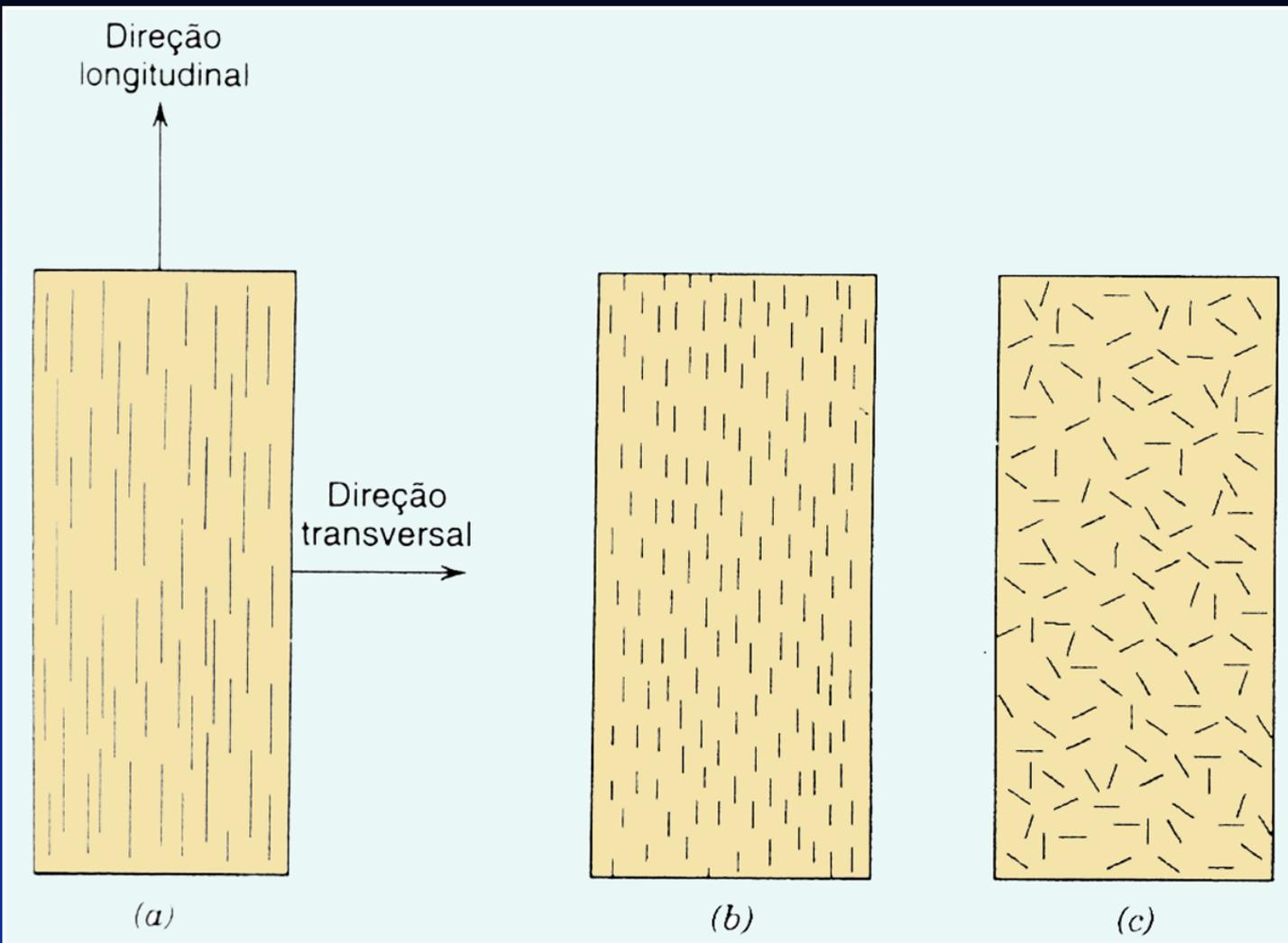
INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO E DA CONCENTRAÇÃO DA FIBRA

- O ARRANJO OU ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS UMAS EM RELAÇÃO ÀS OUTRAS
- A CONCENTRAÇÃO DAS FIBRAS
- A DISTRIBUIÇÃO DAS FIBRAS

TÊM INFLUÊNCIA SIGNIFICATIVA SOBRE A RESISTÊNCIA MECÂNICA E SOBRE OUTRAS PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS.

EM RELAÇÃO À ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS, OS DOIS EXTREMOS SÃO :

1. UM ALINHAMENTO PARALELO AO EIXO LONGITUDINAL DAS FIBRAS, EM UMA ÚNICA DIREÇÃO
2. UM ALINHAMENTO TOTALMENTE ALEATÓRIO, COMO ILUSTRA A FIGURA A SEGUIR:



Representações esquemáticas de compósitos reforçados com (a) fibras contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, e (c) descontínuas e aleatoriamente orientadas

INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO E DA CONCENTRAÇÃO DA FIBRA

- FIBRAS CONTÍNUAS:
 - ALINHADAS
- FIBRAS DESCONTÍNUAS:
 - ALINHADAS
 - ORIENTADAS ALEATORIAMENTE
 - PARCIALMENTE ORIENTADAS

A MELHOR COMBINAÇÃO GERAL DAS PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS É OBTIDA QUANDO A DISTRIBUIÇÃO DAS FIBRAS É UNIFORME

COMPÓSITOS COM FIBRAS CONTÍNUAS E ALINHADAS

COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO EM TRAÇÃO - CARREGAMENTO LONGITUDINAL

AS RESPOSTAS MECÂNICAS DEPENDEM DE VÁRIOS FATORES:

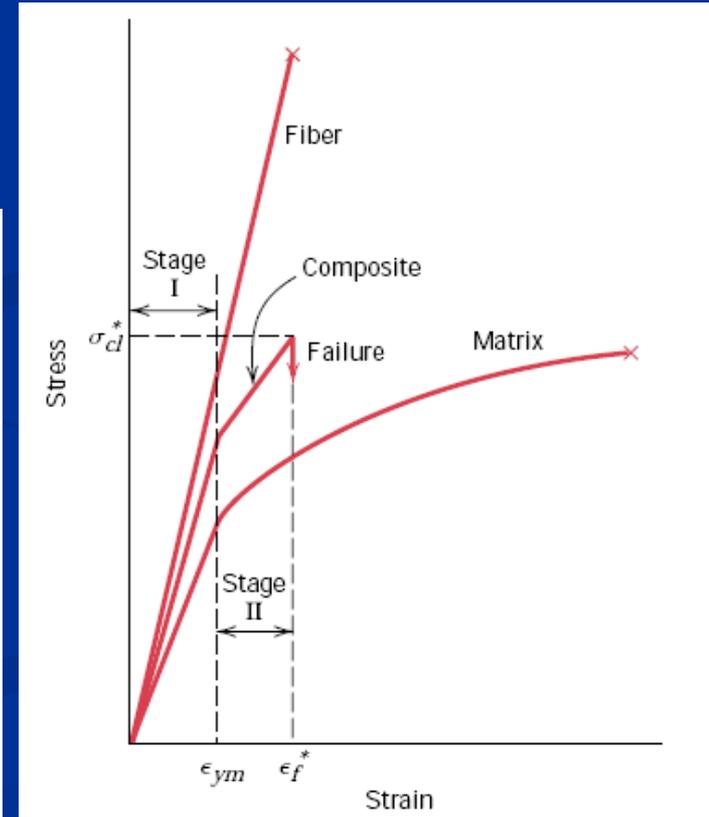
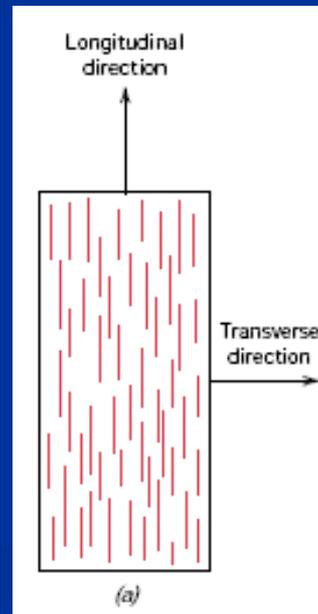
- COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DAS FASES FIBRA E MATRIZ
- FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS DAS FASES
- DIREÇÃO NA QUAL A TENSÃO OU CARGA É APLICADA

COMPÓSITO COM FIBRAS ALINHADAS - Ppdes ANISOTRÓPICAS

COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

- *Compósitos com fibras contínuas e alinhadas*
- *As respostas mecânicas desse tipo de compósito dependem do comportamento da fibra e da matriz, além da direção na qual a carga é aplicada.*

• *Para um carregamento na direção longitudinal se considerarmos o comportamento tensão-deformação da fibra como totalmente frágil e da matriz como dúctil, o compósito apresentará comportamento como o da figura. Inicialmente há deformação elástica da fibra e da matriz. No estágio II a matriz escoar e se deforma plasticamente enquanto que a fibra se estica elasticamente. O início da falha ocorre quando as fibras começam a se fraturar e não é catastrófica porque nem todas as fibras fraturam ao mesmo tempo*



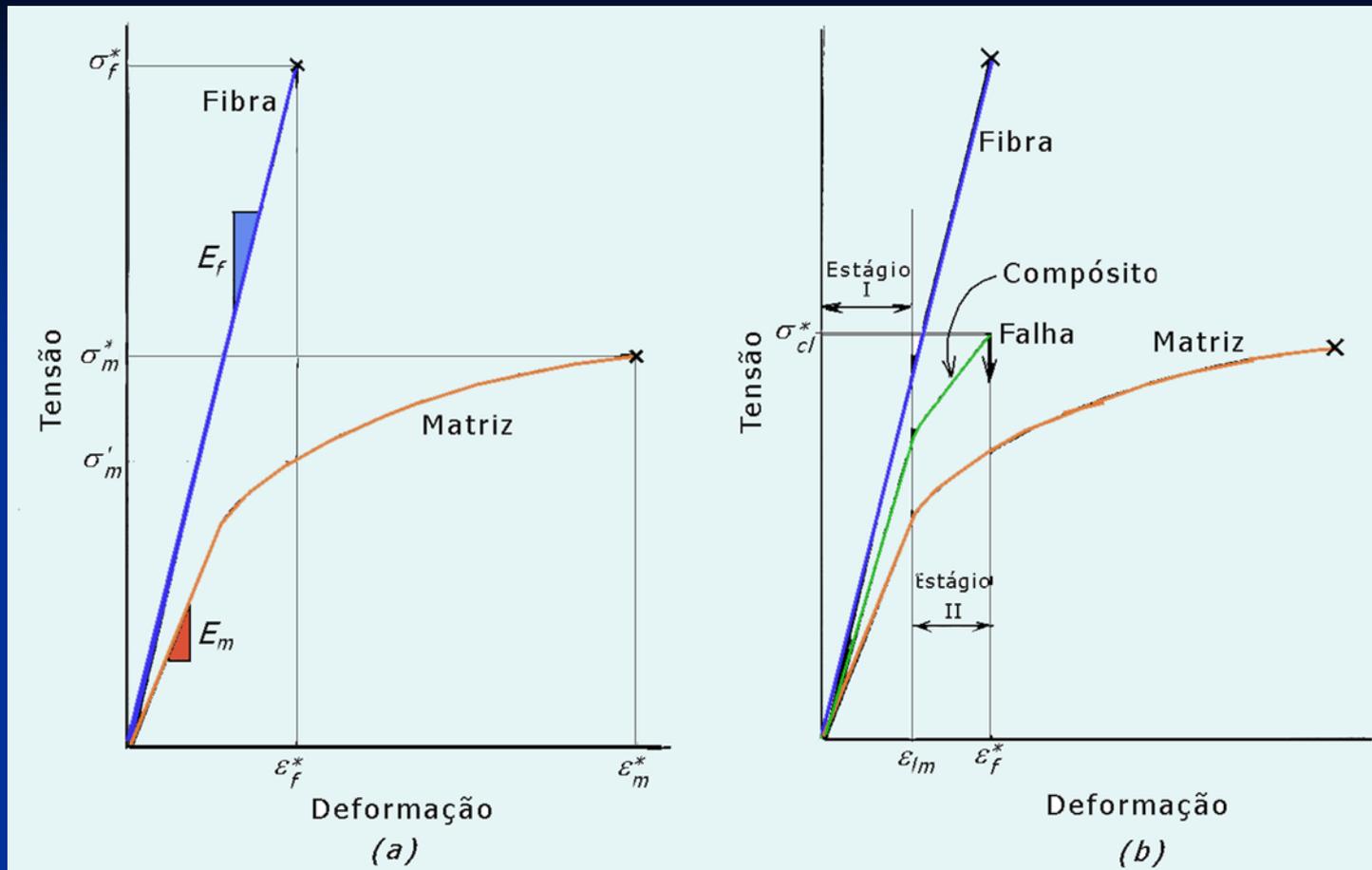
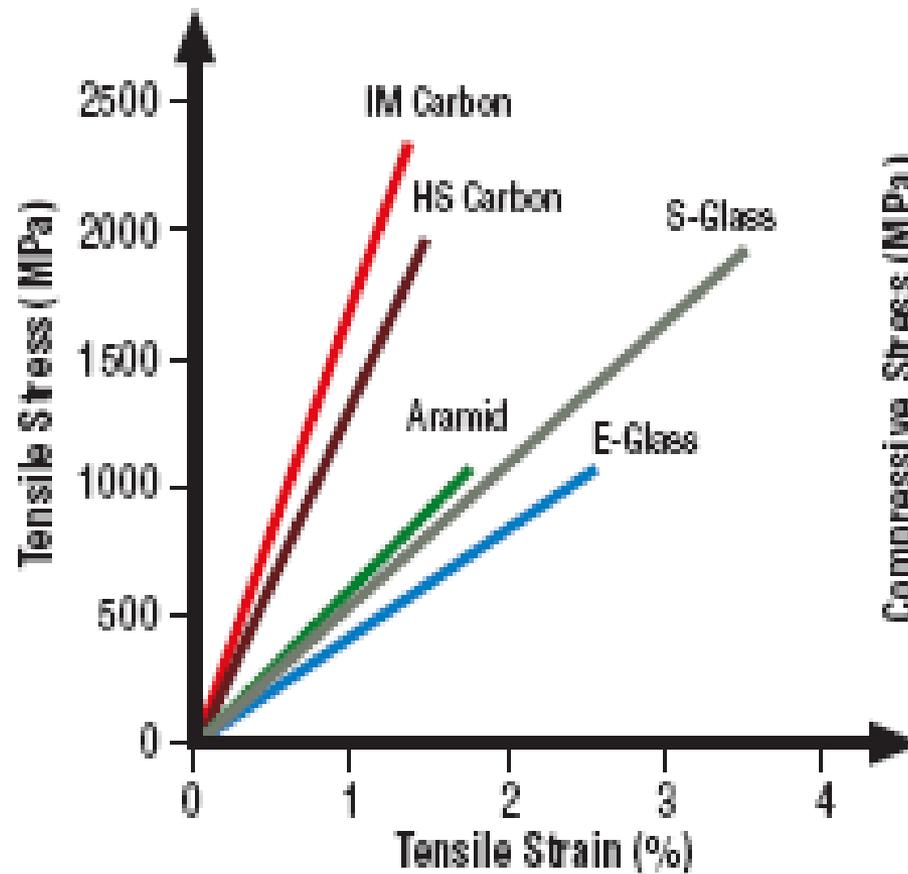
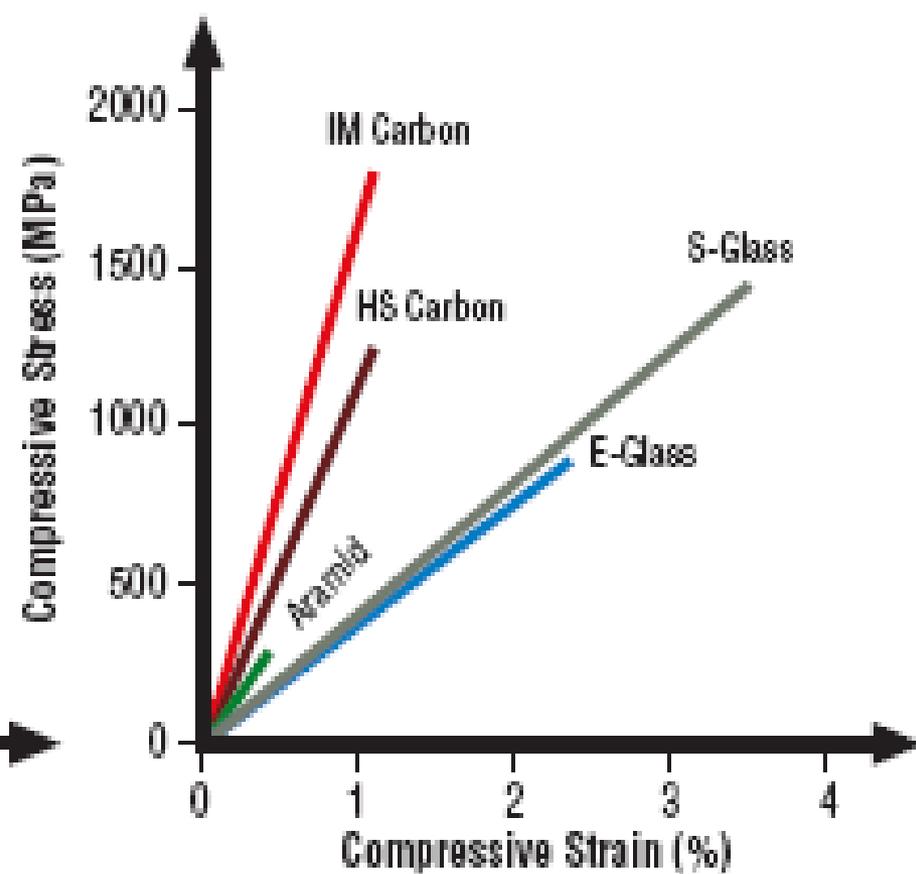


Fig (a) Curvas esquemáticas tensão-deformação para materiais com **fibra frágil e matriz dúctil**. As tensões e deformações na fratura para ambos os materiais estão anotadas (b) Curva esquemática tensão-deformação para um compósito reforçado com fibras alinhadas sob um tensão uniaxial aplicada na direção do alinhamento. As curvas apresentadas em (a) estão superpostas.

Propriedades Mecânicas - Fibras



Tensile Properties of U/D Prepreg Laminate



Compressive Properties of U/D Prepreg Laminates

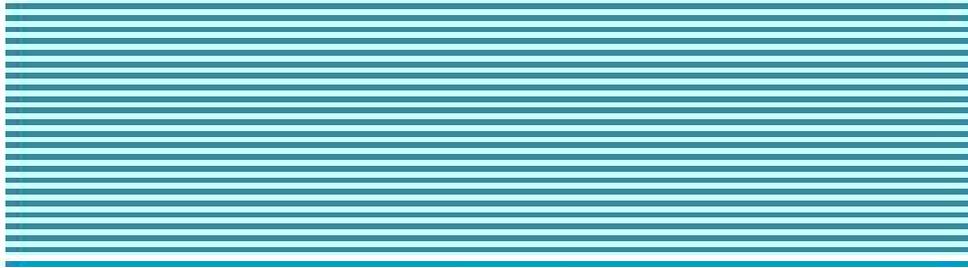
Propriedades Mecânicas - Fibras

Características de Diversos Materiais Usados para Reforço com Fibras

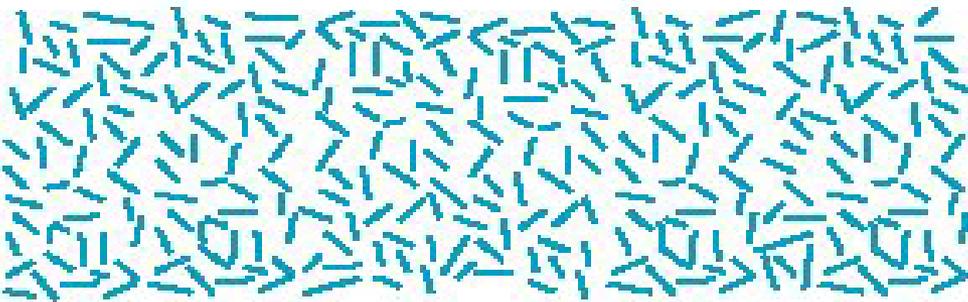
<i>Material</i>	<i>Densidade Relativa</i>	<i>Limite de Resistência à Tração [GPa (10⁶ psi)]</i>	<i>Resistência Específica (GPa)</i>	<i>Módulo de Elasticidade [GPa (10⁶ psi)]</i>	<i>Módulo Específico (GPa)</i>
Uísqueres					
Grafita	2,2	20 (3)	9,1	700 (100)	318
Nitreto de silício	3,2	5-7 (0,75-1,0)	1,56-2,2	350-380 (50-55)	109-118
Óxido de alumínio	4,0	10-20 (1-3)	2,5-5,0	700-1500 (100-220)	175-375
Carbeto de silício	3,2	20 (3)	6,25	480 (70)	150
Fibras					
Óxido de alumínio	3,95	1,38 (0,2)	0,35	379 (55)	96
Aramida (Kevlar 49)	1,44	3,6-4,1 (0,525-0,600)	2,5-2,85	131 (19)	91
Carbono ^a	1,78-2,15	1,5-4,8 (0,22-0,70)	0,70-2,70	228-724 (32-100)	106-407
Vidro E (<i>E-Glass</i>)	2,58	3,45 (0,5)	1,34	72,5 (10,5)	28,1
Boro	2,57	3,6 (0,52)	1,40	400 (60)	156
Carbeto de silício	3,0	3,9 (0,57)	1,30	400 (60)	133
UHMWPE (Spectra 900) (Polietileno com Peso Molecular Ultra-Alto)	0,97	2,6 (0,38)	2,68	117 (17)	121
Arames Metálicos					
Aço de alta resistência	7,9	2,39 (0,35)	0,30	210 (30)	26,6
Molibdênio	10,2	2,2 (0,32)	0,22	324 (47)	31,8
Tungstênio	19,3	2,89 (0,42)	0,15	407 (59)	21,1

^aO termo "carbono", em vez de "grafita", é usado para identificar essas fibras, uma vez que elas são compostas por regiões cristalinas de grafita e também por material não-cristalino e áreas com desalinhamento do cristal.

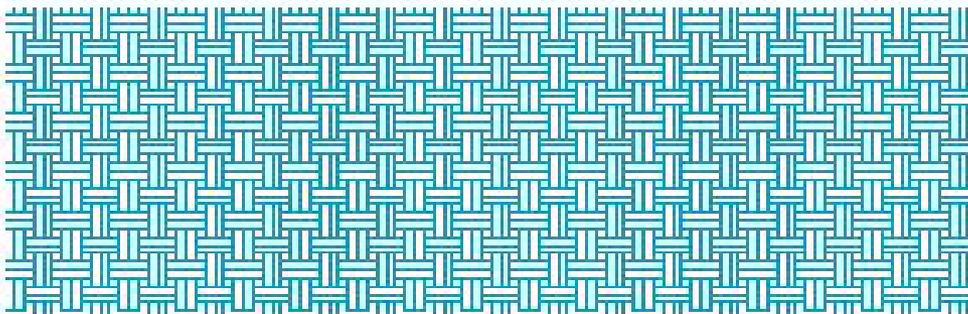
COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS



(a)



(b)



(c)

Alguns arranjos típicos de fibras em cada camada de compósito

- a) Fibras unidireccionais contínuas
- b) Fibras descontínuas orientadas de modo aleatório
- c) Fibras unidireccionais tecidas ortogonalmente

COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

- *Compósitos com fibras descontínuas e desalinhadas*
- *Embora a eficiência da fibras descontínuas seja menor que para as fibras contínuas elas estão se tornando cada vez mais importantes no mercado comercial*
- *Fibras de vidros picadas são os reforços desse tipo usados com maior freqüência. Contudo, fibras descontínuas de carbono também são utilizadas em compósitos.*

- *Compósitos com fibras descontínuas e aleatoriamente orientadas*
- *Quando a orientação da fibra é aleatória são usadas fibras curtas e descontínuas. A tabela mostra o reforço que é possível se obter*

<i>Property</i>	<i>Unreinforced</i>	<i>Fiber Reinforcement (vol%)</i>		
		<i>20</i>	<i>30</i>	<i>40</i>
Specific gravity	1.19–1.22	1.35	1.43	1.52
Tensile strength [MPa (ksi)]	59–62 (8.5–9.0)	110 (16)	131 (19)	159 (23)
Modulus of elasticity [GPa (10 ⁶ psi)]	2.24–2.345 (0.325–0.340)	5.93 (0.86)	8.62 (1.25)	11.6 (1.68)
Elongation (%)	90–115	4–6	3–5	3–5
Impact strength, notched Izod (lb _f /in.)	12–16	2.0	2.0	2.5

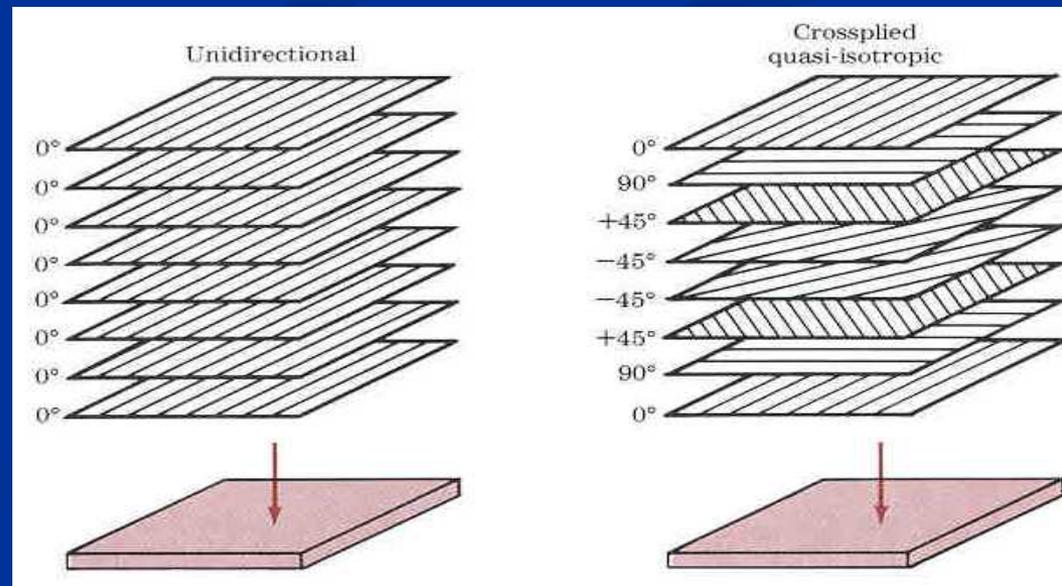
MATERIAIS COMPOSTOS COM FIBRAS CONTÍNUAS E ALINHADAS

RESPOSTAS MECÂNICAS DEPENDEM DE VÁRIOS FATORES

- Comportamento tensão-deformação das fases fibra e matriz
- Frações volumétricas das fases
- Direção na qual a tensão ou carga é aplicada

Materiais Composto com fibras alinhadas :

Propriedades **ANISOTRÓPICAS**: dependem da direção na qual são medidas



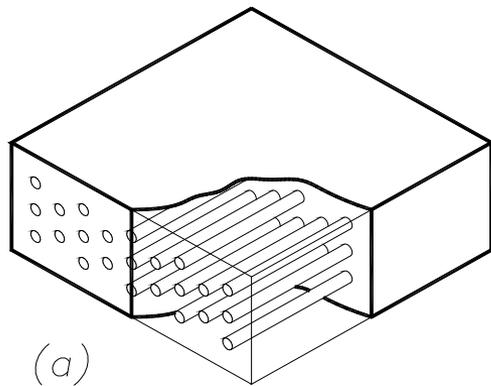
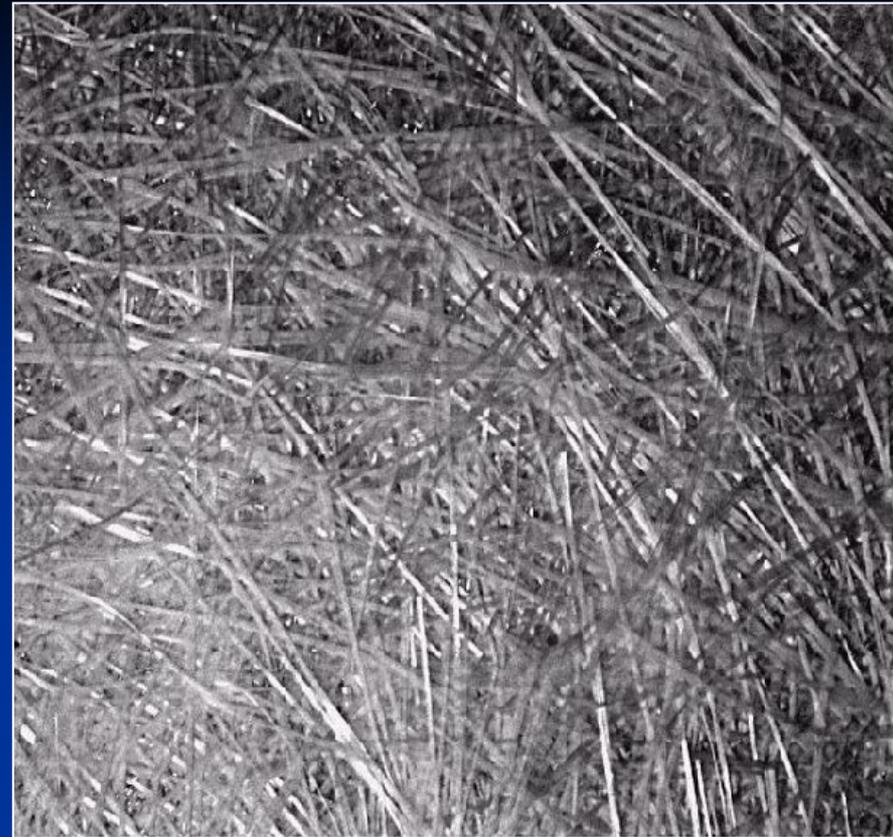
CAMADAS EM COMPÓSITOS LAMINARES

a) Compósitos unidireccionais

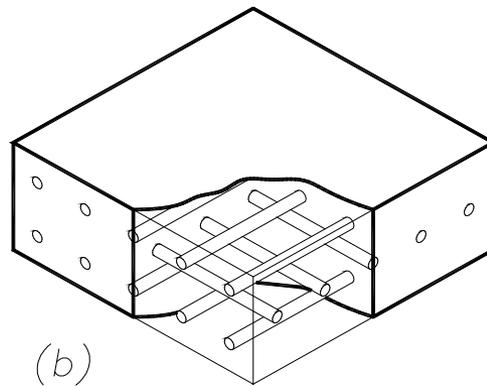
b) Compósitos tipo 0/90

c) Compósitos tipo $+\theta/-\theta$

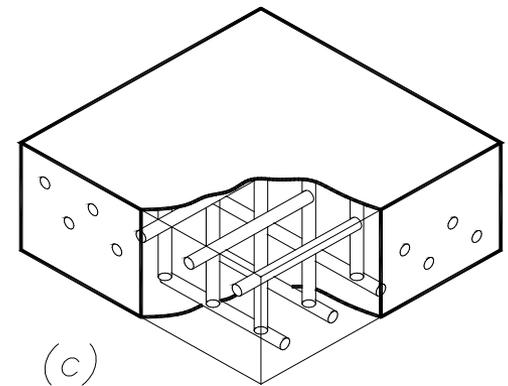
À direita: Disposição aleatória
de fibras longas



(a)



(b)



(c)

TABELA Eficiência do Reforço de Compósitos Reforçados com Fibras em Diferentes Orientações das Fibras e a Várias Direções de Aplicação de Tensão

Orientação da Fibra	Direção da Tensão	Eficiência do Reforço
Todas as fibras paralelas	Paralelas às fibras	1
	Perpendicular às fibras	0
Fibras distribuídas aleatoria e uniformemente dentro de um plano específico	Qualquer direção dos planos das fibras	$3/8$
Fibras distribuídas aleatória e uniformemente nas três dimensões do espaço	Qualquer direção	$1/5$

PREVISÃO DE PROPRIEDADES

PROPRIEDADES PREVISÍVEIS

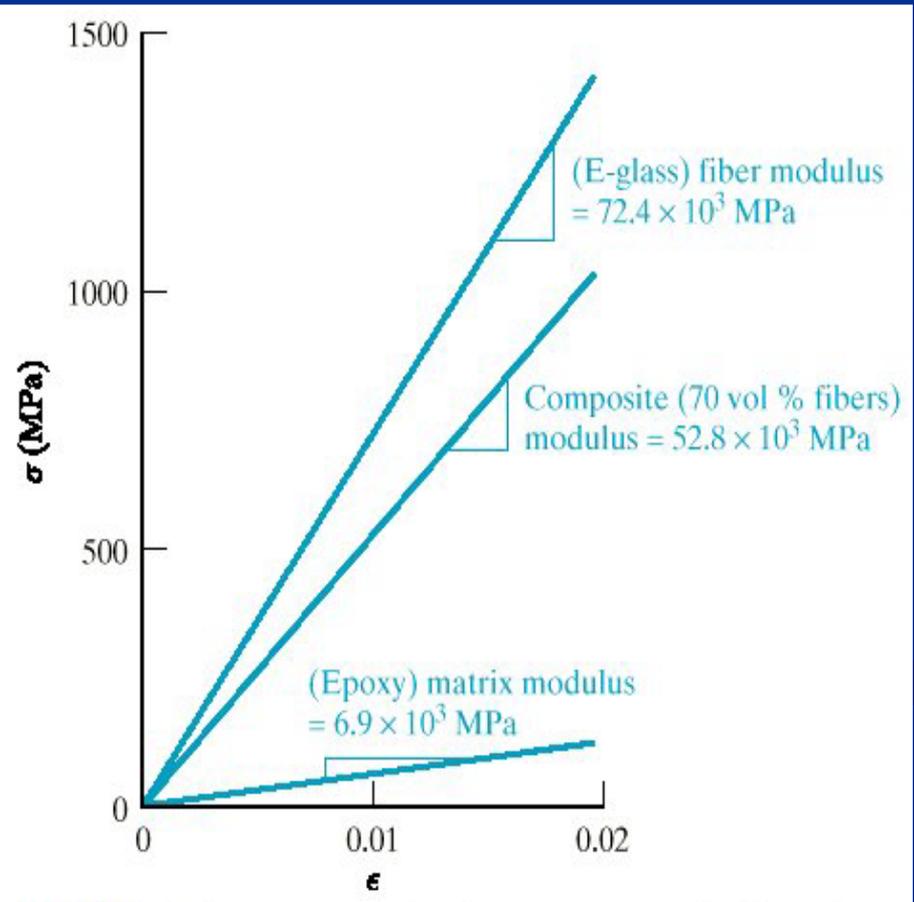
- DENSIDADE
- MÓDULOS de ELASTICIDADE
- CONDUTIVIDADE TÉRMICA E ELÉTRICA

$$\rho_{COMP.} = V_f \rho_f + V_m \rho_m$$

$$E_L = V_f E_f + V_m E_m$$

$$\frac{1}{E_T} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m}$$

A resistência mecânica é fortemente dependente da ligação entre fibras e matriz, sendo por isso difícil de prever teoricamente !



COMPÓSITOS COM FIBRAS CONTÍNUAS E ALINHADAS

■ ESTÁGIO I

- DEFORMAÇÃO ELÁSTICA, FIBRA, MATRIZ E COMPÓSITO

■ ESTÁGIO II

- A MATRIZ ESCOA E DEFORMA-SE PLASTICAMENTE, ϵ_{lm} ENQUANTO QUE AS FIBRAS DEFORMAM-SE ELASTICAMENTE, POIS O LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS FIBRAS É MUITO MAIOR DO QUE O LIMITE DE ESCOAMENTO DA MATRIZ

■ FRATURA

- O INÍCIO DA FALHA SE DÁ À MEDIDA QUE AS FIBRAS COMEÇAM A FRATURAR, A UMA DEFORMAÇÃO DE APROX. ϵ_f^* . A FALHA DE UM COMPÓSITO NÃO É CATASTRÓFICA POR DUAS RAZÕES :

1. NEM TODAS AS FIBRAS FRATURAM AO MESMO TEMPO.

2. MESMO APÓS A FALHA DA FIBRA, A MATRIZ AINDA ENCONTRA-SE INTACTA, POIS AS FIBRAS FRATURADAS AINDA ESTÃO INSERIDAS NO INTERIOR DA MATRIZ, E SÃO CAPAZES DE SUPORTAR UMA CARGA REDUZIDA ENQUANTO A MATRIZ CONTINUA SEU PROCESSO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA.

$$\epsilon_f^* < \epsilon_m^*$$

COMPORTAMENTO ELÁSTICO CARREGAMENTO LONGITUDINAL

COMPORTAMENTO ELÁSTICO DE UM COMPÓSITO FIBROSO CONTÍNUO E ORIENTADO, CARREGADO NA DIREÇÃO DO ALINHAMENTO DAS FIBRAS. ADMITE-SE UMA BOA LIGAÇÃO INTERFACIAL FIBRA-MATRIZ. SITUAÇÃO DE *ISODEFORMAÇÃO*:

$$F_c = F_m + F_f \quad (16.4)$$

Como

$$F = \sigma A$$

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \quad (16.5)$$

$$\sigma_c = \sigma_m \frac{A_m}{A_c} + \sigma_f \frac{A_f}{A_c} \quad (16.6)$$

$$A_m/A_c \text{ e } A_f/A_c$$

são as frações das áreas das fases matriz e fibra respectivamente

Se os comprimentos do compósito, da matriz e da fibra forem iguais,

$$A_m/A_c = V_m$$

V_m é a fração volumétrica da matriz

Para as fibras (de maneira análoga), $V_f = A_f/A_c$

E a Eq.16.6 fica :

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (16.7)$$

A hipótese de um estado de isodeformação significa que :

$$\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f \quad (16.8)$$

Ou :

$$\frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} V_f \quad (16.9)$$

SE AS DEFORMAÇÕES FOREM ELÁSTICAS,

$$\frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = E_c ; \quad \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} = E_m ; \quad \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} = E_f$$

Onde E= módulo de elasticidade das respectivas fases. Substituindo os valores na Eq.16.9, para um compósito fibroso alinhado na direção longitudinal, para o módulo de elasticidade, tem-se :

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f \quad (16.10a)$$

$$E_{cl} = E_m (1 - V_f) + E_f V_f \quad (16.10b)$$

Pois $V_m + V_f = 1$

Ainda, pode ser demonstrado que

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} \quad (16.11)$$

PROBLEMA – EXEMPLO 16.1

Um compósito reforçado com fibras de vidro contínuas e alinhadas consiste de 40%vol de fibras de vidro com módulo de elasticidade de 69 GPa (10×10^6 psi) e 60% (100-40) de uma resina poliéster que, quando endurecida, exibe um módulo de elasticidade de 3,4 Gpa ($0,5 \times 10^6$ psi):

- a) Calcule o módulo de elasticidade do compósito, na direção longitudinal
- b) Se a área da seção reta é de 250 mm^2 ($0,4 \text{ pol}^2$) e é aplicada uma tensão de 50MPa (7250psi) na direção longitudinal, calcule a magnitude da carga suportada por cada uma das fases.
- c) Determine a deformação que ocorre em cada fase quando a tensão da parte b) é aplicada.

SOLUÇÃO

$$E_f = 69 \text{ GPa}$$

$$E_m = 3,4 \text{ GPa}$$

a) Eq. 16.10a

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f$$

$$E_{cl} = E_m(1 - V_f) + E_f V_f$$

$$E_{cl} = 3,4 \times 0,6 + 69 \times 0,4 = 30 \text{ GPa}$$

b) Eq. 16.11

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m}$$

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{(69 \text{ GPa})(0,4)}{(3,4 \text{ GPa})(0,6)} = 13,5$$

ONDE:

$$F_f = 13,5 F_m; \quad \frac{F_f}{F_m} = 13,5$$

Ainda :

$$F_c = A_c \sigma = (250 \text{ mm}^2)(50 \text{ MPa}) = 12\,500 \text{ N}$$

Mas

$$F_c = F_f + F_m = 12\,500 \text{ N}$$

$$13,5 F_m + F_m = 12\,500 \text{ N}$$

e

$$F_m = 860 \text{ N}$$

Assim,

$$F_f = F_c - F_m = 12500 - 860 = 11\,640 \text{ N}$$

A fase fibra suporta a maior parte da carga aplicada

c) Áreas :

$$A_m = V_m A_c = (0,6) (250 \text{ mm}^2) = 150 \text{ mm}^2$$

$$A_f = V_f A_c = (0,4) (250 \text{ mm}^2) = 100 \text{ mm}^2$$

Tensões :

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_m} = \frac{860 \text{ N}}{150 \text{ mm}^2} = 5,73 \text{ MPa}$$

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A_f} = \frac{11\,640 \text{ N}}{100 \text{ mm}^2} = 116,4 \text{ MPa}$$

Deformações :

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} = \frac{5,73 \text{ MPa}}{3,4 \times 10^3 \text{ MPa}} = 1,69 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{116,4 \text{ MPa}}{69 \times 10^3 \text{ MPa}} = 1,69 \times 10^{-3}$$

AS DEFORMAÇÕES SÃO IDÊNTICAS PARA AS DUAS FASES : ISODEFORMAÇÃO

COMPORTAMENTO ELÁSTICO CARREGAMENTO TRANSVERSAL

A CARGA É APLICADA A 90° EM RELAÇÃO À DIREÇÃO AO ALINHAMENTO DAS FIBRAS. NESTA SITUAÇÃO, A TENSÃO DO COMPÓSITO, DAS FIBRAS E DA MATRIZ É A MESMA –

ISOTENSÃO:

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma$$

(16.12)

DEFORMAÇÃO:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f$$

(16.13)

COMO $\varepsilon = \sigma/E$

$$\frac{\sigma}{E_{ct}} = \frac{\sigma}{E_m} V_m + \frac{\sigma}{E_f} V_f$$

(16.14)

OU AINDA :

$$\frac{1}{E_{ct}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f}$$

(16.15)

COMPORTAMENTO ELÁSTICO – CARREGAMENTO TRANSVERSAL

O que leva a :

$$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m} \quad (16.15)$$

$$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{(1 - V_f) E_f + V_f E_m} \quad (16.16)$$

A Eq.16.16 é análoga à expressão para o limite inferior para compósitos particulados, Eq.16.2

PROBLEMA – EXEMPLO 17.2

CALCULE O MÓDULO DE ELASTICIDADE DO COMPÓSITO DESCRITO NO EXEMPLO 17.1, MAS CONSIDERE QUE A TENSÃO SEJA APLICADA PERPENDICULARMENTE AO ALINHAMENTO DA FIBRA.

SOLUÇÃO :

De acordo com Eq.17.16 :

$$E_{ct} = \frac{(3,4 \text{ GPa})(69 \text{ GPa})}{(0,6)(69 \text{ GPa}) + (0,4)(3,4 \text{ GPa})}$$

$$E_{ct} = 5,5 \text{ GPa}$$

O valor encontrado para o módulo do compósito é superior ao encontrado para a matriz. Mas de acordo com o Ex. 17.1, é aproximadamente 1/5 do módulo de elasticidade ao longo da direção da fibra (E_{cl}), o que indica o grau de anisotropia dos compósitos com fibras contínuas e orientadas

LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO LONGITUDINAL

A **RESISTÊNCIA** é normalmente tomada como sendo a tensão máxima da curva tensão-deformação. Em geral, este ponto corresponde à fratura da fibra e marca o início da falha do compósito. A falha deste tipo de compósito é complexa e diferentes modos de falhas são possíveis. O modo operante dependerá

1. Das propriedades das fases fibra e matriz e
2. Da natureza e da força de ligação interfacial entre a fibra e a matriz.

Se $\varepsilon_f^* < \varepsilon_m^*$ que é o caso mais usual, as fibras fraturam antes da matriz.

A resistência longitudinal do compósito é dada por :

$$\sigma_{cl}^* = \sigma_m' (1 - V_f) + \sigma_f^* V_f \quad (17.17)$$

σ_m' : tensão da matriz no momento em que ocorre a falha da fibra e

σ_f^* : representa o limite de resistência à tração da fibra.

Tabela 16.1

Limites de Resistência à Tração Longitudinal e Transversal Típicos para Três Compósitos Reforçados com Fibras Unidirecionais^a

<i>Material</i>	<i>Limite de Resistência à Tração Longitudinal (MPa)</i>	<i>Limite de Resistência à Tração Transversal (MPa)</i>
Vidro-poliéster	700	20
Carbono (alto módulo)-epóxi	1000	35
Kevlar-epóxi	1200	20

^aO teor de fibras para cada compósito é de aproximadamente 50 %v.

Fonte: D. Hull e T. W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials*, 2nd edition, Cambridge University Press, Nova York, 1996, p. 179.

Verificação de Conceitos 16.2 A tabela a seguir lista quatro compósitos hipotéticos reforçados com fibras alinhadas (identificados por A a D), juntamente com suas características. Com base nesses dados, classifique os quatro compósitos em ordem decrescente de resistência na direção longitudinal, justificando sua classificação.

<i>Compósito</i>	<i>Tipo de Fibra</i>	<i>Fração Volumétrica das Fibras</i>	<i>Resistência das Fibras (MPa)</i>	<i>Comprimento Médio das Fibras (mm)</i>	<i>Comprimento Crítico (mm)</i>
A	Vidro	0,20	$3,5 \times 10^3$	8	0,70
B	Vidro	0,35	$3,5 \times 10^3$	12	0,75
C	Carbono	0,40	$5,5 \times 10^3$	8	0,40
D	Carbono	0,30	$5,5 \times 10^3$	8	0,50

[A resposta está disponível no site da LTC Editora.]

LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO TRANSVERSAL

AS RESISTÊNCIAS DE COMPOSTOS FIBROSOS CONTÍNUOS E UNIDIRECIONAIS SÃO ANISOTRÓPICAS. ESTES COMPOSTOS SÃO PROJETADOS PARA SEREM CARREGADOS AO LONGO DA DIREÇÃO LONGITUDINAL, DE MAIS ALTA RESISTÊNCIA. MAS, EM CONDIÇÕES DE SERVIÇO, TAMBÉM PODEM ESTAR PRESENTES CARGAS DE TRAÇÃO TRANSVERSAIS. ASSIM, PODEM OCORRER FALHAS PREMATURAS, POIS O LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA DIREÇÃO TRANSVERSAL É EXTREMAMENTE BAIXO.

FATORES :

1. Propriedades da fibra e da matriz
2. Resistência da ligação fibra-matriz
3. Presença de vazios.

OS METODOS EMPREGADOS PARA AUMENTAR A RESISTÊNCIA TRANSVERSAL DESTES COMPOSTOS, GERALMENTE ENVOLVEM A MODIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADE DA MATRIZ

Tabela 16.1

Limites de Resistência à Tração Longitudinal e Transversal Típicos para Três Compósitos Reforçados com Fibras Unidirecionais^a

<i>Material</i>	<i>Limite de Resistência à Tração Longitudinal (MPa)</i>	<i>Limite de Resistência à Tração Transversal (MPa)</i>
Vidro-poliéster	700	20
Carbono (alto módulo)-epóxi	1000	35
Kevlar-epóxi	1200	20

Compósitos com Fibras Descontínuas e Alinhadas

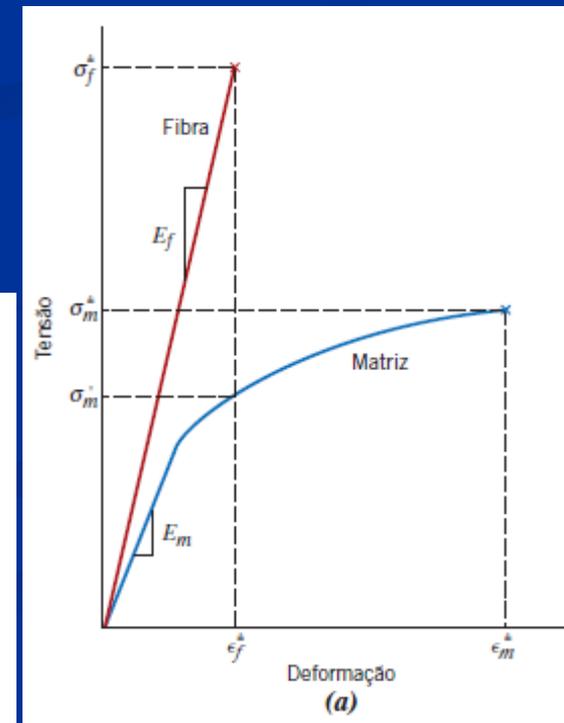
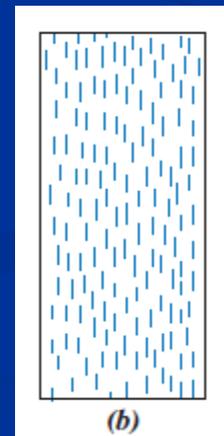
Embora a eficiência do reforço seja menor para as fibras descontínuas do que para as fibras contínuas, os Compósitos de fibras descontínuas e alinhadas estão se tornando cada vez mais importante comercialmente devido ao custo/benefício. Misturas entre fibras picadas de vidro e carbono e/ou aramida tem sido empregadas cada vez mais. Esses compósitos com fibras curtas podem ser produzidos tendo módulo de elasticidade e limites de resistência à tração que se aproximam respectivamente, de 90% e 50% dos seus análogos com fibras contínuas.

Para um compósito com fibras descontínuas e alinhadas com uma distribuição uniforme das fibras e para o qual $l > l_c$ a resistência longitudinal (C^*_{cd}) é dada pela relação:

$$\sigma_{cd}^* = \sigma_f^* V_f (1 - (l_c/2l)) + \sigma'_m (1 - V_f)$$

Para $l > l_c$

σ_f^* e σ'_m representam respectivamente, a resistência à ruptura da fibra e a tensão na matriz quando o compósito falha.



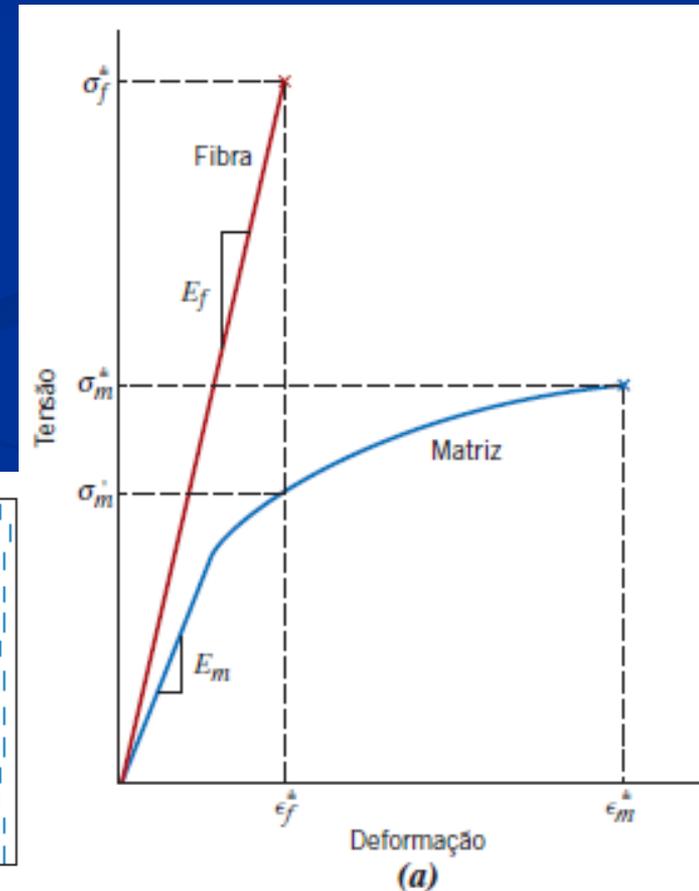
Compósitos com Fibras Descontínuas e Alinhadas

Se o comprimento da fibra for menor que o compósito crítico ($l < l_c$), então a resistência longitudinal do compósito (σ_{cd}^*) é dada por:

$$\sigma_{cd}^* = \left(\frac{lt_c}{d}\right)V_f + \sigma'_m(1 - V_f)$$

Para $l < l_c$

Onde, d é o diâmetro da fibra, t_c é o menor valor entre a resistência da ligação fibra-matriz e o limite de escoamento em cisalhamento da matriz



Compósitos com Fibras Descontínuas e Orientadas Aleatoriamente

Compósitos com Fibras Descontínuas e Orientadas Aleatoriamente

Normalmente, quando a orientação da fibra é aleatória, são usadas fibras curtas e descontínuas; um reforço desse tipo está mostrado esquematicamente na Figura 16.8c. Sob essas circunstâncias, pode ser utilizada uma expressão da *regra das misturas* para o módulo de elasticidade similar à Equação 16.10a, como a seguir:

$$E_{cd} = KE_fV_f + E_mV_m \quad (16.20)$$

Nessa expressão, K é um parâmetro de eficiência da fibra que depende de V_f e da razão E_f/E_m . Sua magnitude será menor que a unidade, ficando geralmente na faixa entre 0,1 e 0,6. Dessa forma, para um reforço de fibras aleatórias (da mesma forma como ocorre para as fibras orientadas), o módulo aumenta com o aumento da fração volumétrica da fibra. A Tabela 16.2, que fornece algumas propriedades mecânicas de policarbonatos sem reforço e reforçados com fibras de vidro descontínuas e orientadas aleatoriamente, sugere a magnitude do reforço que pode ser obtido.



Tabela 16.2

Propriedades de Polícarbonatos sem Reforço e Reforçados com Fibras de Vidro Orientadas Aleatoriamente

<i>Propriedade</i>	<i>Não Reforçada</i>	<i>Valores para uma Dada Quantidade de Reforço (%v)</i>		
		<i>20</i>	<i>30</i>	<i>40</i>
Massa específica	1,19–1,22	1,35	1,43	1,52
Limite de resistência à tração [MPa (ksi)]	59–62 (8,5–9,0)	110 (16)	131 (19)	159 (23)
Módulo de elasticidade [GPa (10 ⁶ psi)]	2,24–2,345 (0,325–0,340)	5,93 (0,86)	8,62 (1,25)	11,6 (1,68)
Alongamento (%)	90–115	4–6	3–5	3–5
Resistência ao impacto, Izod com entalhe (lb _f /in)	12–16	2,0	2,0	2,5

Fonte: Adaptado de Materials Engineering's *Materials Selector*, copyright © Penton/IPC.

Tabela 16.3

Eficiência do Reforço de Compósitos Reforçados com Fibras para Diferentes Orientações das Fibras e em Várias Direções de Aplicação da Tensão

<i>Orientação da Fibra</i>	<i>Direção da Tensão</i>	<i>Eficiência do Reforço</i>
Todas as fibras paralelas	Paralela às fibras	1
	Perpendicular às fibras	0
Fibras distribuídas aleatória e uniformemente em um plano específico	Qualquer direção no plano das fibras	$\frac{3}{8}$
Fibras distribuídas aleatória e uniformemente nas três dimensões no espaço	Qualquer direção	$\frac{1}{5}$

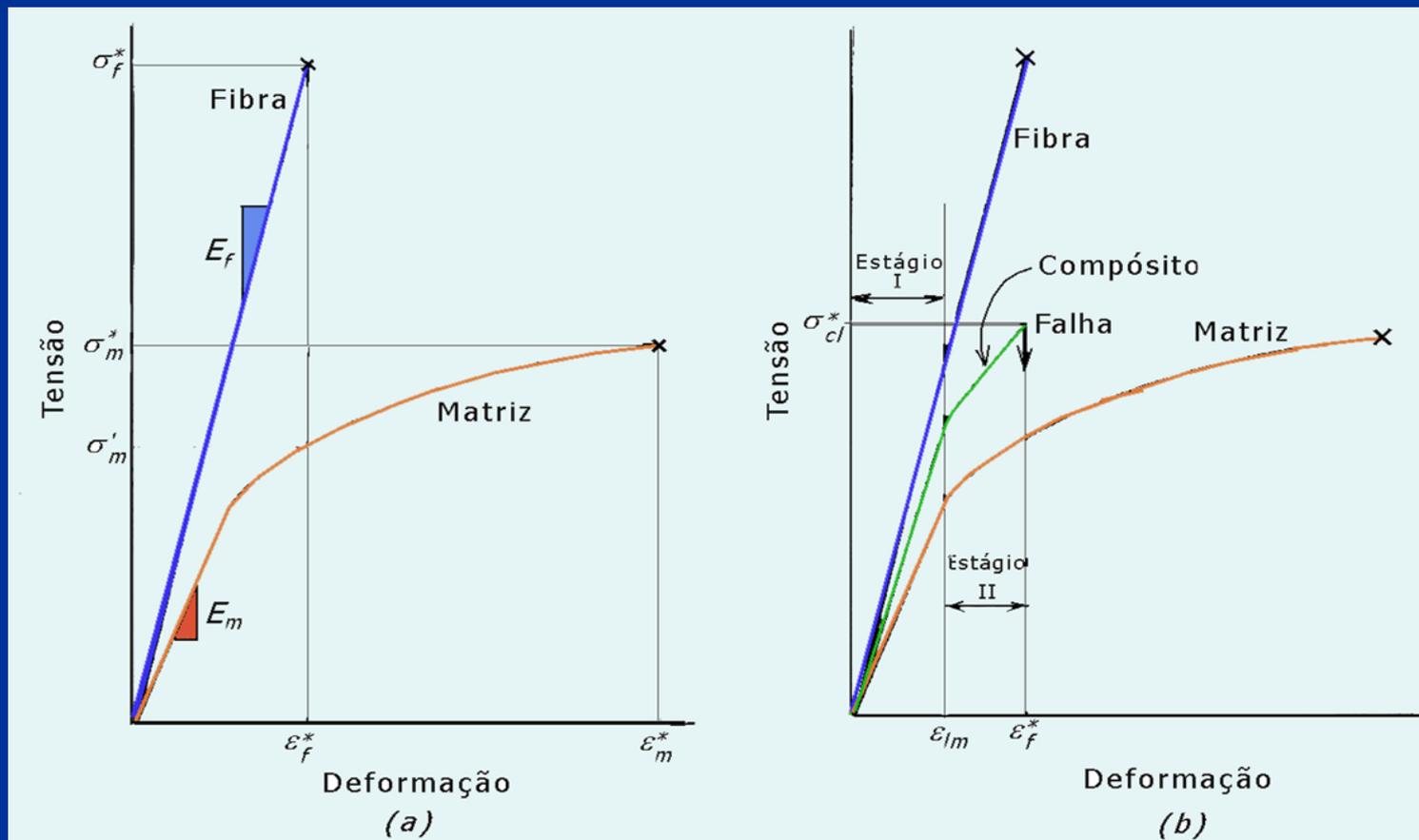
Fonte: H. Krenchel, *Fibre Reinforcement*, Copenhagen: Akademisk Forlag, 1964 [33].

FASE MATRIZ

- *A fase matriz de compósitos pode ser feita a partir de metais, cerâmicas e polímeros*
- *Em geral os metais e polímeros são utilizados como matriz devido à ductilidade. No caso dos compósitos com matriz cerâmica o que se deseja é melhorar a tenacidade à fratura*
- *No caso dos compósitos reforçados com fibras a fase matriz serve para várias funções:*
- *Liga as fibras umas as outras e atua como meio para distribuir tensões aplicadas*
- *Protege as fibras individuais contra danos superficiais como resultado de abrasão*
- *Separa as trincas umas das outras prevenindo a propagação de trincas frágeis de uma fibra para outra (serve como barreira para propagação de trincas)*
- *Mantém as fibras na orientação desejada*

Tipos de matriz

- 1. Boas propriedades mecânicas
- 2. Boas propriedades de adesivo
- 3. Boa propriedade de tenacidade
- 4. Boa resistência a degradação do meio ambiente.



CONTROLE DE PROPRIEDADES

PROPRIEDADES DA MATRIZ

Matrizes poliméricas têm em geral baixa resistência e baixo ponto de fusão

Matrizes metálicas têm maior resistência e maior ponto de fusão, mas são mais pesadas

Podem ser usadas matrizes cerâmicas para resistência a temperaturas extremamente elevadas, perdendo-se tenacidade

LIGAÇÃO FIBRA-MATRIZ

Se não houver boa aderência da matriz à fibra, não há distribuição de esforços eficiente

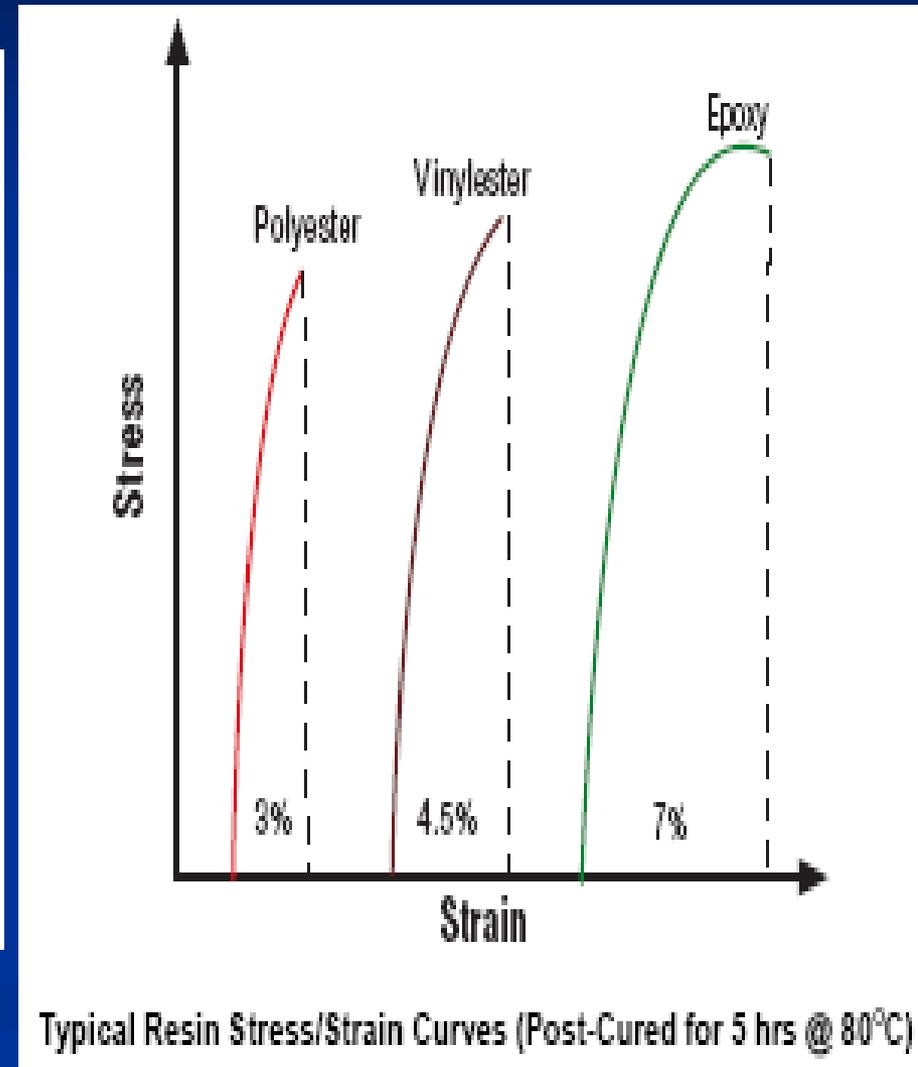
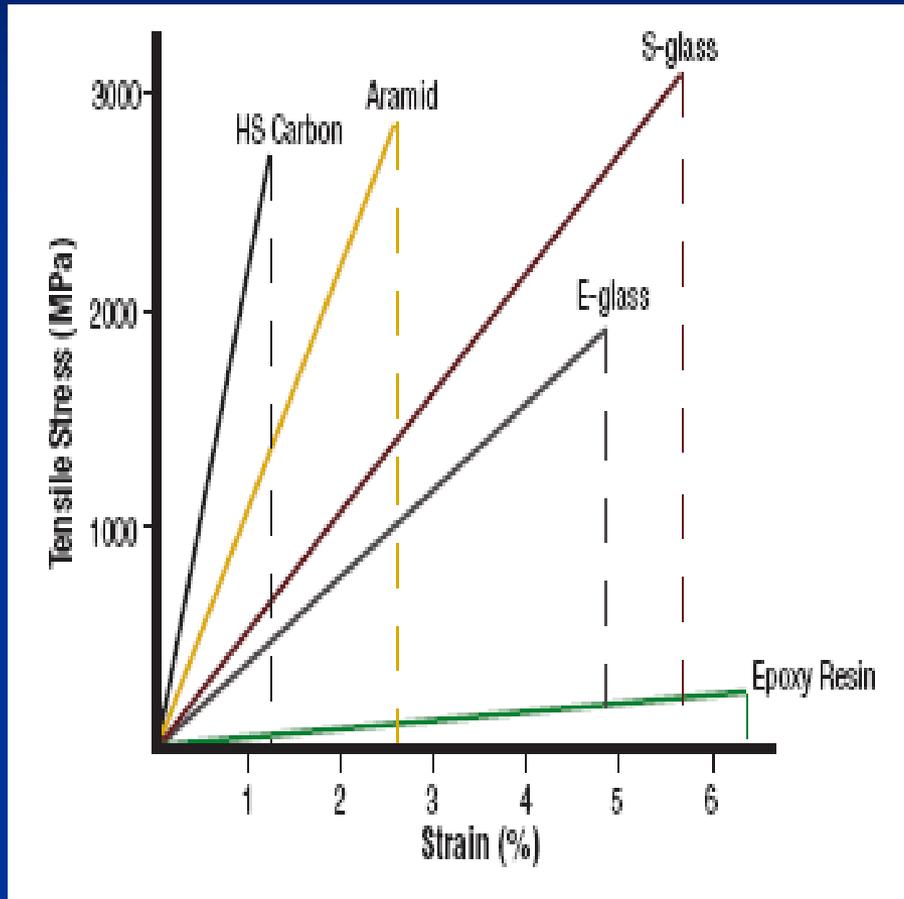
Existem fibras de Boro com revestimento de SiC, para aumentar a aderência

O coeficiente de expansão térmica deve ser muito semelhante entre fibras e matriz

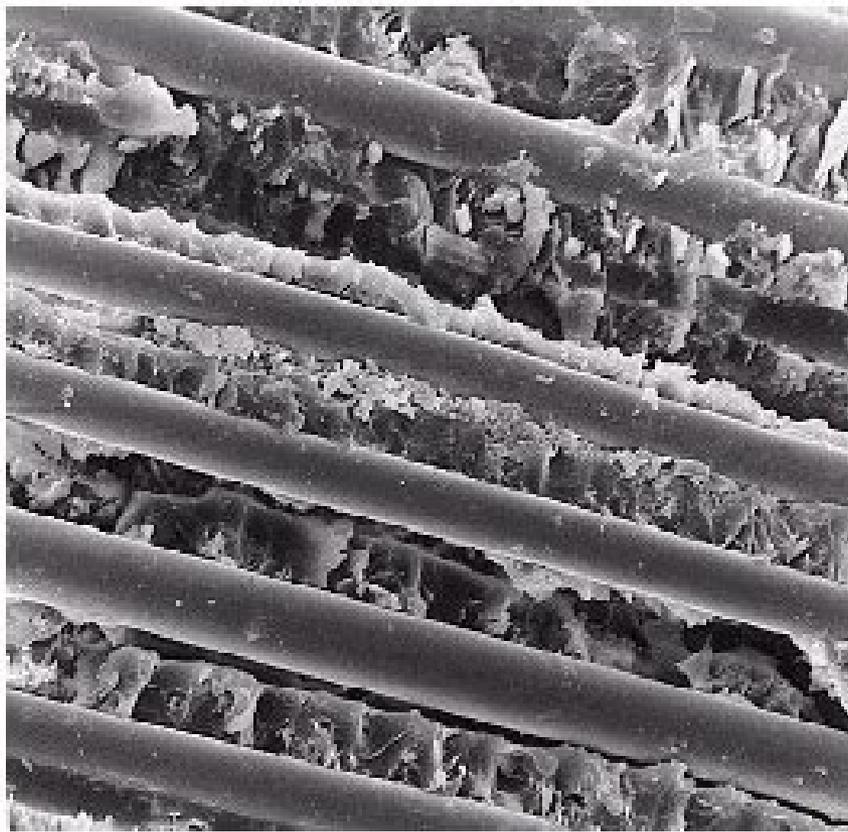
FRACÇÃO EM VOLUME DE FIBRAS

Quanto maior for este valor, maior será a resistência do compósito, até um **valor limite de 80%**, a partir do qual deixa de haver “molhagem” total das fibras pela matriz.

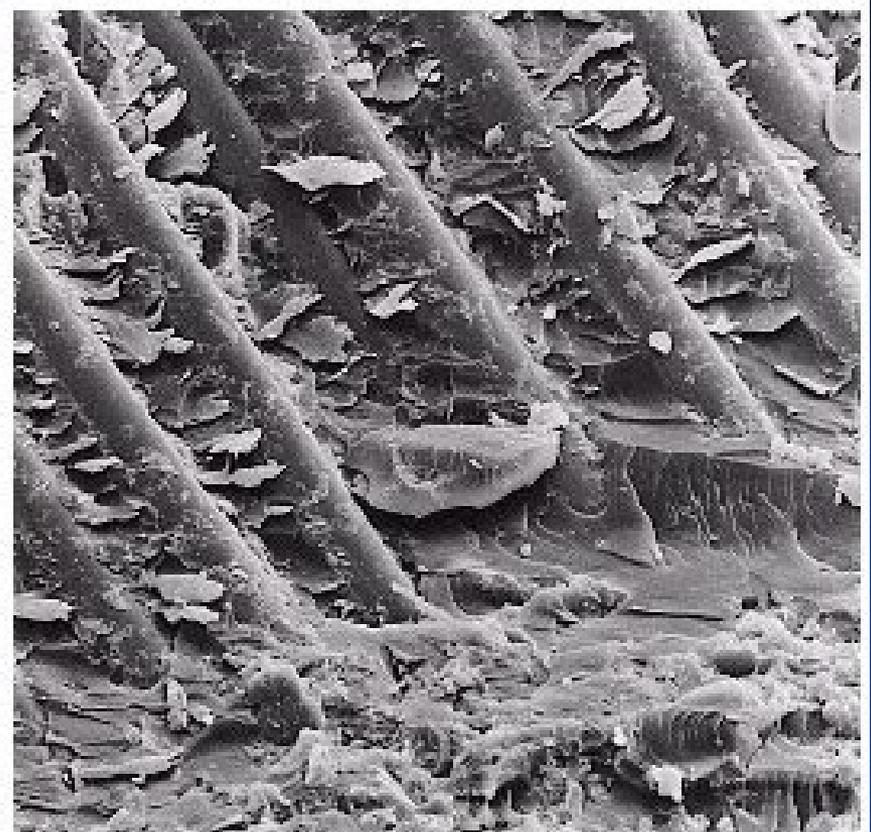
Resina X Fibra – Prop. Mecânica de Tração



Comparação propriedade Mecânica entre matriz (resina Epox) e fibras mais utilizadas.



(a)



(b)

(a) Fraca aderência entre as fibras e a matriz

(b) Excelente aderência entre fibras e matriz

COMPÓSITOS COM MATRIZ DE POLÍMERO

- *Os compósitos com matriz de polímero consistem em uma resina polimérica como fase matriz e fibras como meio de reforço*
- *Esses materiais são usados na mais ampla diversidade de aplicações de compósitos devido à suas propriedades a temperatura ambiente, de sua facilidade de fabricação e do custo*
- *A classificação dos compósitos com matriz de polímero é relacionada ao tipo de reforço:*
 - *Fibra de vidro*
 - *Fibra de aramida*
 - *Fibra de carbono*

COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO

- *As fibras de vidro têm uma menor resistência à tração e um módulo de elasticidade mais baixo do que as fibras de carbono e do que as fibras de aramida, embora apresentem um maior alongamento. A sua densidade é também maior, no entanto, devido à sua versatilidade e baixo custo, são de longe o material mais usado para reforçar os plásticos.*
- *Os compósitos de matriz polimérica reforçados por fibra de vidro apresentam as seguintes características:*
 - *Elevada relação resistência/peso*
 - *Boa estabilidade dimensional;*
 - *Boa resistência ao calor, a baixas temperaturas, à umidade e à corrosão*
 - *Boas propriedades de isolamento elétrico*
 - *Facilidade de fabrico*
 - *Custo relativamente baixo.*

COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO (CFRP – Carbon Fiber-Reinforced Polymer)

- A maioria das fibras de carbono são produzidas a partir de um componente básico conhecido como PAN (poliacrilonitrilo). Começaram a ser usadas na indústria náutica para a construção de lemes e mastros de barcos de competição em 1970.
- Os materiais compósitos constituídos por fibras de carbono são caracterizados por apresentarem uma combinação de baixo peso, resistência mecânica muito elevada e elevada rigidez.
- Estas propriedades fazem com que estes materiais sejam atrativos para aplicações aeroespaciais. Infelizmente, o custo relativamente elevado das fibras de carbono faz com que a sua utilização seja mais limitada em muitas outras indústrias como na automóvel.

As desvantagens das fibras de carbono é que:

- São quebradiças
- São as fibras mais caras



COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE ARAMIDO

É a designação genérica dada às fibras de poliamida aromática. Foram introduzidas no comércio com o nome de Kevlar, existindo dois tipos comerciais: o Kevlar 29 e o Kevlar 49.

- *São fibras de elevada resistência mecânica e baixa densidade*
- *O Kevlar 29: Utilizado em coletes à prova de bala, cordas e cabos.*
- *O Kevlar 49: A maior utilização destas fibras é na indústria aeroespacial, náutica e em carros de corrida*

PAREI
AQUI



Existem ainda fibras híbridas vidro-carbono; Kevlar/carbono

Polímero reforçado com Kevlar: material altamente resistente apesar de ser termoplástico e de baixa combustão

- Aramidas são estáveis até em temperaturas relativamente elevadas; a faixa de temperaturas ao longo da qual as aramidas mantêm suas propriedades mecânicas está entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $200\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Quimicamente são sensíveis a degradação por ácidos e bases fortes, mas são relativamente inertes em outros solventes e produtos químicos;

As fibras de aramida são utilizadas mais frequentemente em compósitos de matrizes poliméricas; materiais comuns para as matrizes são os epóxis e os poliésteres. Uma vez que as fibras são relativamente flexíveis e um tanto dúcteis, elas podem ser processadas usando as operações têxteis mais comuns. As aplicações típicas desses compósitos com aramidas são em produtos balísticos (coletes e blindagens balísticas), artigos esportivos, pneus, cordas, carcaças de mísseis, e vasos de pressão, e como um substituto para o amianto em freios automotivos e em revestimentos de embreagens e gaxetas.

As propriedades de compósitos com matriz epóxi reforçados com fibras contínuas e alinhadas, de vidro, carbono e aramidas estão apresentadas na Tabela 16.5. Dessa forma, é possível comparar as características mecânicas desses três materiais, tanto para a direção longitudinal quanto para a transversal.

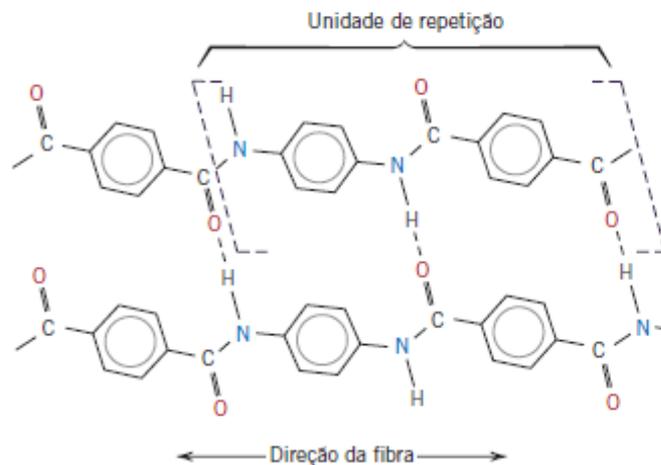


Figura 16.10 Representação esquemática da unidade de repetição e das estruturas das cadeias para as fibras aramidas (Kevlar). O alinhamento das cadeias com a direção das fibras e as ligações de hidrogênio que se formam entre cadeias adjacentes também estão mostrados.

[De F. R. Jones (Editor), *Handbook of Polymer-Fibre Composites*. Copyright © 1994, por Addison-Wesley Longman. Reimpresso com permissão.]

Tabela 16.5

Propriedades nas Direções Longitudinal e Transversal de Compósitos de Matriz Epóxi Reforçados com Fibras Contínuas e Alinhadas de Vidro, Carbono e Aramidas^a

<i>Propriedade</i>	<i>Vidro (Vidro-E)</i>	<i>Carbono (Alta Resistência)</i>	<i>Aramida (Kevlar 49)</i>
Massa específica	2,1	1,6	1,4
Módulo de tração			
Longitudinal [GPa (10 ⁶ psi)]	45 (6,5)	145 (21)	76 (11)
Transversal [GPa (10 ⁶ psi)]	12 (1,8)	10 (1,5)	5,5 (0,8)
Limite de resistência à tração			
Longitudinal [MPa (ksi)]	1020 (150)	1240 (180)	1380 (200)
Transversal [MPa (ksi)]	40 (5,8)	41 (6)	30 (4,3)
Deformação no limite de resistência à tração			
Longitudinal	2,3	0,9	1,8
Transversal	0,4	0,4	0,5

^aEm todos os casos, a fração volumétrica da fibra é de 0,60.

Fonte: Adaptado de R. F. Floral e S. T. Peters, "Composite Structures and Technologies", notas de aula, 1989.

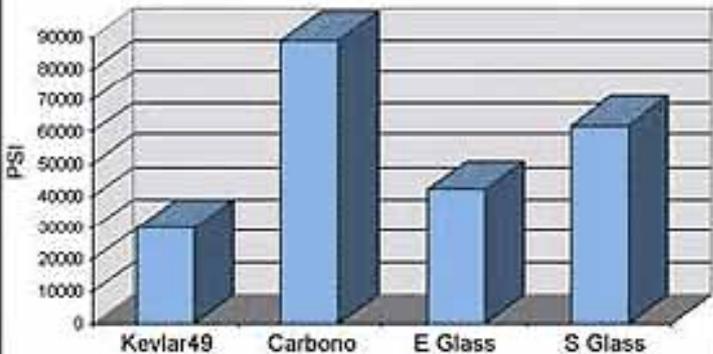
Tabela 16.9 Propriedades de Diversos Compósitos com Matriz Metálica Reforçados com Fibras Contínuas e Alinhadas

<i>Fibra</i>	<i>Matriz</i>	<i>Teor de Fibras (%v)</i>	<i>Massa Específica (g/cm³)</i>	<i>Módulo de Elasticidade Longitudinal (GPa)</i>	<i>Limite de Resistência à Tração Longitudinal (MPa)</i>
Carbono	6061 Al	41	2,44	320	620
Boro	6061 Al	48	—	207	1515
SiC	6061 Al	50	2,93	230	1480
Alumina	380,0 Al	24	—	120	340
Carbono	AZ31 Mg	38	1,83	300	510
Borsic	Ti	45	3,68	220	1270

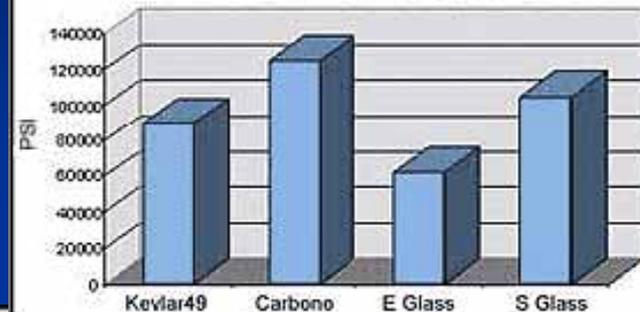
Fonte: Adaptado de J. W. Weeton, D. M. Peters e K. L. Thomas, *Engineers' Guide to Composite Materials*, ASM International, Materials Park, OH, 1987.

COMPARAÇÃO DAS DIFERENTES FIBRAS

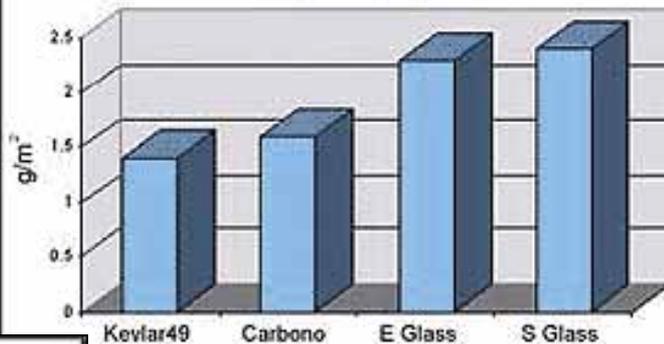
Resistência à Compressão



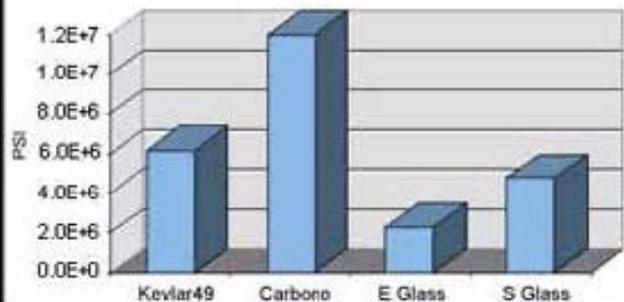
Resistência à Tração



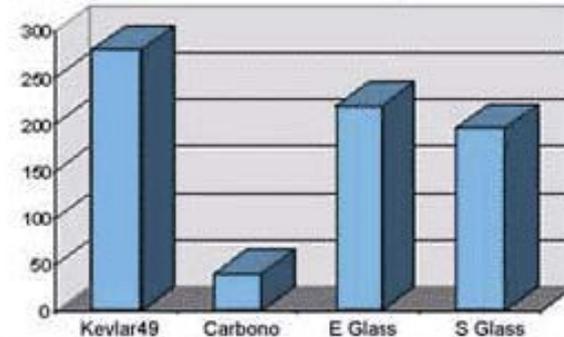
Densidade



Módulo de Elasticidade



Resistência ao Impacto



MATERIAIS DE MATRIZES POLIMÉRICAS

As resinas mais importantes, usadas como matriz para a obtenção de plásticos reforçados por fibras, são:

- *As resinas de poliéster: são mais baratas, mas não são tão resistentes. Apresentam baixas tolerâncias à temperatura e uma contração significativa resultante do processo de cura.*

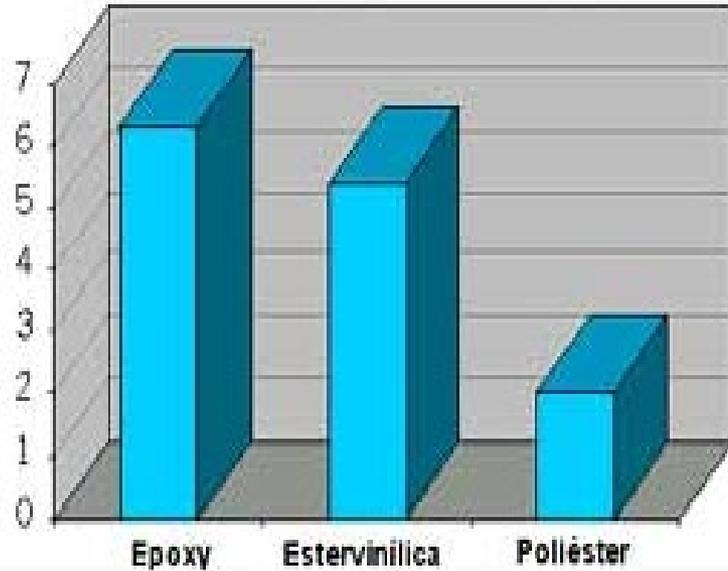
As aplicações destes materiais incluem cascos de barcos, painéis de construção e painéis estruturais de automóveis, de aviões e de vários tipos de aparelhos domésticos.

- *As resinas epoxídicas: são mais caras, mas apresentam vantagens especiais, como, por exemplo, boas propriedades de resistência mecânica e menor contração após cura.*

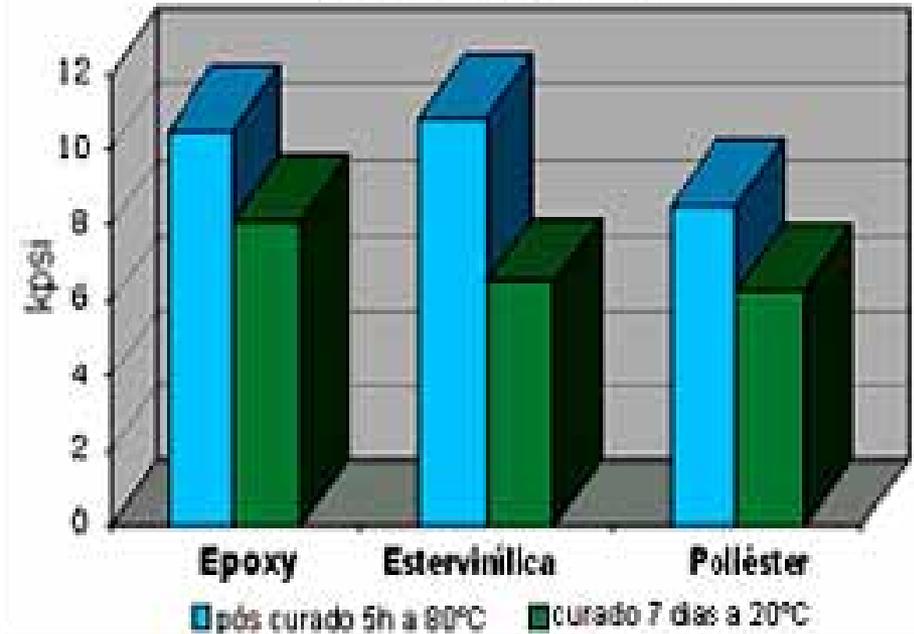
- *As resinas estervinílicas: associam a facilidade de aplicação e cura das resinas poliéster e as excelentes propriedades de resistência da resina epoxídicas. As resinas estervinílicas têm sido utilizadas cada vez mais na indústria náutica. Devido à sua elevada resistência química, este material é também indicado para a fabricação de tanques de combustível.*

MATERIAIS DE MATRIZES POLIMÉRICAS

Elongação Média (%)

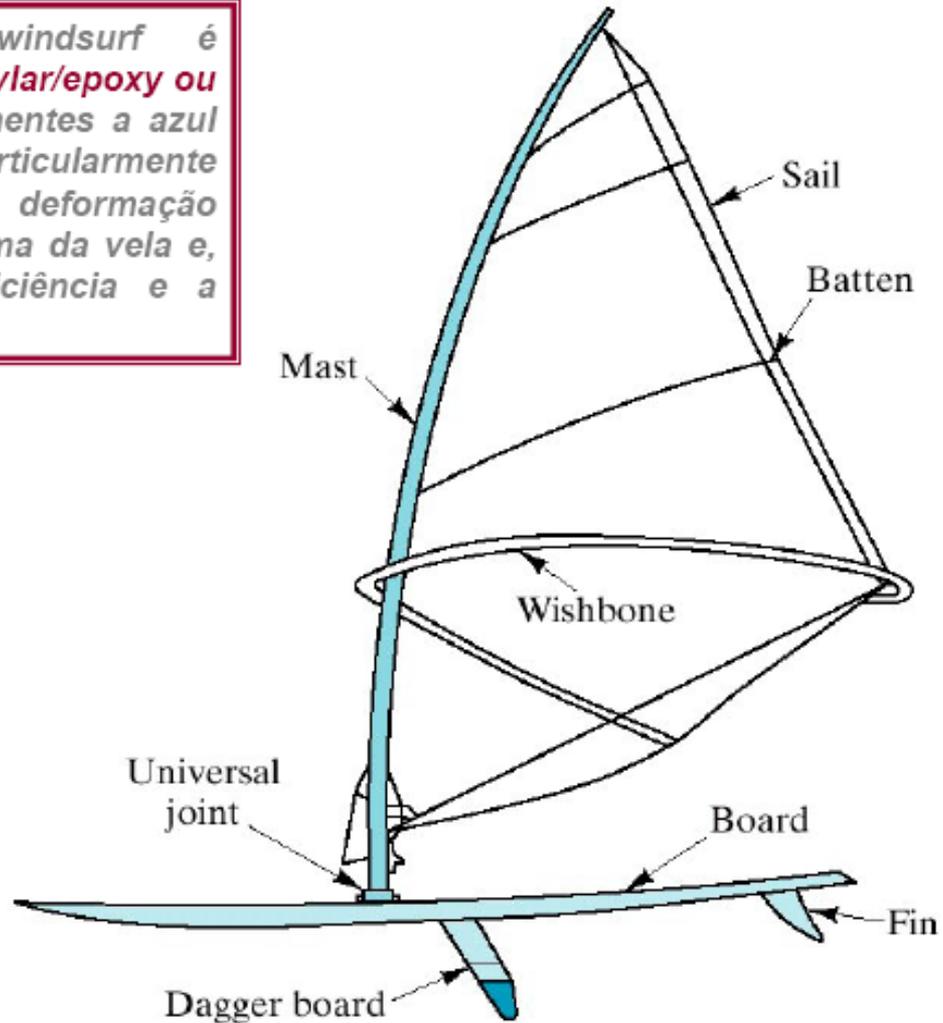


Resistência à Tração



MATERIAIS DE MATRIZES POLIMÉRICAS

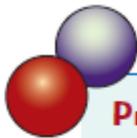
Uma prancha de windsurf é normalmente feita **em kevlar/epoxy ou vidro/epoxy** nos componentes a azul da figura. O mastro é particularmente importante, pois a sua deformação elástica determina a forma da vela e, por conseguinte, a eficiência e a velocidade da prancha.



MATERIAIS DE MATRIZES POLIMÉRICAS

O quadro (que já nem sequer tem a forma tradicional de um quadro...) da bicicleta da figura é feito em **carbono/epoxy**, bem como as jantes das rodas. Conseguem-se maior rigidez e menor peso em relação às estruturas de alumínio. Além disso, o design pode e deve ser alterado para maximizar os benefícios do novo material.





EXEMPLO DE PROJETO 16.1

Projeto de um Eixo Compósito Tubular

Um eixo composto tubular deve ser projetado com um diâmetro externo de 70 mm (2,75 in), um diâmetro interno de 50 mm (1,97 in) e um comprimento de 1,0 m (39,4 in), conforme representado esquematicamente na Figura 16.11. A característica mecânica de importância fundamental é a rigidez à flexão em termos do módulo de elasticidade longitudinal; a resistência mecânica e a resistência à fadiga não são parâmetros significativos para essa aplicação quando são empregados compósitos filamentosos. A rigidez deve ser especificada como a deflexão máxima admissível em flexão; quando o eixo é submetido a uma flexão em três pontos, como mostrado na Figura 12.30 (ou seja, com pontos de apoio em ambas as extremidades do tubo e aplicação de carga no ponto longitudinal central), uma carga de 1000 N (225 lb_f) deve produzir uma deflexão elástica não superior a 0,35 mm (0,014 in) na posição do ponto central.

Serão usadas fibras contínuas orientadas paralelamente ao eixo do tubo; as possíveis fibras são as de vidro e de carbono nas suas classes de módulos, que são padrão, intermediário e alto. O material da matriz deve ser uma resina epóxi, e a fração volumétrica máxima permitida para a fibra deve ser de 0,60.

Esse problema de projeto requer que façamos o seguinte:

- (a) Decidir quais das quatro fibras, quando inseridas na matriz epóxi, atendem aos critérios estipulados.
- (b) Entre essas possibilidades, selecionar aquela fibra que produzirá o material composto de menor custo (supondo que os custos de fabricação são os mesmos para todas as fibras).

Os dados para o módulo de elasticidade, a massa específica e o custo para as fibras e a matriz estão apresentados na Tabela 16.6.

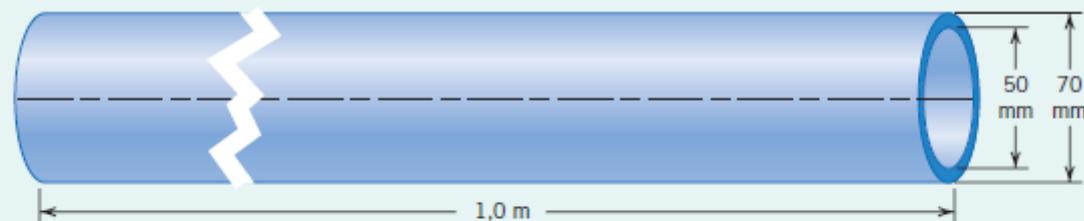


Figura 16.11 Representação esquemática de um eixo composto tubular, objeto do Exemplo de Projeto 16.1.

Tabela 16.6 Dados para o Módulo de Elasticidade, Massa Específica e Custo para Fibras de Vidro, Várias Fibras de Carbono e para a Resina Epóxi

<i>Material</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<i>Massa Específica (g/cm³)</i>	<i>Custo (\$US/kg)</i>
Fibras de vidro	72,5	2,58	2,10
Fibras de carbono (módulo-padrão)	230	1,80	60,00
Fibras de carbono (módulo intermediário)	285	1,80	95,00
Fibras de carbono (módulo alto)	400	1,80	250,00
Resina epóxi	2,4	1,14	6,00

Solução

- (a) Em primeiro lugar, torna-se necessário determinar o módulo de elasticidade longitudinal exigido para esse material compósito consistente com os critérios estipulados. Esse cálculo requer o uso da expressão para a deflexão na flexão em três pontos

$$\Delta y = \frac{FL^3}{48 EI} \quad (16.21)$$

em que Δy é a deflexão no ponto central, F é a força aplicada, L é a distância de separação entre os pontos de apoio, E é o módulo de elasticidade e I é o momento de inércia da seção transversal. Para um tubo com diâmetros interno e externo, d_i e d_e , respectivamente,

$$I = \frac{\pi}{64}(d_e^4 - d_i^4) \quad (16.22)$$

e

$$E = \frac{4FL^3}{3\pi \Delta y (d_e^4 - d_i^4)} \quad (16.23)$$

Para esse projeto de eixo,

$$F = 1000 \text{ N}$$

$$L = 1,0 \text{ m}$$

$$\Delta y = 0,35 \text{ mm}$$

$$d_e = 70 \text{ mm}$$

$$d_i = 50 \text{ mm}$$

Dessa forma, o módulo de elasticidade longitudinal exigido para esse eixo é de

$$\begin{aligned} E &= \frac{4(1000 \text{ N})(1,0 \text{ m})^3}{3\pi(0,35 \times 10^{-3} \text{ m})[(70 \times 10^{-3} \text{ m})^4 - (50 \times 10^{-3} \text{ m})^4]} \\ &= 69,3 \text{ GPa} (9,9 \times 10^6 \text{ psi}) \end{aligned}$$

A próxima etapa consiste em determinar as frações volumétricas da fibra e da matriz para cada uma das quatro fibras candidatas. Isso é possível usando a expressão da regra das misturas, Equação 16.10b:

$$E_{ec} = E_m V_m + E_f V_f = E_m(1 - V_f) + E_f V_f$$

Na Tabela 16.7 estão listados os valores de V_m e V_f exigidos para $E_{ec} = 69,3 \text{ GPa}$; a Equação 16.10b e os dados para os módulos na Tabela 16.6 foram usados nesses cálculos. Apenas os três tipos de fibras de carbono são candidatas possíveis, uma vez que seus valores de V_f são menores que 0,6.

Tabela 16.7 Frações Volumétricas das Fibras e da Matriz para a Fibra de Vidro e Três Tipos de Fibras de Carbono Conforme Exigido para Obter um Compósito com Módulo de 69,3 GPa

<i>Tipo de Fibra</i>	V_f	V_m
Vidro	0,954	0,046
Carbono (módulo-padrão)	0,293	0,707
Carbono (módulo intermediário)	0,237	0,763
Carbono (módulo alto)	0,168	0,832

(b) Nesse ponto, torna-se necessário determinar os volumes das fibras e da matriz para cada um dos três tipos de fibras de carbono. O volume total do tubo V_c em centímetros cúbicos é de

$$\begin{aligned}
 V_c &= \frac{\pi L}{4} (d_e^2 - d_i^2) & (16.24) \\
 &= \frac{\pi(100 \text{ cm})}{4} [(7,0 \text{ cm})^2 - (5,0 \text{ cm})^2] \\
 &= 1885 \text{ cm}^3 (114 \text{ in}^3)
 \end{aligned}$$

Dessa forma, os volumes de fibra e de matriz resultam dos produtos entre esse valor e os valores de V_f e V_m listados na Tabela 16.7. Esses valores de volume estão apresentados na Tabela 16.8 e foram convertidos em massa usando as massas específicas (Tabela 16.6), e finalmente convertidos nos custos dos materiais, a partir dos dados de custo por unidade de massa (também fornecidos na Tabela 16.6).

Como pode ser observado na Tabela 16.8, o material selecionado (ou seja, o de menor custo) é o compósito com fibras de carbono de módulo-padrão; o custo relativamente baixo por unidade de massa dessa fibra compensa seu módulo de elasticidade relativamente baixo e a alta fração volumétrica necessária.

Tabela 16.8 Volumes, Massas e Custos para as Fibras e Matriz, e o Custo Total do Material para Três Compósitos com Matriz Epóxi e Fibras de Carbono

<i>Tipo de Fibra</i>	<i>Volume da Fibra (cm³)</i>	<i>Massa da Fibra (kg)</i>	<i>Custo da Fibra (US\$)</i>	<i>Volume da Matriz (cm³)</i>	<i>Massa da Matriz (kg)</i>	<i>Custo da Matriz (US\$)</i>	<i>Custo Total (US\$)</i>
Carbono (módulo-padrão)	552	0,994	59,60	1333	1.520	9,10	68,70
Carbono (módulo intermediário)	447	0,805	76,50	1438	1.639	9,80	86,30
Carbono (módulo alto)	317	0,571	142,80	1568	1.788	10,70	153,50

COMPÓSITOS COM MATRIZES METÁLICAS (MMC)

- *Nos compósitos com matriz metálica (MMC) a matriz é um metal ductil*
- *Esses materiais podem ser utilizados a temperaturas de serviço mais elevadas do que seus metais base análogos*
- *O reforço melhora a rigidez, a resistência à abrasão, resistência à fluência e condutividade térmica*
- *As vantagens desses materiais para os de matriz polimérica são: maiores temperaturas operacionais, não-inflamabilidade, maior resistência á degradação por fluidos orgânicos*
- *As superligas, bem como ligas de alumínio, magnésio, titânio e cobre são empregadas como material de matriz*
- *O reforço pode ser na forma de particulados e de fibras tanto contínuas quanto descontínuas*
- *Fibras contínuas incluem o carbono, o carбето de silício, boro, alumina e metais refratários. Fibras descontínuas incluem fibras picadas de alumina e carbono.*

Como o nome indica, nos **compósitos com matriz metálica** (MMC — *metal-matrix composites*),

COMPÓSITOS COM MATRIZES METÁLICAS

- *Fabricantes de automóveis introduziram componentes de motores em liga de alumínio reforçada com fibras de alumina e carbono. É leve em peso e resiste ao desgaste*
- *Aplicações estruturais aeroespaciais incluem compósitos de matriz de liga de alumínio com fibras de boro*
- *Fibras contínuas de grafita são usadas no telescópio Hubble*

Tabela 16.9 Propriedades de Diversos Compósitos com Matriz Metálica Reforçados com Fibras Contínuas e Alinhadas

<i>Fibra</i>	<i>Matriz</i>	<i>Teor de Fibras (%v)</i>	<i>Massa Específica (g/cm³)</i>	<i>Módulo de Elasticidade Longitudinal (GPa)</i>	<i>Limite de Resistência à Tração Longitudinal (MPa)</i>
Carbono	6061 Al	41	2,44	320	620
Boro	6061 Al	48	—	207	1515
SiC	6061 Al	50	2,93	230	1480
Alumina	380,0 Al	24	—	120	340
Carbono	AZ31 Mg	38	1,83	300	510
Borsic	Ti	45	3,68	220	1270

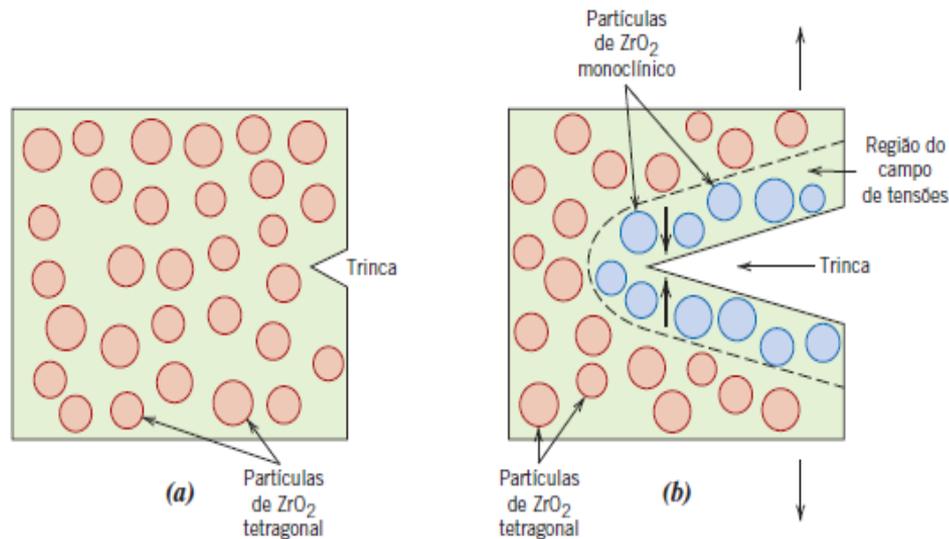
Fonte: Adaptado de J. W. Weeton, D. M. Peters e K. L. Thomas, *Engineers' Guide to Composite Materials*, ASM International, Materials Park, OH, 1987.

COMPÓSITOS COM MATRIZ CERÂMICA

- A tenacidade à fratura das cerâmicas tem sido melhoradas pelo desenvolvimento de compósitos com matriz cerâmica – particulados, fibras ou uísqueres de um material cerâmico que se encontram na matriz de um outro material cerâmico
- A melhora nas propriedades de fratura resulta das interações entre as trincas que avançam e as partículas dispersas. A iniciação das trincas ocorre normalmente com a fase matriz e sua propagação é obstruída ou retardada pelas partículas, fibras ou uísqueres

Figura 16.12

Demonstração esquemática do aumento da tenacidade por transformação de fases. (a) Uma trinca antes da indução da transformação de fases das partículas de ZrO_2 . (b) Apriionamento da trinca por causa da transformação de fases induzida pela tensão.



- No caso da adição de partículas de zircônia, as partículas tetragonais na frente da trinca mudam para um estado monoclinico de maior volume que geram tensões compressivas e fecham a trinca

Tabela 16.10

Resistências e Tenacidades à Fratura na Temperatura Ambiente para Vários Teores de *Whiskers* de SiC em Al₂O₃

<i>Teor de Whisker (%v)</i>	<i>Resistência à Fratura (MPa)</i>	<i>Tenacidade à Fratura (MPa√m)</i>
0	—	4,5
10	455 ± 55	7,1
20	655 ± 135	7,5–9,0
40	850 ± 130	6,0

Fonte: Adaptado de *Engineered Materials Handbook*, Vol. 1, *Composites*, C. A. Dostal (Editor Senior), ASM International, Materials Park, OH, 1987.

Os compósitos com matriz cerâmica podem ser fabricados utilizando técnicas de prensagem a quente, prensagem isostática a quente e sinterização a partir da fase líquida. Em relação às aplicações, as aluminas reforçadas com *whiskers* de SiC estão sendo empregadas como enxertos em ferramentas de corte para a usinagem de ligas metálicas duras. A vida útil das ferramentas feitas com esses materiais é maior que a das ferramentas feitas com carbetos cimentados (Seção 16.2).

COMPÓSITOS DE MATRIZ CERÂMICA

- **CMC - CERAMIC-MATRIX COMPOSITES** - tenacidade melhorada
- **MATERIAIS CERÂMICOS** -
 - Resistentes à oxidação e deterioração a temperaturas elevadas.
- **FRÁGEIS** –
 - Valores de K_{IC} entre 1 e 5 MPa.m^{1/2} – fratura frágil.
 - Para metais, K_{IC} varia entre 15 e 150 MPa.m^{1/2}.
- **CMC** -
 - Particulados, fibras ou uísqueres embutidos na matriz de um outro material cerâmico. K_{IC} entre 6 e 20 MPa.m^{1/2}.
 - A iniciação das trincas ocorre na fase matriz e a propagação é obstruída ou retardada pelas partículas, fibras ou uísqueres.

COMPÓSITOS DE MATRIZ CERÂMICA

- **AUMENTO DE TENACIDADE POR TRANSFORMAÇÃO**
 - PARTÍCULAS DE ZIRCÔNIA PARCIALMENTE ESTABILIZADA dispersas no interior de uma matriz, de Al_2O_3 ou da própria ZrO_2
 - ESTABILIZADORES : CaO , MgO , Y_2O_3 e CeO
 - ESTABILIZAÇÃO PARCIAL - manutenção da fase tetragonal metaestável em condições ambientes, em lugar da fase monoclinica estável. O campo de tensões na frente de uma trinca que se propaga faz com que as partículas tetragonais metaestáveis sofram transformação para a fase monoclinica estável – AUMENTO DE VOLUME da partícula e estabelecimento de TENSÕES COMPRESSIVAS sobre as superfícies da trinca, que tendem a fechar a trinca, obstruindo ou retardando o seu crescimento, Fig 16.11.

COMPÓSITOS DE MARIZ CERÂMICA

■ OUTRAS TÉCNICAS DE AUMENTO DE TENACIDADE

Uísqueres cerâmicos, SiC e Si_3N_4 : inibem a propagação da trinca por

- DEFLEXÃO DA PONTA DA TRINCA
- FORMAÇÃO DE PONTE ATRAVÉS DAS FACES DA TRINCA
- ABSORÇÃO DE ENERGIA POR PULL-OUT
- INDUÇÃO DE UMA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM REGIÕES ADJACENTES À PONTA DA TRINCA.
- GERALMENTE, O AUMENTO DE TEOR DE FIBRAS MELHORA A RESISTÊNCIA E A TENACIDADE À FRATURA. TABELA 16.7

COMPÓSITOS DE MATRIZ CERÂMICA

Tabela 16.7 Resistências à fratura e tenacidades à fratura à temperatura ambiente, para vários teores de úsqueres de SiC em Al₂O₃.

Teor de Úsquer (%vol)	Resistência à Fratura (MPa)	Tenacidade à Fratura (MPa.m^{1/2})
0	-	4,5
10	455 ± 55	7,1
20	655 ± 135	7,5 – 9,0
40	850 ± 130	6,0

HÁ UMA REDUÇÃO NA DISPERSÃO DOS VALORES MEDIDOS DA RESISTÊNCIA À FRATURA DAS CERÂMICAS REFORÇADAS COM ÚISQUERES, EM COMPARAÇÃO COM SEUS ANÁLOGOS SEM REFORÇO.

COMPÓSITOS DE MATRIZ CERÂMICA

■ PROPRIEDADES

- MAIOR RESISTÊNCIA MECÂNICA
- MAIOR TENACIDADE À FRATURA
- MELHOR COMPORTAMENTO EM FLUÊNCIA
- MAIOR RESISTÊNCIA A CHOQUES TÉRMICOS

■ FABRICAÇÃO

- ESTAMPAGEM A QUENTE
- ESTAMPAGEM ISOSTÁTICA A QUENTE
- TÉCNICAS DE SINTERIZAÇÃO NA FASE LÍQUIDA
- ENXERTOS EM FERRAMENTAS DE CORTE PARA USINAGEM DE LIGAS DURAS

■ APLICAÇÕES

- ENXERTOS EM FERRAMENTAS DE CORTE PARA USINAGEM DE LIGAS DURAS

COMPÓSITOS COM MATRIZ CERÂMICA

- Outra técnica para melhora da tenacidade à fratura envolve a utilização de uísqueres de SiC.
- Esses uísqueres inibem a propagação de trincas pela :
 - a) Absorção de energia durante a extração à medida que os uísqueres deslizam e se separam da matriz
 - b) Indução de uma redistribuição das tensões em regiões adjacentes à ponta da trinca

Tabela 16.10

Resistências e Tenacidades à Fratura na Temperatura Ambiente para Vários Teores de *Whiskers* de SiC em Al₂O₃

<i>Teor de Whisker (%v)</i>	<i>Resistência à Fratura (MPa)</i>	<i>Tenacidade à Fratura (MPa√m)</i>
0	—	4,5
10	455 ± 55	7,1
20	655 ± 135	7,5–9,0
40	850 ± 130	6,0

Fonte: Adaptado de *Engineered Materials Handbook*, Vol. 1, *Composites*, C. A. Dostal (Editor Senior), ASM International, Materials Park, OH, 1987.

COMPÓSITOS CARBONO-CARBONO

- **MATRIZ :** CARBONO
- **REFORÇO :** FIBRAS DE CARBONO

Materiais novos e caros, ainda não muito utilizados.

- **PROPRIEDADES :**

- ALTO MÓDULO DE TRAÇÃO
- ALTO LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO, MANTIDO ATÉ $T > 2000^{\circ}\text{C}$
- RELATIVAMENTE ALTA RESISTÊNCIA À FLUÊNCIA
- RELATIVAMENTE ALTOS VALORES DE TENACIDADE À FRATURA.
- RELATIVAMENTE ALTAS CONDUTIVIDADES TÉRMICAS
- BAIXOS COEFICIENTES DE EXPANSÃO TÉRMICA
- BAIXA SUSCEPTIBILIDADE AO CHOQUE TÉRMICO

COMPÓSITOS CARBONO - CARBONO

- *Um dos materiais mais promissores em engenharia é o compósito feito a partir de uma matriz de carbono e um reforço com fibras de carbono*
- *Suas propriedades envolvem limites de resistência à tração que são mantidos até temperaturas de 2000° C, resistência à fluência e valores de tenacidade à fratura relativamente altos*
- *São empregados em motores de foguete, como materiais de atrito em aeronaves e automóveis de alto desempenho, moldes em estampagem a quente, componentes para motores de turbinas e como escudos térmicos em veículos espaciais de reentrada na atmosfera*
- *Suas principais desvantagens é que são propensos à oxidação a altas temperaturas e são materiais de altíssimo custo pela dificuldade no processamento.*

COMPÓSITOS CARBONO-CARBONO

- **PRINCIPAL DESVANTAGEM :**
 - PROPENSÃO À OXIDAÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS
- **APLICAÇÕES :**
 - MOTORES DE FOGUETES
 - MATERIAIS DE ATRITO EM AERONAVES E AUTOMÓVEIS DE ALTO DESEMPENHO
 - MOLDES PARA ESTAMPAGEM A QUENTE
 - COMPONENTES PARA MOTORES DE TURBINA AVANÇADOS
 - ESCUDOS TÉRMICOS DE VEÍCULOS ESPACIAIS DE REENTRADA NA ATMOSFERA

COMPÓSITOS CARBONO-CARBONO

■ FABRICAÇÃO :

AS TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO SÃO COMPLEXAS – CUSTOS

- SÃO PRODUZIDAS FIBRAS CONTÍNUAS, BI OU TRIDIMENSIONAIS
 - SÃO IMPREGNADAS COM UMA RESINA POLIMÉRICA LÍQUIDA, EM GERAL FENÓLICA
 - CONFORMAÇÃO DA PEÇA NO SEU ESTADO FINAL
 - RESINA DEIXADA EM REPOUSO PARA CURAR. A RESINA DA MATRIZ É PIROLISADA,
ISTO É, CONVERTIDA EM CARBONO PELO AQUECIMENTO EM UMA ATMOSFERA INERTE. OS ELEMENTOS O, H E N SÃO ELIMINADOS, DEIXANDO GRANDES CADEIAS DE MOLÉCULAS DE CARBONO.
 - TRATAMENTOS TÉRMICOS A TEMPERATURAS MAIS ALTAS – MATRIZ MAIS DENSA,
MAIOR RESISTÊNCIA.
- O COMPÓSITO RESULTANTE CONSISTE NAS FIBRAS ORIGINAIS DE CARBONO INALTERADAS, ENCERRADAS NO INTERIOR DA MATRIZ PIROLISADA DE CARBONO

COMPÓSITOS HÍBRIDOS

- DOIS OU MAIS TIPOS DE FIBRAS DIFERENTES NO INTERIOR DE UMA ÚNICA MATRIZ.
 - MELHOR COMBINAÇÃO DE PROPRIEDADES.
 - VÁRIAS COMBINAÇÕES DE FIBRAS E MATERIAIS PARA A MATRIZ, MAS TANTO FIBRAS DE CARBONO, COMO DE VIDRO SÃO INCORPORADAS NO INTERIOR DE UMA RESINA POLIMÉRICA.
- FIBRAS DE CARBONO
 - SÃO FORTES,
 - RÍGIDAS E
 - PROPORCIONAM UM REFORÇO DE BAIXA DENSIDADE
- FIBRAS DE VIDRO
 - BARATAS
 - NÃO APRESENTAM A RIGIDEZ DO CARBONO
- HÍBRIDO C-VIDRO
 - MAIS RESISTENTE AO IMPACTO
 - CUSTO MENOR, COMPARADO AOS COMPÓSITOS CONFECCIONADOS SÓ COM FIBRAS DE CARBONO OU DE VIDRO.

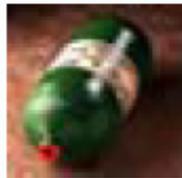
COMPOSTOS HÍBRIDOS

- HÁ VÁRIAS MANEIRAS DE SE COMBINAR AS FIBRAS, QUE AFETAM AS PROPRIEDADES GLOBAIS DO MATERIAL COMPÓSITO
 - FIBRAS ALINHADAS E MISTURADAS UMAS COM AS OUTRAS
 - LAMINADOS EM CAMADAS SUPERPOSTAS, COM CAMADAS ALTERNADAS COMPOSTAS POR CADA TIPO DE FIBRA
 - AS PROPRIEDADES SÃO ANISOTRÓPICAS EM PRATICAMENTE TODOS OS TIPOS DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS.
- A FALHA É NÃO-CATASTRÓFICA EM TRAÇÃO .
 - AS FIBRAS DE CARBONO FALHAM PRIMEIRO,
 - EM SEGUIDA A CARGA É TRANSFERIDA PARA AS FIBRAS DE VIDRO
 - DEPOIS A CARGA É TRANSFERIDA PARA A MATRIZ
 - A FALHA FINAL COINCIDE COM A FALHA DA MATRIZ.
- APLICAÇÕES :
 - FABRICAÇÃO DE COMPONENTES ESTRUTURAIS DE TRANSPORTES TERRESTRES, AQUÁTICOS E AÉREOS
 - ARTIGOS ESPORTIVOS
 - COMPONENTES ORTOPÉDICOS DE PESO REDUZIDO.

MATERIAIS COMPÓSITOS

CMP (matriz polimérica)

Epoxy reforçada com aramido
(custo 37.5 €/kg, densidade 1.34 g/cm³)



Epoxy reforçada com carbono
(custo 48 €/kg, densidade 1.53 g/cm³)



Resinas de poliéster reforçadas com fibras de vidro
(custo 2 a 4 €/kg, densidade 1.8 a 2 g/cm³)



CMM (matriz metálica)

Matriz metálica de alumínio reforçada com partículas de carbono



Fibra/partículas de carbono
(custo 67€/kg, densidade 1.75 g/cm³)

CMC (matriz cerâmica)

30% carboneto de titânio (TiN) e 70% de óxido de alumínio (Al₂O₃)



Fibras de Al₂O₃ numa matriz de ZrO₂



PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

FABRICAÇÃO DE PLÁSTICOS REFORÇADOS COM FIBRAS CONTÍNUAS QUE ATENDAM ÀS ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO. AS FIBRAS SÃO UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDAS NA MATRIZ E ORIENTADAS NA MESMA DIREÇÃO.

■ TÉCNICAS DESENVOLVIDAS RECENTEMENTE :

- PULTRUSÃO
- ENROLAMENTO DE FILAMENTOS
- PRODUÇÃO PREPREG

- TÉCNICA MAIS ANTIGA: HAND LAY UP

Resumo das Equações

<i>Número da Equação</i>	<i>Equação</i>	<i>Resolvendo para</i>	<i>Número da Página</i>
16.1	$E_c(s) = E_m V_m + E_p V_p$	Expressão para a regra das misturas — limite superior	584
16.2	$E_c(i) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m}$	Expressão para a regra das misturas — limite inferior	584
16.3	$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c}$	Comprimento crítico da fibra	588
16.10a	$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f$	Módulo de elasticidade para um compósito com fibras contínuas e alinhadas na direção longitudinal	591
16.16	$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m}$	Módulo de elasticidade para um compósito com fibras contínuas e alinhadas na direção transversal	594
16.17	$\sigma_{cd}^* = \sigma'_m(1 - V_f) + \sigma_f^* V_f$	Limite de resistência à tração para um compósito com fibras contínuas e alinhadas na direção longitudinal	595
16.18	$\sigma_{cd}^* = \sigma_f^* V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + \sigma'_m(1 - V_f)$	Limite de resistência à tração para um compósito com fibras descontínuas e alinhadas na direção longitudinal e $l > l_c$	595
16.19	$\sigma_{cd}^* = \frac{l\tau_c}{d} V_f + \sigma'_m(1 - V_f)$	Limite de resistência à tração para um compósito com fibras descontínuas e alinhadas na direção longitudinal e $l < l_c$	596

Lista de Símbolos

<i>Símbolo</i>	<i>Significado</i>
d	Diâmetro da fibra
E_f	Módulo de elasticidade da fase fibra
E_m	Módulo de elasticidade da fase matriz
E_p	Módulo de elasticidade da fase particulada
l	Comprimento da fibra
l_c	Comprimento crítico da fibra
V_f	Fração volumétrica da fase fibra
V_m	Fração volumétrica da fase matriz
V_p	Fração volumétrica da fase particulada
σ_f^*	Limite de resistência à tração da fibra
σ_m'	Tensão na matriz na falha do compósito
τ_c	Resistência da ligação fibra-matriz ou limite de escoamento em cisalhamento da matriz

Termos e Conceitos Importantes

cermeto	compósito reforçado com fibras	fibra
compósito carbono-carbono	compósito reforçado por dispersão	módulo específico
compósito com matriz cerâmica	concreto	nanocompósito
compósito com matriz metálica	concreto armado	painel-sanduíche
compósito com matriz polimérica	concreto protendido	prepreg
compósito com partículas grandes	direção longitudinal	princípio da ação combinada
compósito estrutural	direção transversal	regra das misturas
compósito híbrido	fase dispersa	resistência específica
compósito laminado	fase matriz	<i>whisker</i>

RESUMO

Introdução

- Os compósitos são materiais multifásicos produzidos artificialmente com combinações desejáveis das melhores propriedades das suas fases constituintes.
- Geralmente, uma fase (a matriz) é contínua e envolve completamente a outra (a fase dispersa).
- Nesta discussão, os compósitos foram classificados como reforçados com partículas, reforçados com fibras, estruturais, e nanocompósitos.

Compósitos com Partículas Grandes

- Os compósitos reforçados com partículas grandes e os reforçados por dispersão enquadram-se na classificação de compósitos reforçados com partículas.

Compósitos Reforçados por Dispersão

- No aumento da resistência por dispersão, uma melhor resistência é obtida por partículas extremamente pequenas da fase dispersa, as quais inibem o movimento das discordâncias.
- O tamanho das partículas é geralmente maior nos compósitos com partículas grandes, cujas características mecânicas são melhoradas pela ação de reforço.
- Nos compósitos com partículas grandes, os valores para os módulos de elasticidade superior e inferior dependem dos módulos e das frações volumétricas das fases matriz e particulada, de acordo com as expressões da regra das misturas, Equações 16.1 e 16.2.
- O concreto, que é um tipo de compósito com partículas grandes, consiste em um agregado de partículas ligadas umas às outras pelo cimento. No caso do concreto de cimento portland, o agregado consiste em areia e brita; a ligação de cimentação desenvolve-se como resultado de reações químicas entre o cimento portland e a água.
- A resistência mecânica do concreto pode ser melhorada por métodos de reforço (por exemplo, inserção de barras de aço, arames etc., no concreto fresco).

Influência do Comprimento da Fibra

- Entre os vários tipos de compósitos, o potencial para a eficiência do reforço é maior para aqueles reforçados com fibras.
- Nos compósitos reforçados com fibras, uma carga aplicada é transmitida e distribuída entre as fibras pela fase matriz, que na maioria dos casos é pelo menos moderadamente dúctil.
- Um reforço significativo é possível, apenas se a ligação matriz-fibra for forte. Em razão da descontinuidade do reforço nas extremidades das fibras, sua eficiência, depende do comprimento da fibra.
- Para cada combinação fibra-matriz existe um dado comprimento crítico (l_c), que depende do diâmetro e da resistência da fibra, além da força da ligação fibra-matriz, de acordo com a Equação 16.3.
- O comprimento das fibras contínuas excede em muito esse valor crítico (ou seja, $l > 15l_c$), enquanto as fibras mais curtas são descontínuas.

Influência da Orientação e da Concentração das Fibras

- Com base no comprimento e na orientação das fibras, é possível haver três tipos diferentes de compósitos reforçados com fibras:
 - Fibras contínuas e alinhadas (Figura 16.8a) — as propriedades mecânicas são altamente anisotrópicas. Na direção do alinhamento, o reforço e a resistência são máximos; perpendicular ao alinhamento, eles são mínimos.
 - Fibras descontínuas e alinhadas (Figura 16.8b) — é possível resistência e rigidez significativas na direção longitudinal.
 - Fibras descontínuas e com orientação aleatória (Figura 16.8c) — apesar de algumas limitações na eficiência do reforço, as propriedades são isotrópicas.
- Para os compósitos com fibras contínuas e alinhadas, foram desenvolvidas expressões da regra das misturas para o módulo nas orientações longitudinal e transversal (Equações 16.10 e 16.16). Além disso, também foi citada uma equação para a resistência longitudinal (Equação 16.17).
- Para os compósitos com fibras descontínuas e alinhadas, foram apresentadas equações para a resistência do compósito em duas situações diferentes:
 - Quando $l > l_c$, a Equação 16.18 é válida.
 - Quando $l < l_c$, é apropriado usar a Equação 16.19.
- O módulo de elasticidade para compósitos com fibras descontínuas e orientadas aleatoriamente pode ser determinado usando a Equação 16.20.

A Fase Fibra

- Com base no diâmetro e no tipo de material, os reforços fibrosos são classificados da seguinte maneira:
 - Whiskers* — monocristais extremamente resistentes, com diâmetros muito pequenos.
 - Fibras — normalmente polímeros ou cerâmicas que podem ser amorfos ou policristalinos.
 - Arames — metais/ligas com diâmetros relativamente grandes.

A Fase Matriz

- Embora todos os três tipos básicos de materiais sejam empregados para as matrizes, os mais comuns são os polímeros e os metais.
- A fase matriz exerce normalmente três funções:
 - Unir as fibras e transmitir às fibras uma carga externa aplicada.
 - Proteger as fibras individuais contra danos superficiais.
 - Prevenir a propagação de trincas de fibra para fibra.
- Os compósitos reforçados com fibras são algumas vezes classificados de acordo com o tipo da matriz; nesse sistema existem três classificações: compósitos com matriz polimérica, metálica e cerâmica.

Compósitos com Matriz Polimérica

- Os compósitos com matriz polimérica são os mais comuns; eles podem ser reforçados com fibras de vidro, carbono e de aramida.

Compósitos com Matriz Metálica

- As temperaturas de operação são maiores para os compósitos com matriz metálica (MMC) do que para os compósitos com matriz polimérica. Os MMCs também utilizam uma variedade de tipos de fibras e *whiskers*.

Compósitos com Matriz Cerâmica

- Para os compósitos com matriz cerâmica, o objetivo de projeto é uma maior tenacidade à fratura. Isso é obtido por interações entre as trincas, que estão se propagando, e as partículas da fase dispersa.
- O aumento da tenacidade por transformação constitui uma das técnicas para melhorar K_{Ic} .

Compósitos Carbono-Carbono

- Os compósitos carbono-carbono são compostos por fibras de carbono inseridas em uma matriz de carbono pirolisado.
- Esses materiais são caros e usados em aplicações que requerem elevada resistência e rigidez (que são mantidas em altas temperaturas), resistência à fluência e boa tenacidade à fratura.

Compósitos Híbridos

- Os compósitos híbridos contêm pelos menos dois tipos de fibras diferentes. O emprego de compósitos híbridos possibilita projetar compósitos com um melhor conjunto geral de propriedades.

Processamento de Compósitos Reforçados com Fibras

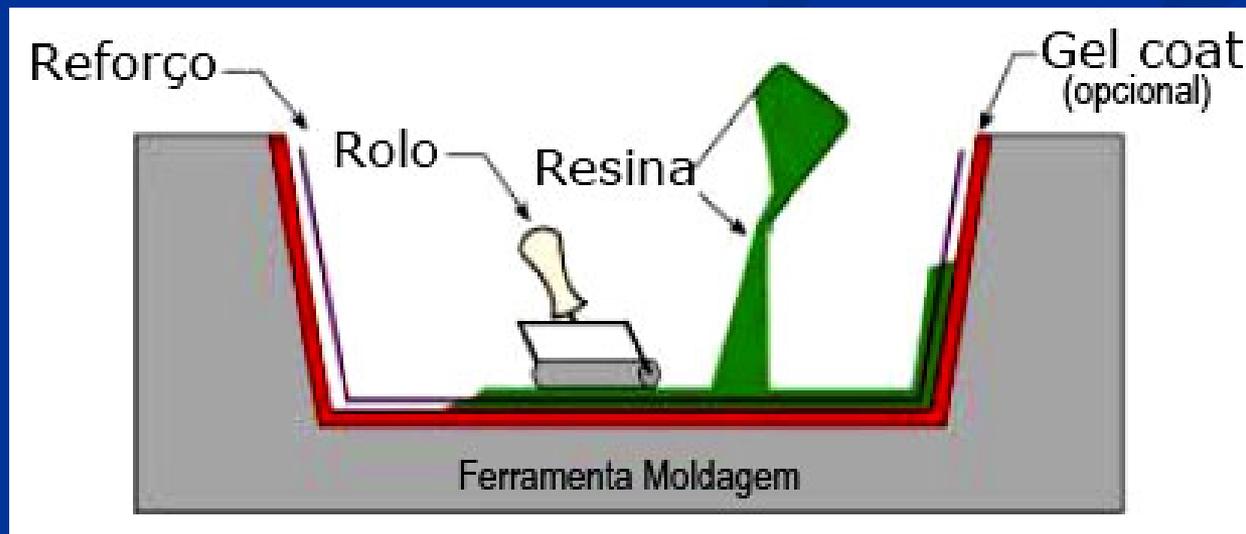
- Foram desenvolvidas várias técnicas de processamento de compósitos que proporcionam distribuição uniforme e alto grau de alinhamento das fibras.
- Com a pultrusão, formam-se componentes com comprimento contínuo e seção transversal constante, à medida que mechas de fibras impregnadas com resina são puxadas através de um molde.
- Os compósitos empregados em muitas aplicações estruturais são preparados comumente usando uma operação de empilhamento (manual ou automática), na qual camadas de fitas de prepreg são dispostas sobre uma superfície trabalhada e são subsequentemente curadas por completo pela aplicação simultânea de calor e pressão.

Processo de Molde Aberto na Fabricação de Compósitos

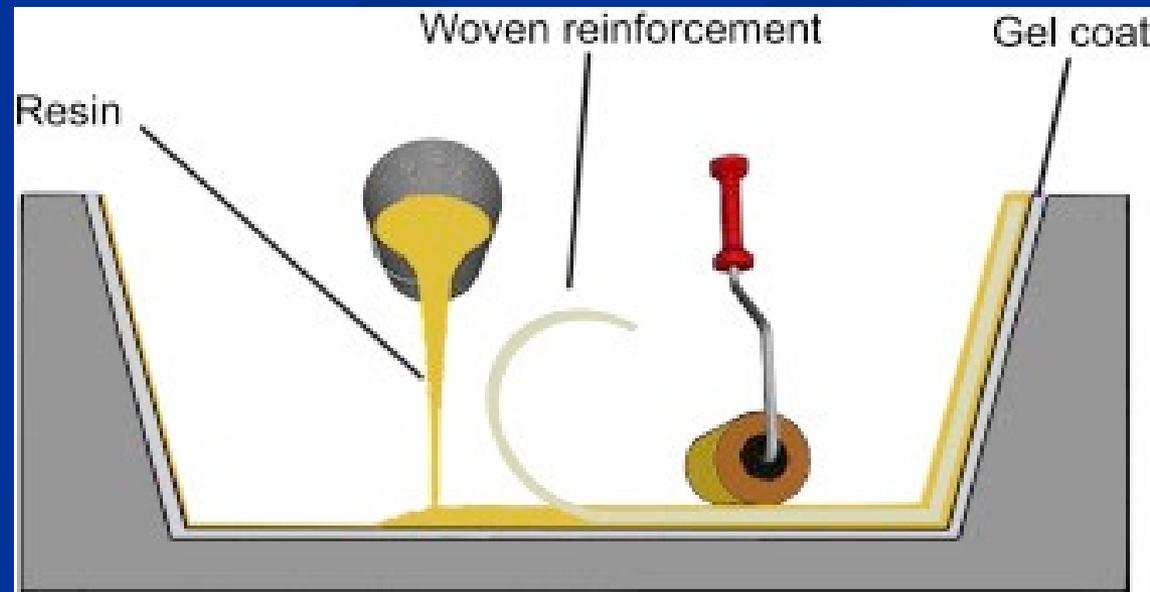
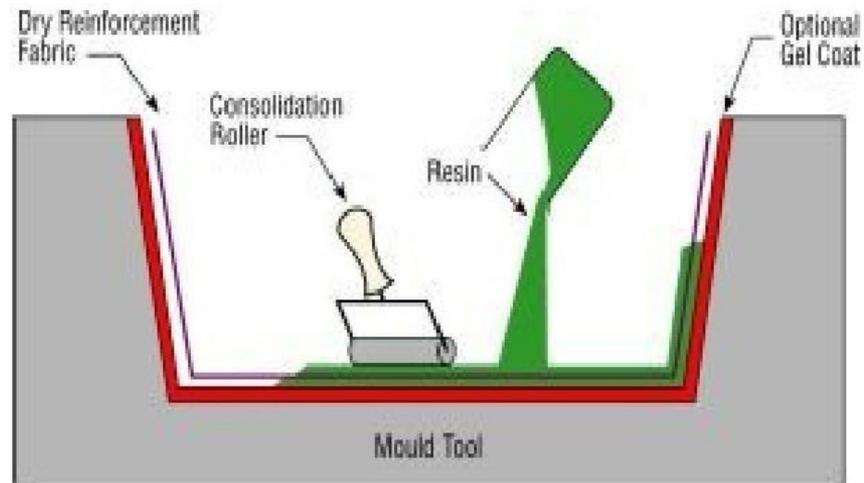
Processo de deposição manual (Hand lay-up)

É o processo mais simples e barato para fabricação de uma peça com reforço por fibras, sendo adequado para peças grandes em pequenas quantidades.

- Aplica-se um revestimento de gel ao molde aberto
- Em seguida, o reforço de fibras de vidro, o qual consiste normalmente num tecido ou manta, é colocado manualmente no molde;
- A resina plástica misturada com catalisadores e aceleradores é então vazada, ou aplicada com o auxílio de um pincel grosso;
- Através da passagem de rolos faz-se com que a resina molhe completamente o reforço, removendo-se o ar que possa ter ficado aprisionado.



Hand layup



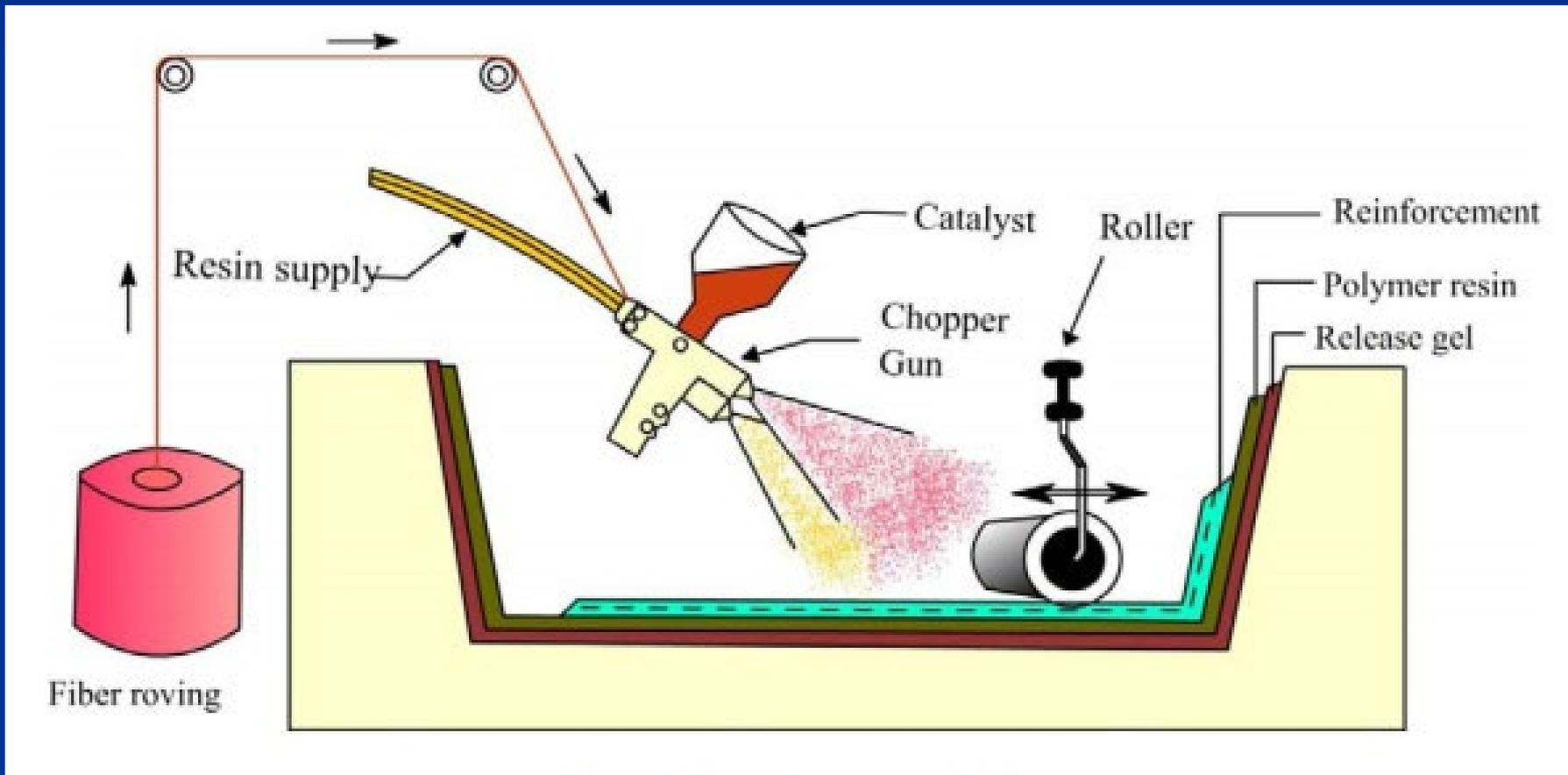
Processo de Molde Aberto na Fabricação de Compósitos

Processo Spray up

- É semelhante ao método de deposição manual (hand lay up)
- Pode ser utilizado para se obter cascos de barcos, banheiras e bases de chuveiro, coberturas, painéis de construção e peças com forma complexa.
- Caso se use fibra de vidro, este processo consiste na deposição simultânea, sobre um molde, de resina e de pedaços de feixes de fibras, usando-se para tal uma pistola de corte e projeção, a qual é alimentada por um multifio de feixes contínuos.
- A camada depositada sobre o molde é, em seguida, densificada, através da passagem de um rolo, que remove o ar que possa ter ficado aprisionado e que assegura a impregnação das fibras de reforço pela resina.
- Podem adicionar-se várias camadas.



Process Spray lay up

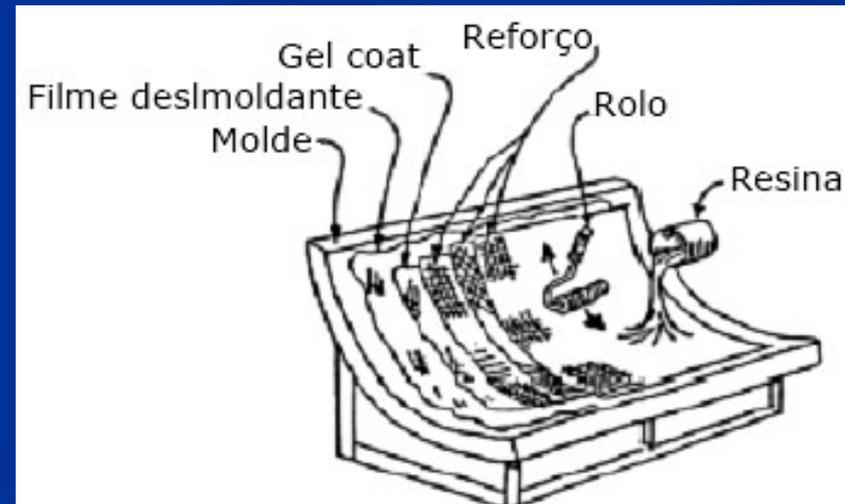


Processo de Molde Aberto na Fabricação de Compósitos

- Pode utilizar-se todo o tipo de fibras, no entanto, as de aramida são mais difíceis de “molhar manualmente”.
- São difíceis de obter laminados com pequenas quantidades de resina, i.e. com um elevado teor em fibras, uma vez que ficam vazios incorporados.

Desvantagens:

- Qualidade das peças depende do operador
- Baixa produção
- Piores propriedades mecânicas quando comparadas com outros métodos.
- Produto pouco homogêneo, zonas com muita resina (irregulares).



VÍDEO : Processo de deposição manual (Hand lay-up)



VÍDEO : Processo de deposição manual (Spray lay-up)



PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS REFORÇADOS POR FIBRAS

PROCESSO PRE-IMPREGNADO (Calandragem)

- Processo de reforço com fibras contínuas pré-impregnadas com uma resina polimérica parcialmente curada, em forma de fita, que molda e cura o produto. é a forma de material compósito mais usada para aplicações estruturais.
- **Processo de confecção de fitas pré-preg**
 - colimação de mechas de fibras contínuas enroladas em uma bobina.
 - as mechas são laminadas em sanduíche e prensadas entre folhas de papel de liberação e de suporte, utilizando rolos aquecidos, conhecido por processo de calandragem.
 - a folha de papel de liberação é revestida com uma película de uma solução de resina aquecida, com baixa viscosidade, impregnando as fibras.
 - um bisturi espalha a resina para formar uma película com espessura e largura uniformes.
 - o produto final é enrolado em bobinas.
 - a folha de papel de liberação é removida à medida que a fita é enrolada na bobina.



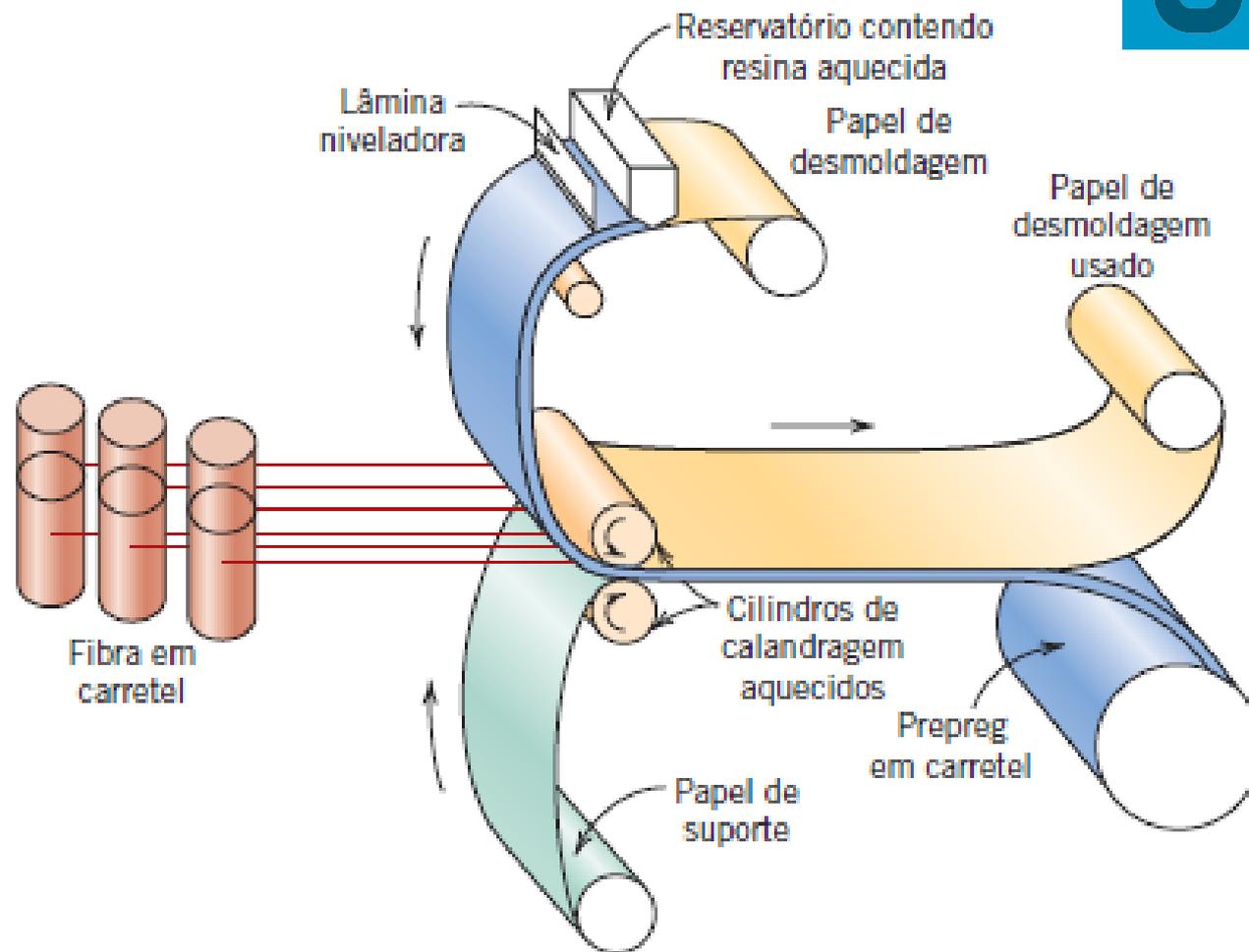


Figura 16.14 Diagrama esquemático ilustrando a produção de fitas de prepreg usando um polímero termorrígido.

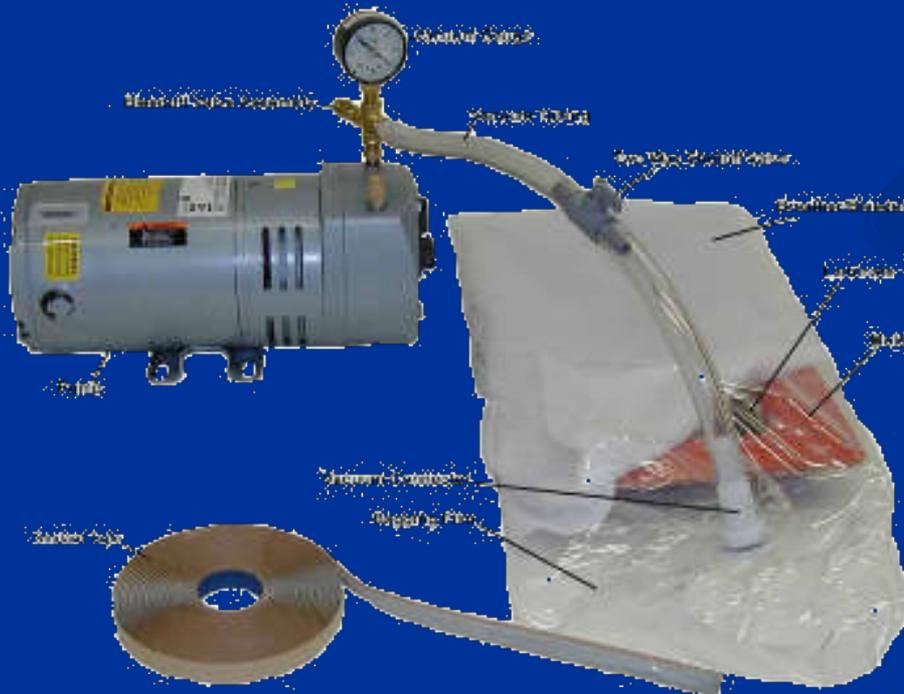
Processo de Molde Aberto na Fabricação de Compósitos

Processo de autoclave em embalagem a vácuo (pre-preg)

- É utilizado na **fabricação de laminados de elevado desempenho**, geralmente em sistemas fibra-resina epoxídica. Os materiais compósitos fabricados através deste método são especialmente importantes em aplicações aeronáuticas e aeroespaciais.
- Em 1º lugar é colocada sobre uma mesa uma **folha fina e comprida de material pré-impregnado, de fibra de carbono-resina epoxídica**. Este material pré-impregnado é formado por longas fibras unidirecionais de carbono no seio de uma matriz de resina epoxídica parcialmente curada.
- Em seguida, a folha de pré-impregnado é cortada em peças que são colocadas umas sobre as outras num molde com a forma desejada, obtendo-se um laminado
- **As várias camadas de folhas podem ser colocadas em diferentes orientações**, de modo a obter-se o tipo de resistência desejado, uma vez que cada camada tem a sua máxima resistência na direção paralela às fibras.

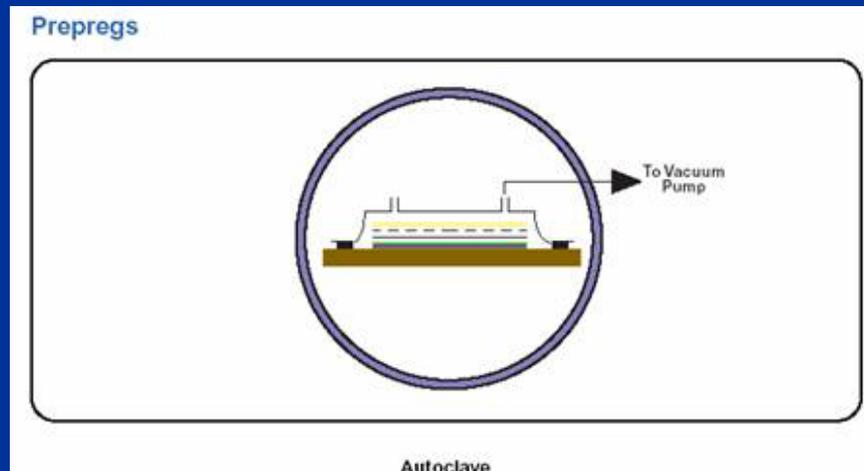
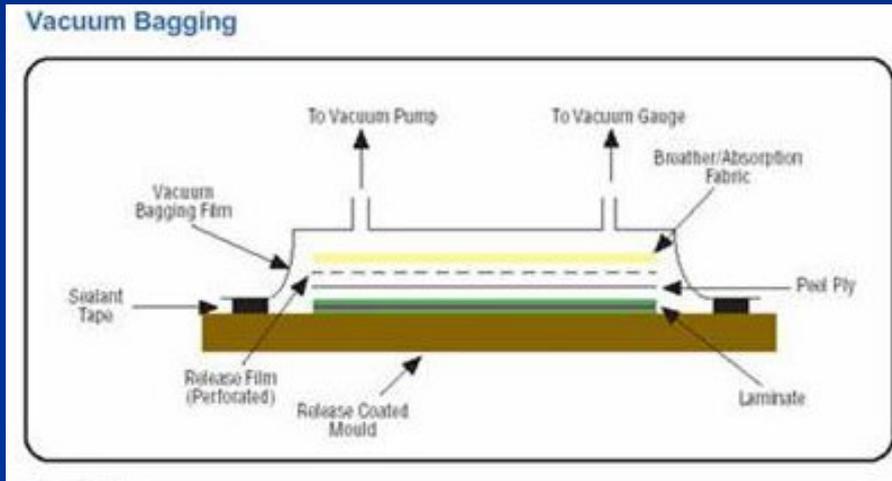
PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS :

- Colocação da fita pre-impregnada sobre um superfície trabalhada.
- Várias camadas para proporcionar a espessura desejada
- Arranjo unidirecional, mas em geral a orientação é alternada,
- Para a produção de camadas cruzadas ou em ângulo.
- Cura pela aplicação simultânea de calor e pressão
- Processo pode ser manual ou automatizado, mais eficaz em termos de custos.

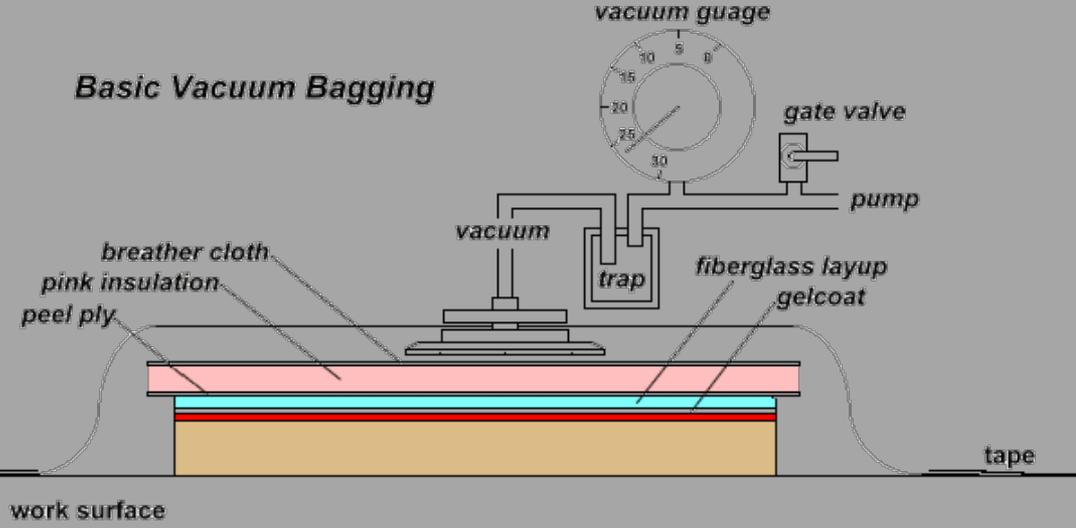


Processo de Autoclave em Embalagem a Vácuo para Fabricação de Compósito Pre-impregnado – Pre-Preg

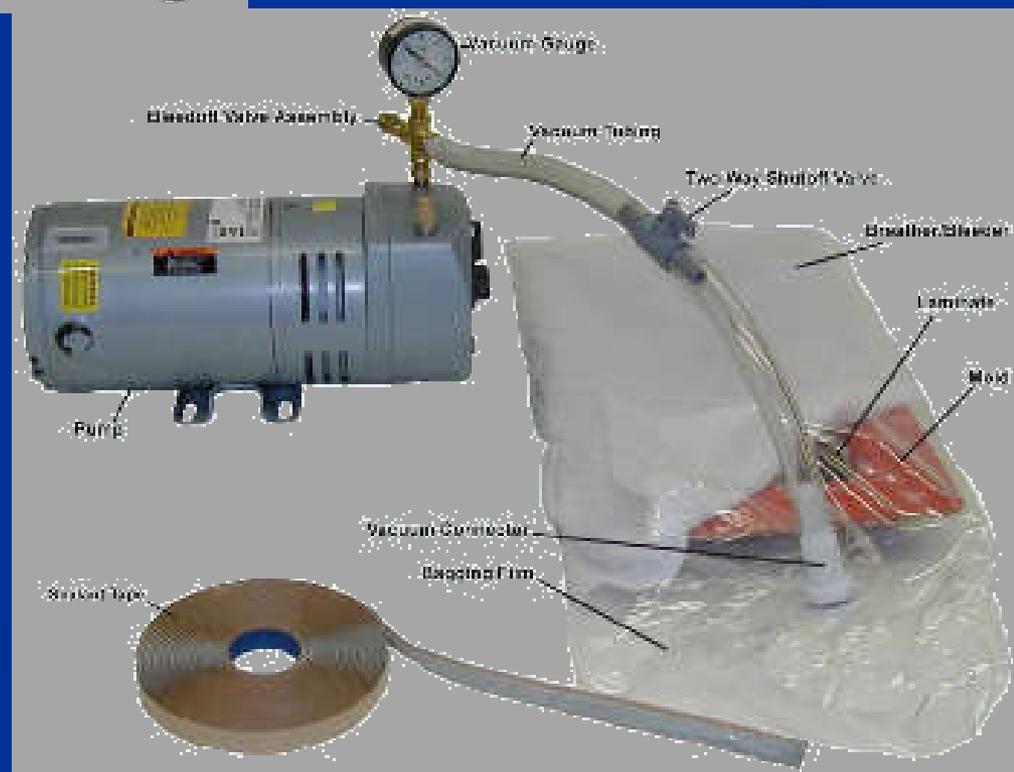
- O laminado é fechado conjuntamente com o molde numa embalagem, na qual se faz vácuo a fim de remover o ar que está aprisionado no interior da peça. Em seguida é colocado numa autoclave para se fazer a cura da resina.



Basic Vacuum Bagging



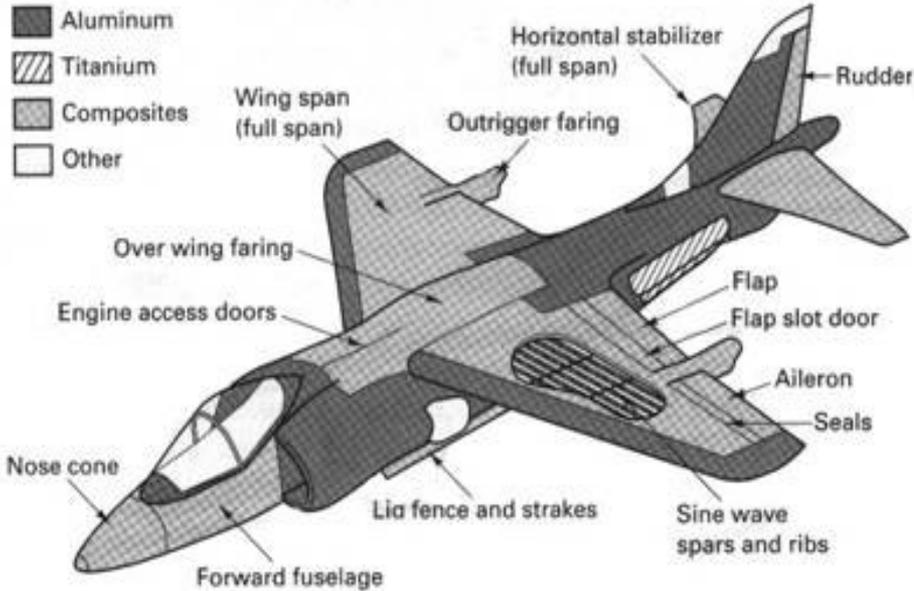
A handwritten signature in black ink, appearing to be 'John'.



Uso do Autoclave em Compósito Pré-impregnado na Indústria Aeroespacial

Harrier AV-8B

AV-8B Composite applications



- Cerca de 26% do peso desta aeronave é em compósito, na sua grande maioria de carbono/epóxi.

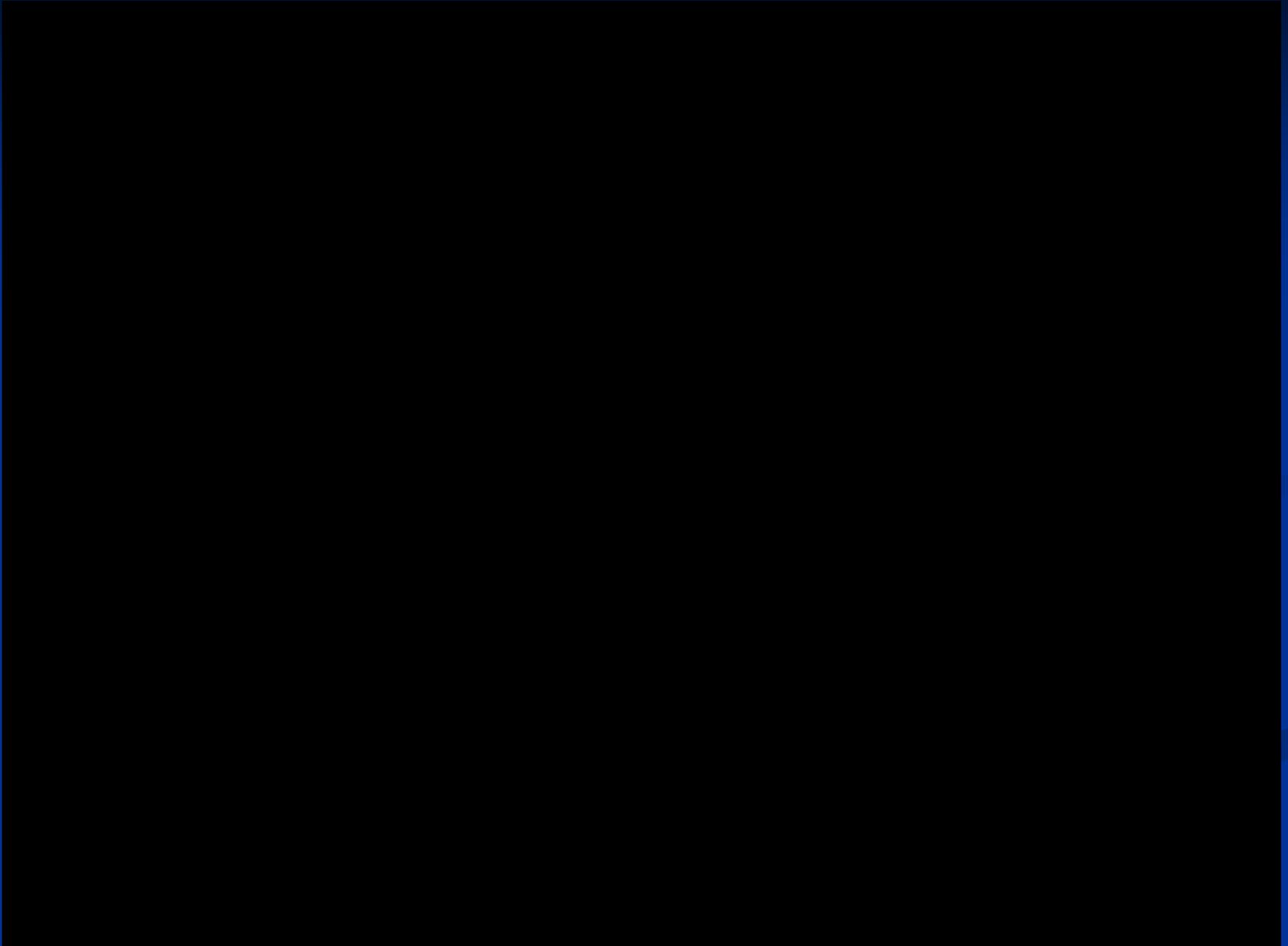


- Estabilizador horizontal do Harrier AV-8B II a entrar no autoclave para iniciar o processo de cura.

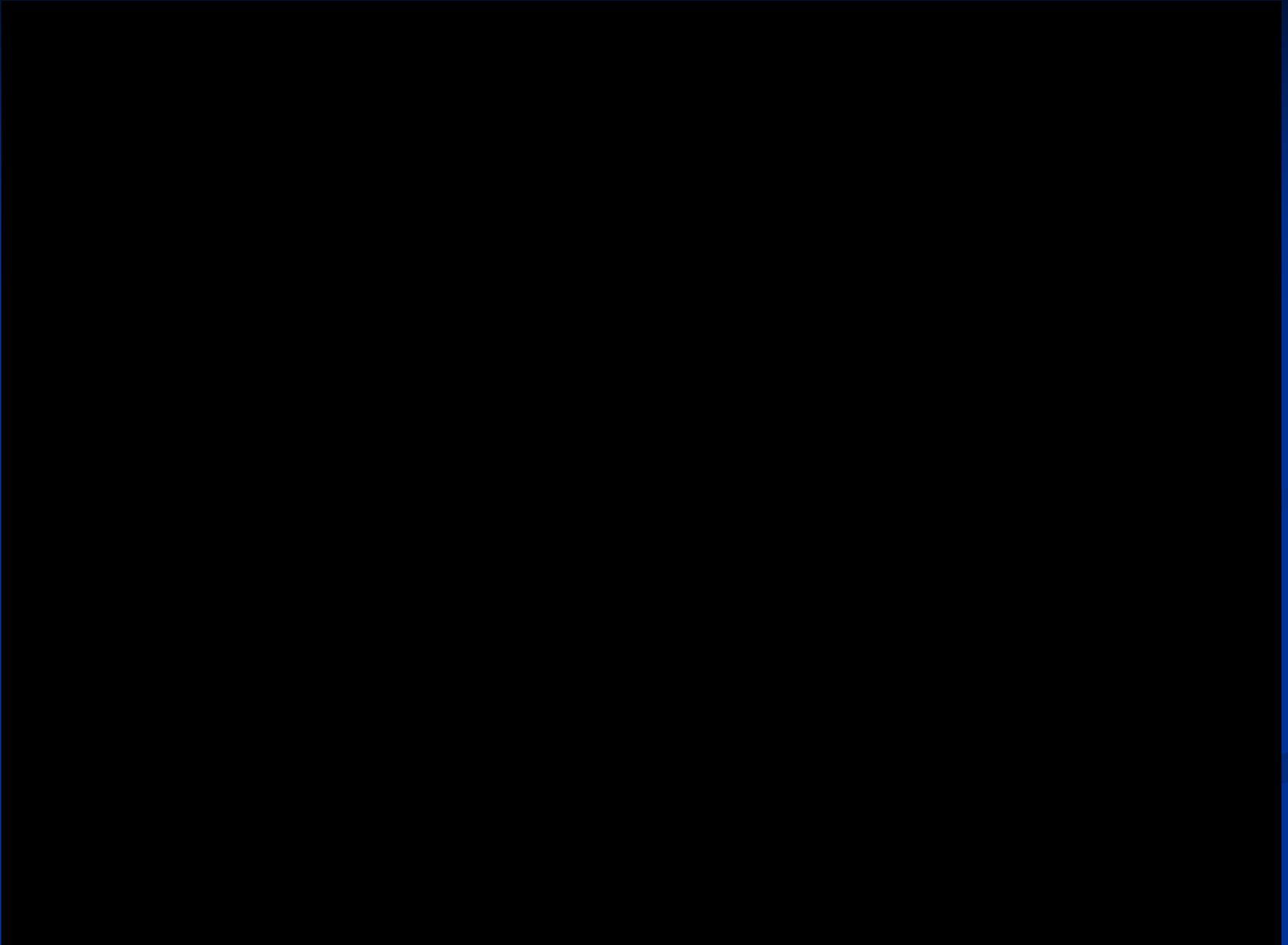
Compósito Pre-impregnado Caseiro



Compósito Pre-impregnado “LAY-UP” com Bolsa de Vácuo



Sistema Pré-Preg e moldagem por compressão



Processo de Molde Fechado na Fabricação de Compósitos

Processo de moldagem de placa SMC (Sheet Moulding Compound)

- Utilizado especialmente para a indústria automobilística.
- Processo permite bom controle da resina e obtenção de boas propriedades de resistência mecânica, facilitando a produção, em quantidade, de peças de grande dimensão e muito uniformes.
- A folha de SMC usada para a moldagem é normalmente obtida através de um processo contínuo altamente automatizado. Um multifio de feixes contínuos de fibra de vidro é cortado em comprimentos de cerca de 5 cm, os quais são depositados sobre uma camada de pasta (resina + carga).
- A seguir deposita-se outra camada da mistura de resina e carga sobre a camada anterior, de modo a obter uma sanduíche, contínua de fibra de vidro e pasta de resina com a respectiva carga.

Estruturas confeccionadas a partir do processo de SMC



Processo de Molde Fechado na Fabricação de Compósitos

Processo SMC ou de moldagem de folha (continuação)

- Este sanduíche, com a parte de cima e parte de baixa cobertas por polietileno é compactada e enrolada.
- Os rolos de folha de SMC são, em seguida, armazenados numa câmara de envelhecimento, durante cerca de 1 a 4 dias, para que a folha possa absorver bem as fibras de vidro.
- Os rolos de SMC são então deslocados para junto de uma prensa e cortados em pedaços com a forma adequada para a peça, colocando-se as folhas de SMC no interior de um molde aquecido (150°C).
- Uma vez fechado o molde, aplica-se pressão através da prensa hidráulica e o SMC flui de modo uniforme através do molde, obtendo-se a peça final.
- Por vezes, por meio da operação de prensagem, injecta-se através do molde um revestimento para melhorar a qualidade da superfície da peça em SMC.
- É especialmente vantajoso para a fabricação de painéis frontais e de grelhas, painéis da carroçaria e “capots”.

Processo SMC ou de moldagem de folha (vídeo)

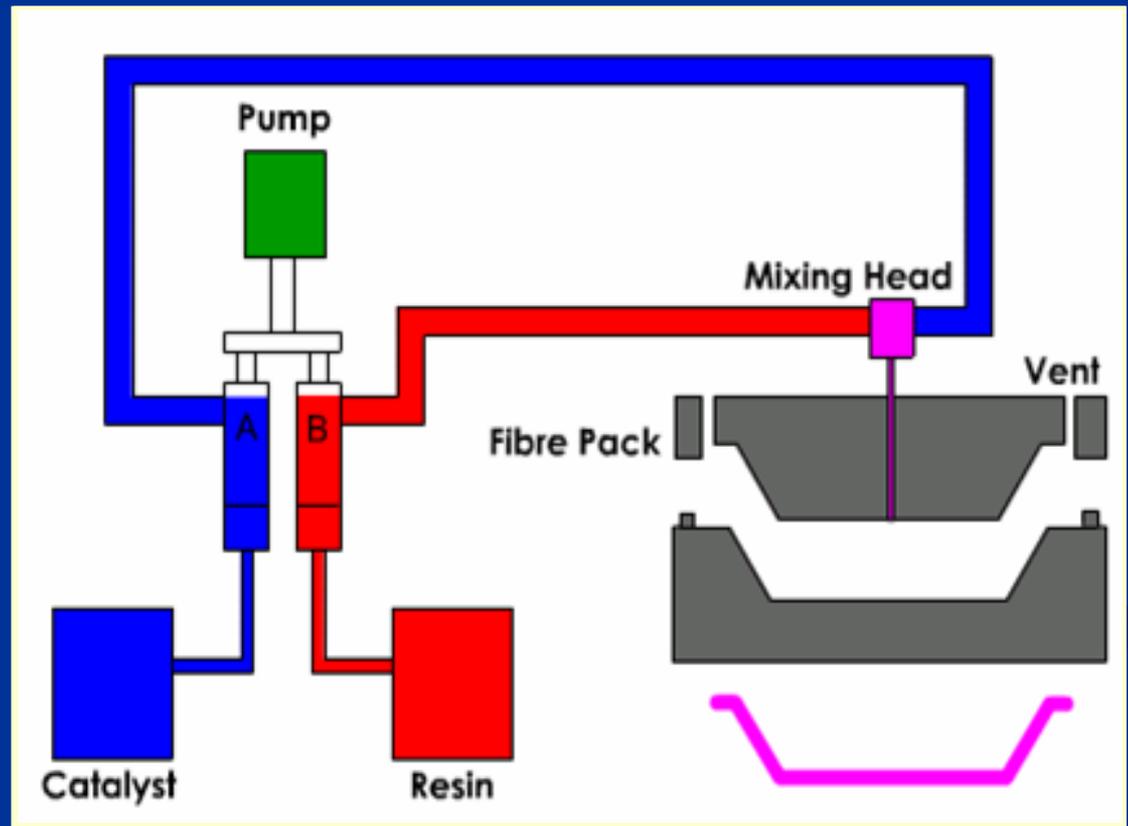


Processo de Fabricação RTM (Resin Transfer Molding)

Fabricação de CRF (fuselagem traseira compósito) contínuas, com redução de custos por volta de 30% relativo a tecnologia “clássica” baseada em pré-impregnados

Fases do processo

Utilizando
Preparação de
Fim da fase
uma bomba
misturadora
de dois eixos
de injeção
em um
molde
Intensifica-se
catalizador e
catalisador até
começa a fase
o misturador
de injeção



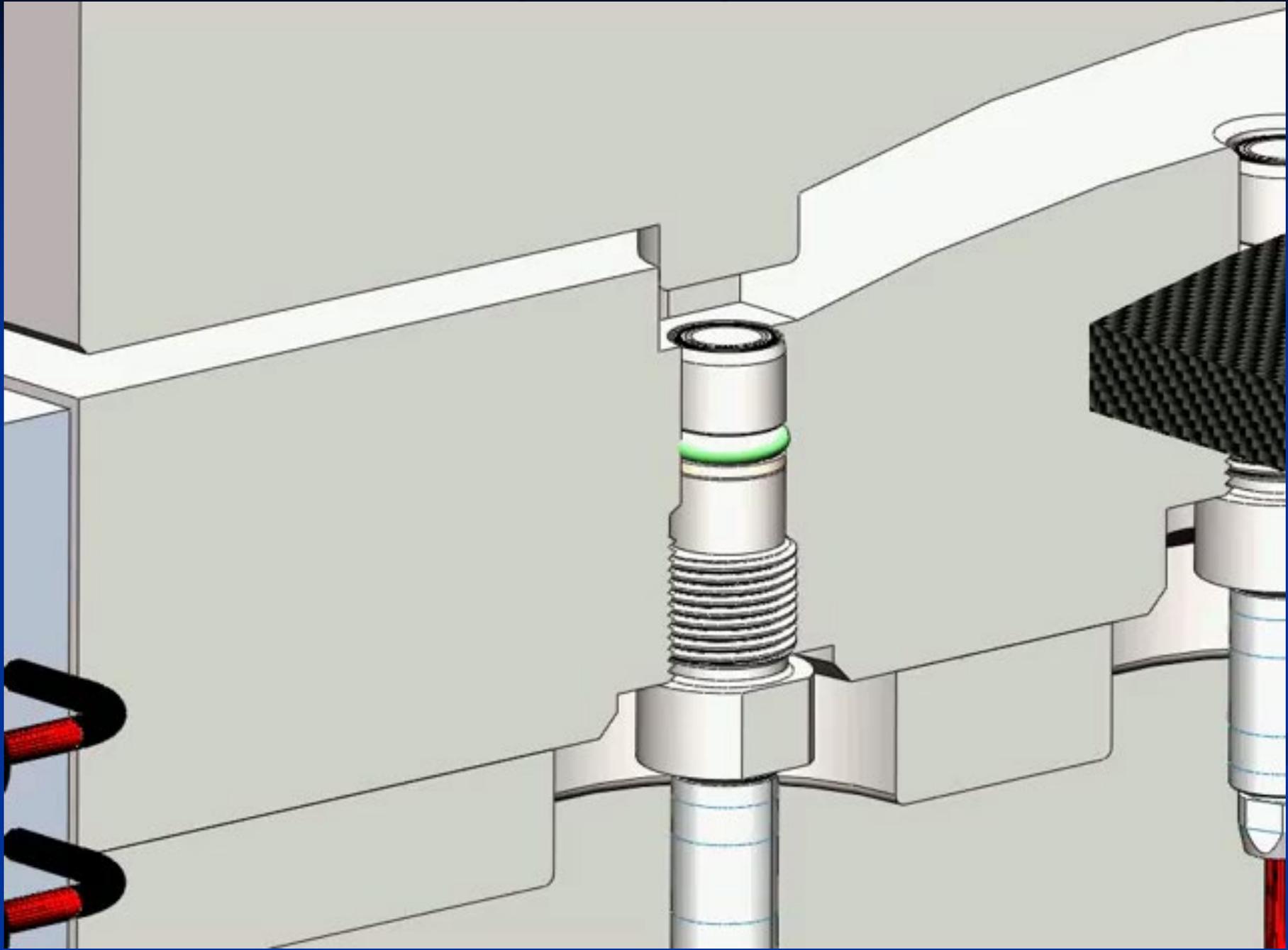
Equipamento de Injeção de Resina



Vantagem da Tecnologia RTM em Relação à Utilização de Pré-Impregnados

- Maior complexidade da forma
- Dimensões mais precisas
- Melhor acabamento de superfície
- Fibras na direção da espessura
- Volume de fibras alto, até 65%
- Incorporação direta dos insertos
- Redução dos custos de fabricação
- Possibilidade da automação do processo

Processo de Fabricação RTM (Resin Transfer Molding)



Processo de Fabricação RTM (Resin Transfer Molding)



Processo de Fabricação RTM (Resin Transfer Molding)



Processo de Fabricação RTM (Resin Transfer Molding)



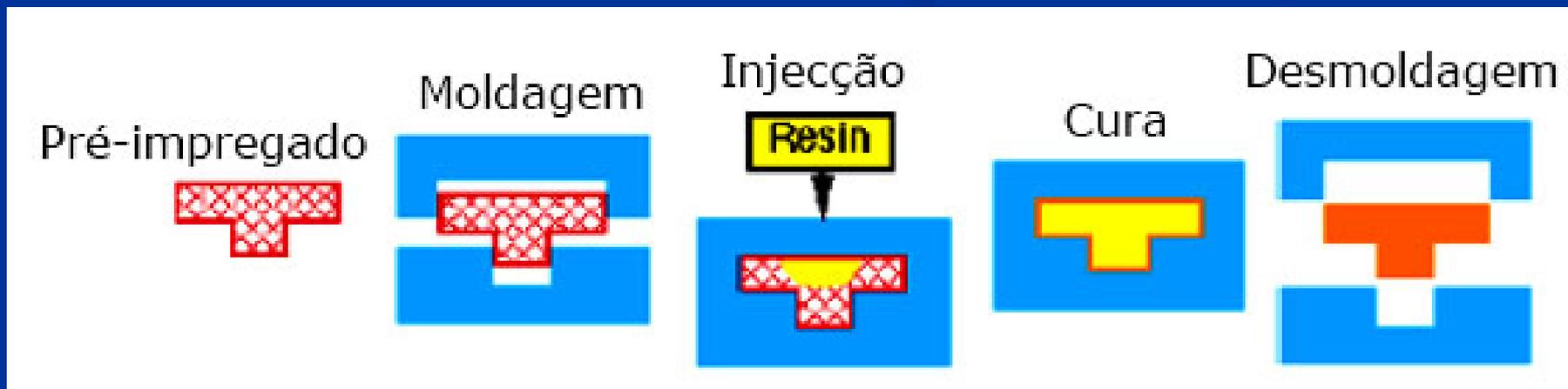
Processo de Molde Fechado na Fabricação de Compósitos

Moldagem por compressão e moldagem por injeção

- Estes são dois dos processos mais importantes, em termos de volume de material produzido. Estes processos são essencialmente iguais aos utilizados para polímeros, exceto em que, antes de se dar início ao processo, o reforço da fibra é misturado com a resina.

Moldagem por SRIM (Structural Injection Moulding)

- A resina é injetada numa cavidade do molde, onde se encontra o pré-impregnado, ocorrendo as reações e a cura.
- Embora possa ser utilizado vácuo para facilitar a impregnação dos reforços, a força, neste processo, deve-se à injeção da resina sob pressão.



PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

■ PULTRUSÃO

FABRICAÇÃO DE COMPONENTES COM COMPRIMENTOS CONTÍNUOS E SEÇÕES RETAS CONSTANTES : BARRAS, TUBOS, VIGAS, ETC.

FIG. A SEGUIR : AS MECHAS OU CABOS SÃO IMPREGNADOS COM UMA RESINA TERMO FIXA, ESTIRADOS DOS ATRAVÉS DE UM MOLDE DE AÇO QUE PRÉ CONFORMA A PEÇA DE ACORDO COM A FORMA DESEJADA, ALÉM DE ESTABELECEER A RAZÃO RESINA/FIBRA. O MATERIAL PASSA DEPOIS PELO MOLDE DE CURA, QUE É USINADO COM PRECISÃO, E CONFERE À PEÇA SUA FORMA FINAL. O MOLDE É AQUECIDO, PARA INICIAR A CURA DA MATRIZ. UM DISPOSITIVO ESTIRA O MATERIAL ATRAVÉS DOS MOLDES, DETERMINANDO A VELOCIDADE DE PRODUÇÃO. PODEM SER FABRICADOS SEÇÕES TUBULARES E OCAS- MANDRIS CENTRAIS OU INSERÇÃO DE NÚCLEOS OCOS.

Processo de Molde Fechado na Fabricação de Compósitos

Processo Pultrusão em contínuo (Pultrusion)

- Fabricação de componentes com comprimentos contínuos e seções retas constantes (vigas, calhas, tubos cilíndricos, tubos ocos com uso de mandril etc..)
- Usam-se fibras contínuas que passam primeiramente por um banho de resina, sendo a seguir trefiladas através de uma fiação aquecida, a qual determina a forma que terá a seção da peça final.
- Com estes materiais obtêm-se resistências mecânicas muito elevadas, devido à grande concentração de fibras e à sua orientação paralela ao comprimento das peças trefiladas.

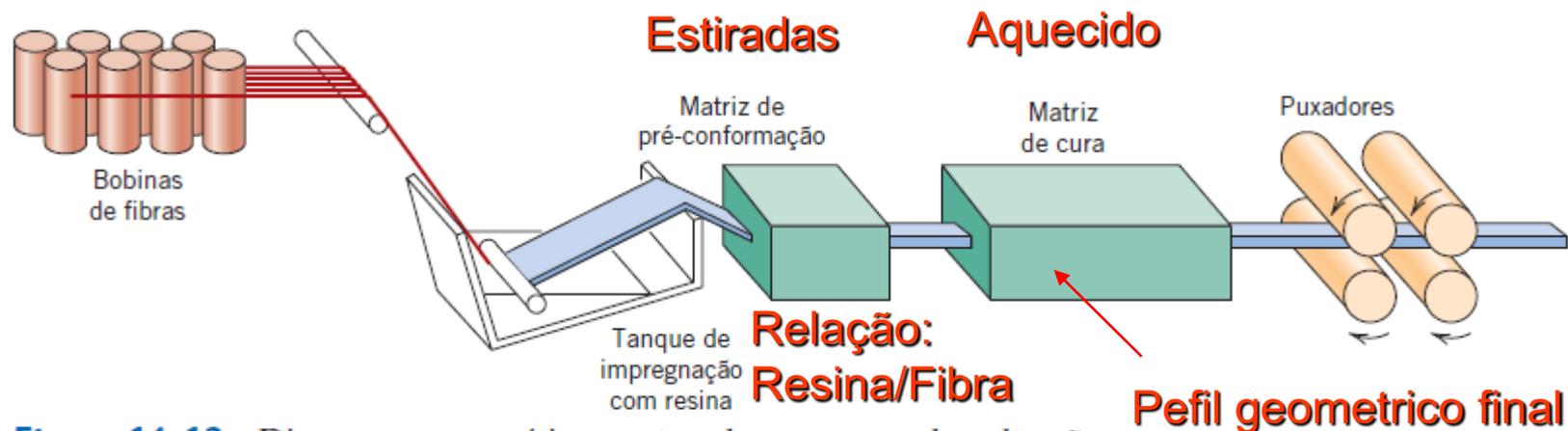


Figura 16.13 Diagrama esquemático mostrando o processo de pultrusão.

PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS REFORÇADOS POR FIBRAS - PULTRUSÃO

■ REFORÇOS : em concentrações de 40 a 70%

- Fibras de vidro
- Carbono
- Aramidas



■ Matrizes

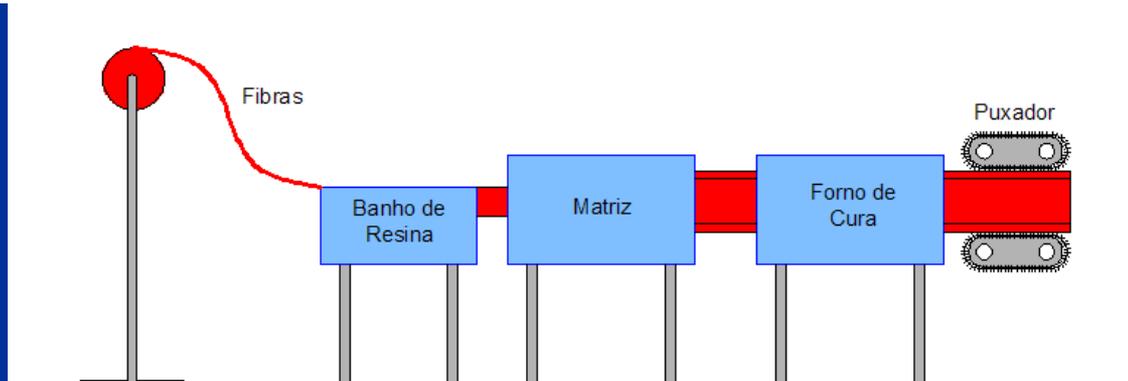
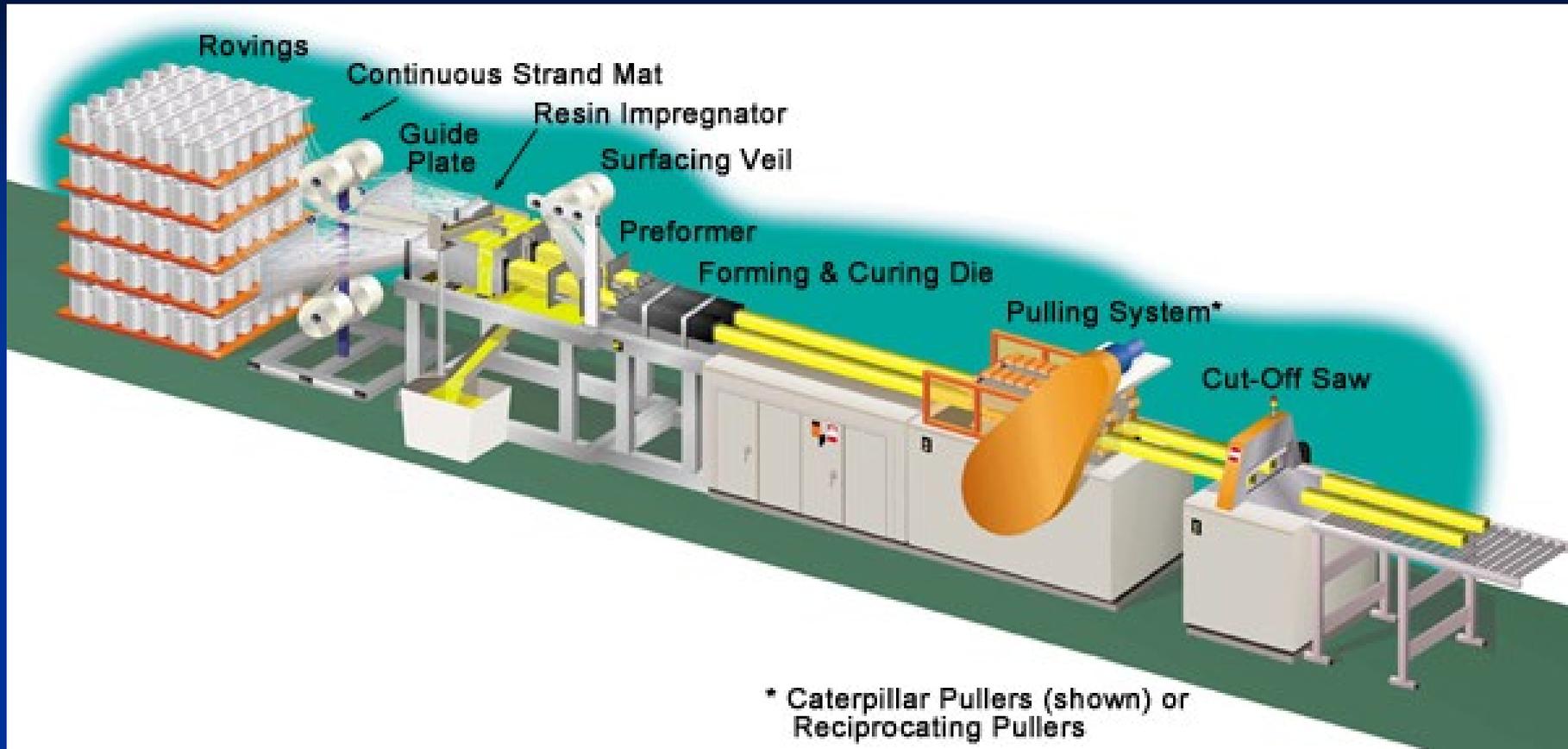
- Poliésteres
- Ésteres vinílicos
- Resinas epóxi.



■ Processo

- Contínuo
- Pode ser automatizado,
- Taxas de produção relativamente altas
- Ampla variedade de formas
- Sem limite do comprimento do material fabricado.
- Eficaz em termos de custos

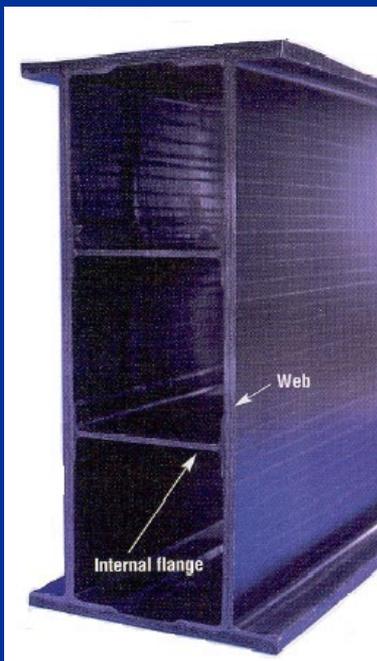
Processo Pultrusão em contínuo (Pultrusion)



Estrutura confeccionada a partir do processo de pultrusão

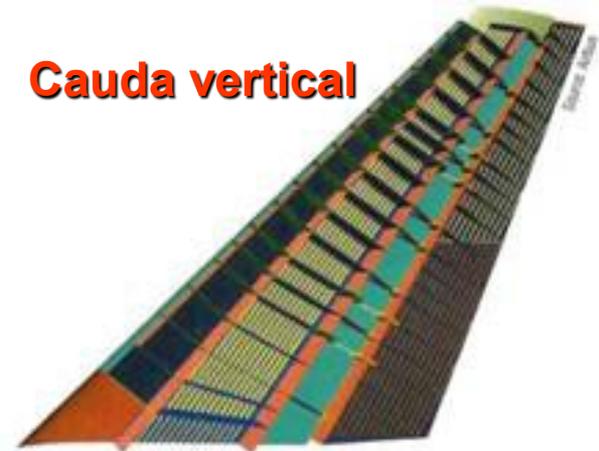


Airbus A 380



Perfil duplo obtido por pultrusão. Fonte: www.me.gatech.edu

Cauda vertical



The highly loaded vertical tail of the A380 (shown here in a conceptual drawing) was designed to incorporate a number of composite processes and materials, including pultruded profiles produced using the JAMCO process.



JAMCO's pultruded carbon fiber/epoxy stringers are shown here after assembly with skin panels for an Airbus vertical tail.

Processo Pultrusão em contínuo (Pultrusion) – Com laminador

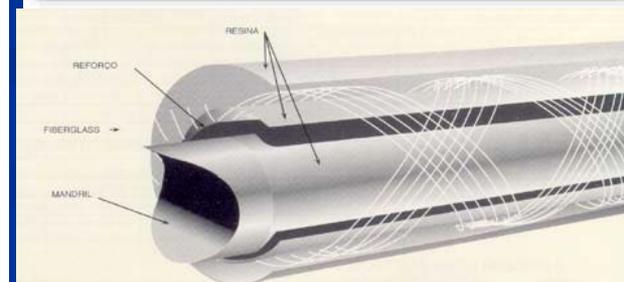
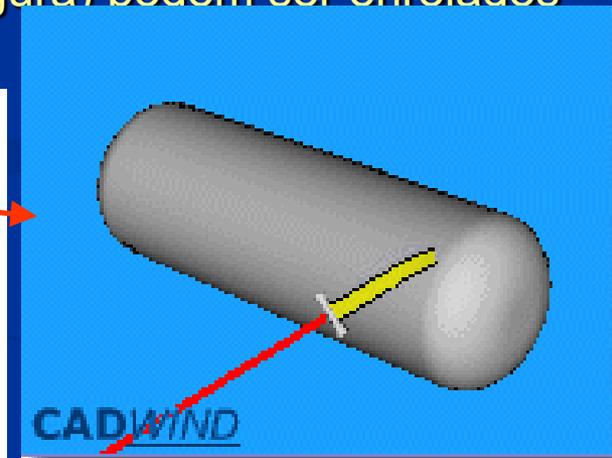
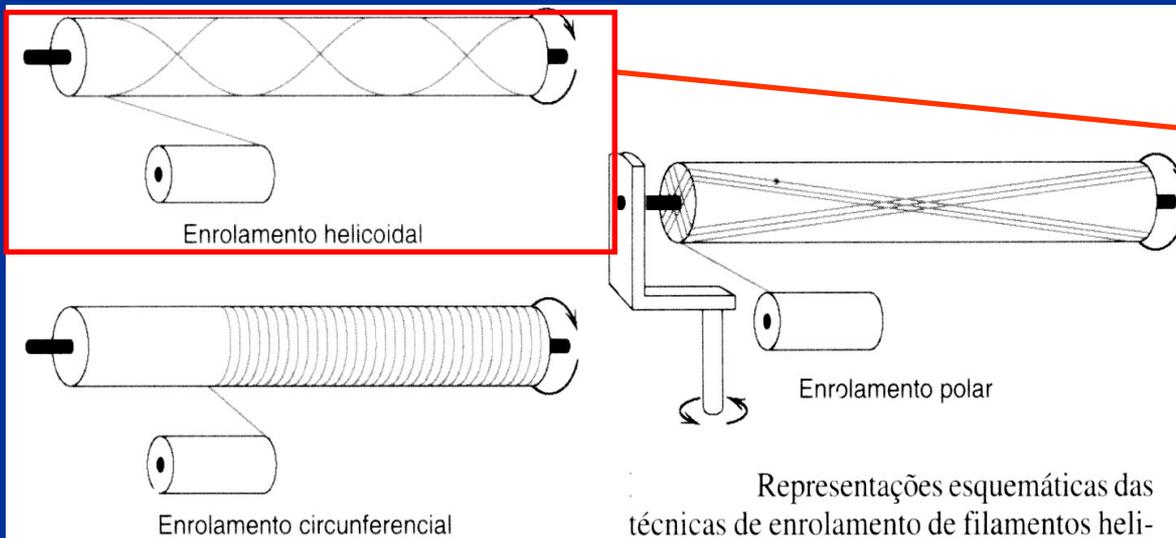
YOUR GUIDE TO YML RGL SMS D X FL

Processo Pultrusão em contínuo (Pultrusion)



Enrolamento de Filamento (Filament Winding)

- Processo em que as fibras de reforço contínuas são posicionadas de maneira precisa e de acordo com um padrão pré-determinado para compor uma forma oca (geralmente cilíndrica)
- Fibras (fios) ou mechas são primeiramente alimentadas com banho de resina e em seguida enroladas continuamente ao redor de um mandril;
- Após o numero apropriado de camadas, a cura e executada em um forno ou T_{amb} , posteriormente o mandril e removido.
- Mechas de pré-impregnados delgados (10 mm largura) podem ser enrolados em filamentos



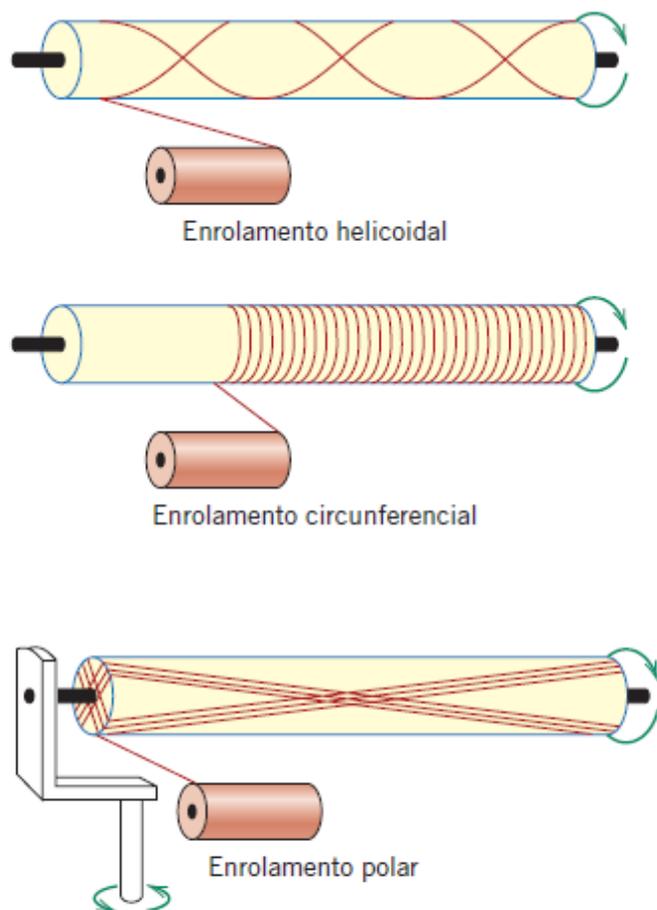


Figura 16.15 Representações esquemáticas das técnicas de enrolamento filamen-
tar helicoidal, circunferencial e polar.

[De N. L. Hancox (Editor), *Fibre Composite Hybrid Materials*, The Macmillan Company, Nova York, 1981.]

São possíveis vários padrões de enrolamento (ou seja, circunferencial, helicoidal e polar) para gerar as características mecânicas desejadas. As peças obtidas por enrolamento filamen-
tar têm razões resistência-peso muito altas. Além disso, essa técnica permite um alto grau de controle sobre a uniformidade e a orientação do enrolamento. Quando automatizado, o processo é muito atrativo economicamente. Estruturas comuns fabricadas por enrolamento filamen-
tar incluem carcaças de motores de foguetes, tanques de armazenamento e tubulações, e vasos de pressão.

Atualmente, são utilizadas técnicas de fabricação para a produção de uma grande variedade de formas estruturais, não necessariamente limitadas a superfícies de revolução (por exemplo, vigas “I”). Essa tecnologia está avançando muito rapidamente, pois é muito eficiente em relação ao custo.

Vantagens do Processo de Enrolamento de Filamento:

- Razão resistência peso muito alta;
- Técnica que permite alto grau de controle sobre a uniformidade e orientação;
- Quando automatizado, o processo é mais economicamente atrativo;

Estruturas confeccionadas a partir do enrolamento de filamentos:



- Carcaça e peças de motores de foguetes;
- Vigas "I"

Não somente superfícies de revolução

PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS REFORÇADOS POR FIBRAS ENROLAMENTO DE FILAMENTO

- PEÇAS ENROLADAS EM FILAMENTOS :
 - ALTAS RAZÕES RESISTÊNCIA-PESO,
 - ALTO CONTROLE SOBRE A UNIFORMIDADE E A ORIENTAÇÃO DO ENROLAMENTO.
- AUTOMAÇÃO :
 - O PROCESSO É ECONOMICAMENTE ATRATIVO.

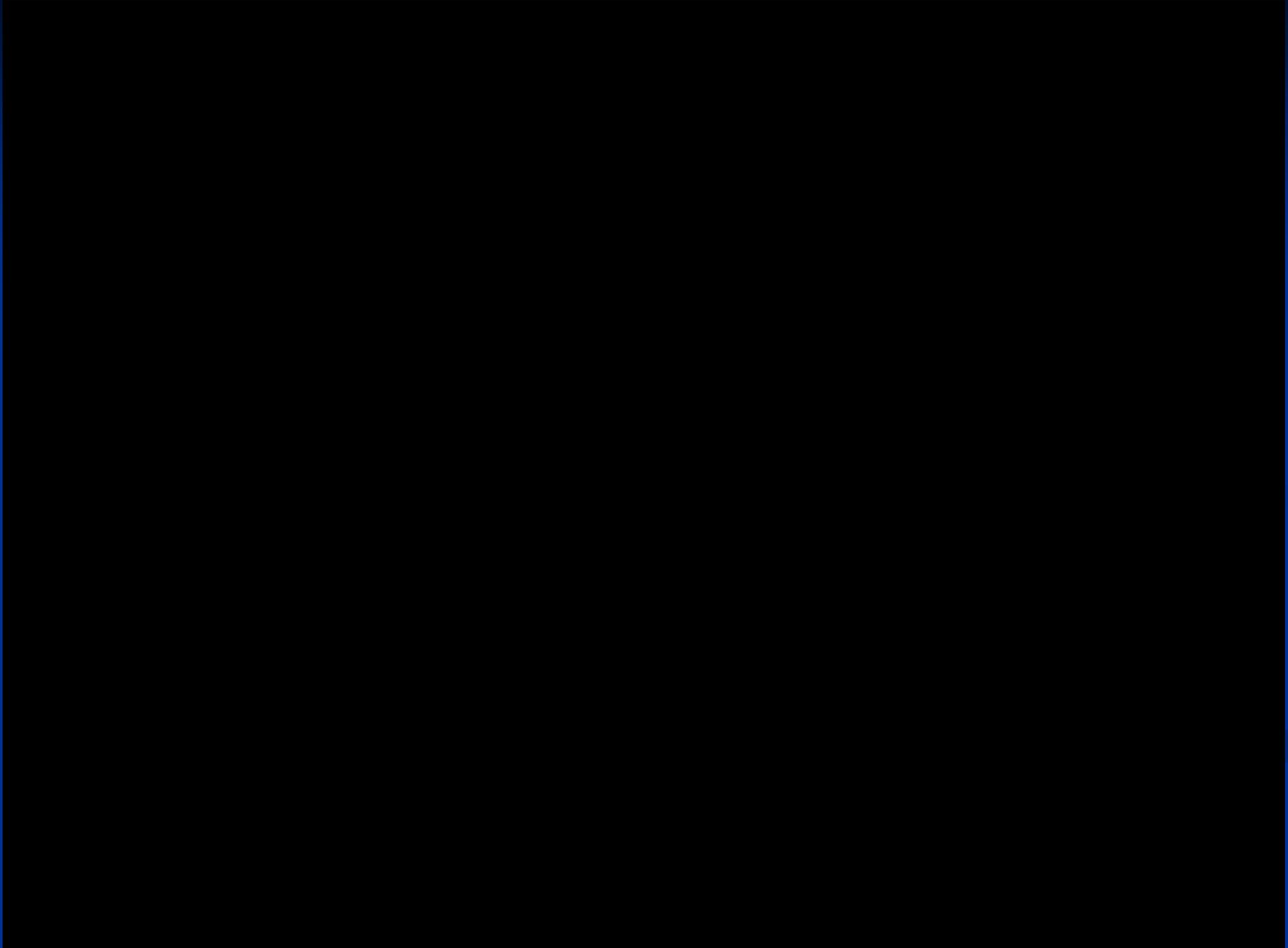
ATUALMENTE :

- NOVAS TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE AMPLA VARIEDADE DE FORMAS ESTRUTURAIS, NÃO LIMITADAS A SUPERFÍCIES
DE REVOLUÇÃO, COMO VIGAS I.
- TECNOLOGIA COM RÁPIDO AVANÇO, DEVIDO À EXCELENTE
RELAÇÃO
CUSTO-BENEFÍCIO

PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS REFORÇADOS POR FIBRAS ENROLAMENTO DE FILAMENTO

- PADRÕES DE ENROLAMENTO :
 - CIRCUNFERENCIAL
 - HELICOIDAL
 - POLAR.
- APLICAÇÕES :
 - CARCAÇAS DE MOTORES DE FOGUETES
 - TANQUES DE ARMAZENAMENTO
 - TUBULAÇÕES E VASOS DE PRESSÃO

Enrolamento de Filamento (Filament Winding) - VÍDEO



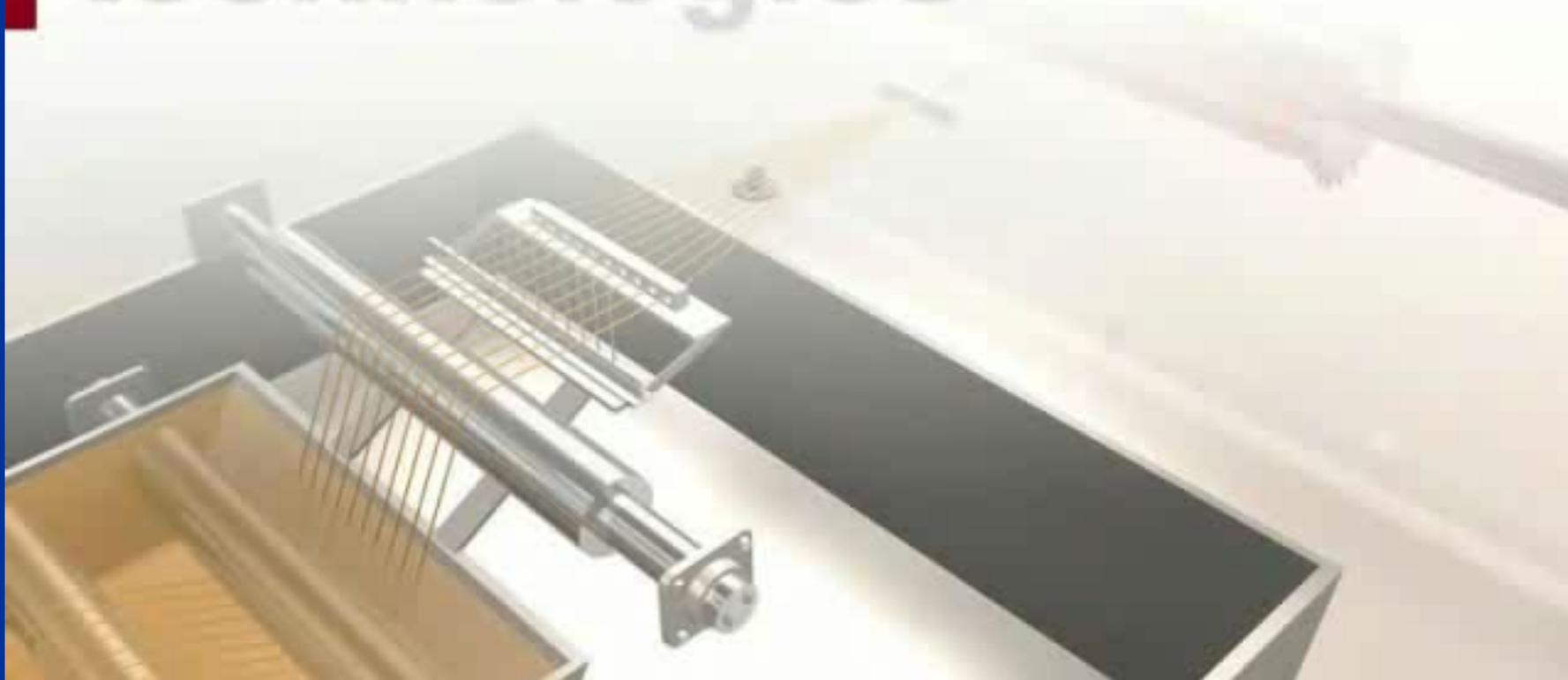
Enrolamento de Filamento (Filament Winding) - VÍDEO

Araldite

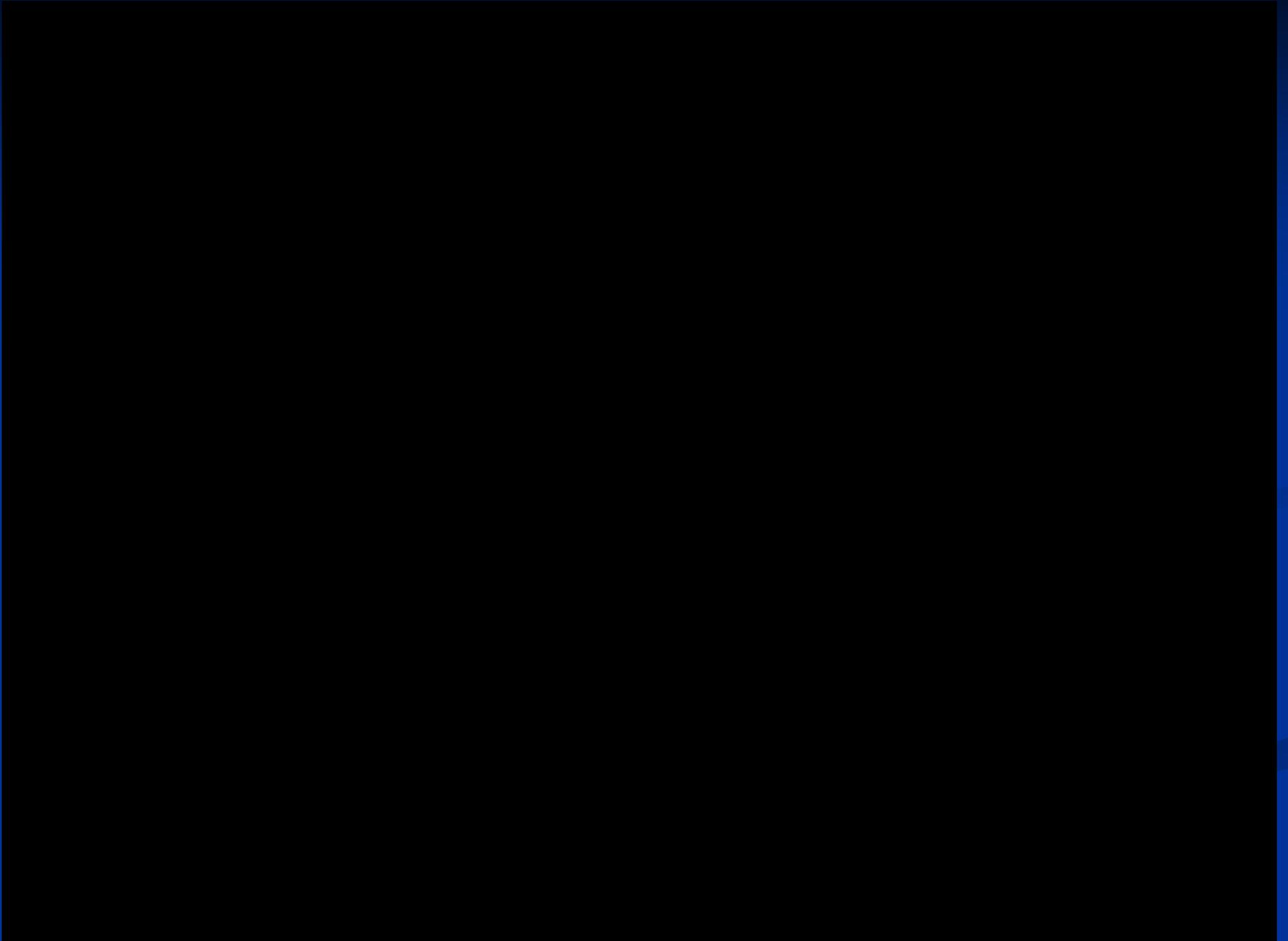
HUNTSMAN

Enriching lives through innovation

Innovative
Filament Winding
technologies

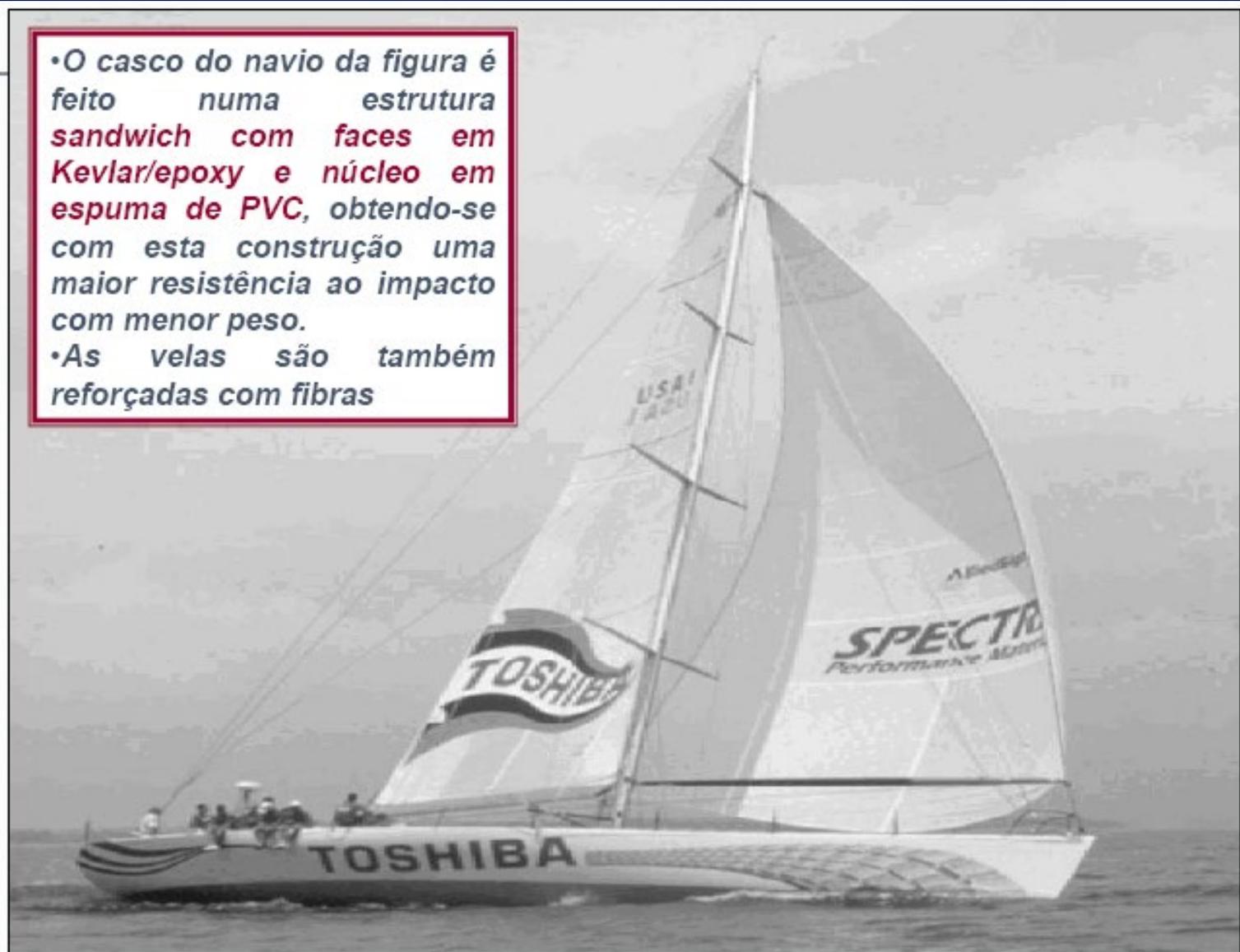


Enrolamento de Filamento (Filament Winding) - VÍDEO



COMPÓSITOS ESTRUTURAIS

- O casco do navio da figura é feito numa estrutura sandwich com faces em Kevlar/epoxy e núcleo em espuma de PVC, obtendo-se com esta construção uma maior resistência ao impacto com menor peso.
- As velas são também reforçadas com fibras



COMPÓSITOS ESTRUTURAIS

FORMADOS POR MATERIAIS HOMOGÊNEOS OU HETEROGÊNEOS, CUJAS PPDES DEPENDEM NÃO SÓ DAS PPDES DOS MATERIAIS CONSTITUINTES, MAS TAMBÉM DA GEOMETRIA DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS. EX :

- COMPÓSITOS LAMINARES
- PAINÉIS EM SANDUÍCHE

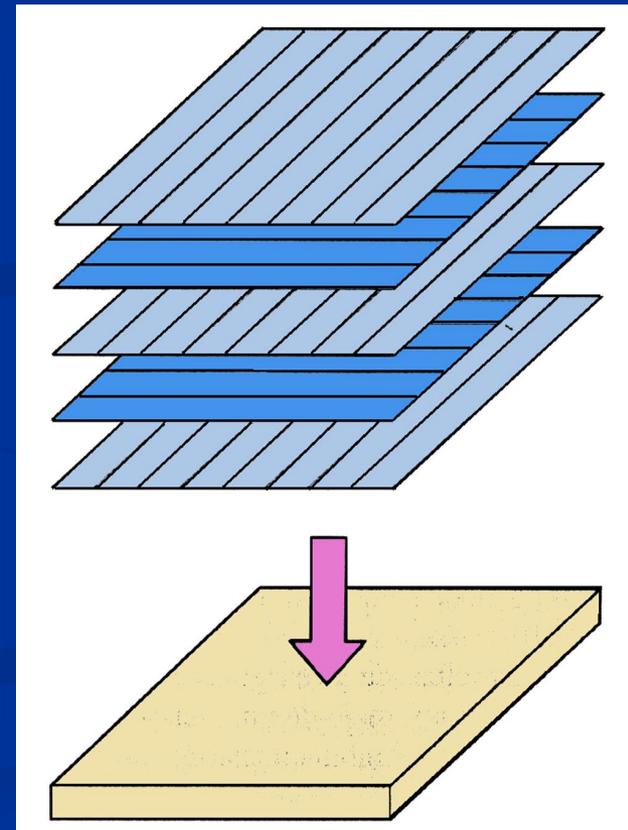
O TRATAMENTO DADO A ESTES MATERIAIS SERÁ RELATIVAMENTE SUPERFICIAL.

COMPÓSITOS ESTRUTURAIS

- *Um **compósito estrutural** é composto normalmente tanto por materiais homogêneos como por materiais compósitos, cujas propriedades dependem também do projeto geométrico dos elementos estruturais*

Compósitos laminares

- *É composto por folhas ou painéis bidimensionais que possuem uma direção preferencial de alta resistência.*
- *As camadas são empilhadas e cimentadas umas às outras de tal modo que a orientação da direção de alta resistência varia de acordo com cada camada*
- *Um exemplo é o esqui moderno*



COMPÓSITOS LAMINARES

Compostos por folhas ou painéis bidimensionais, que possuem uma direção preferencial de alta resistência, como madeira e plásticos, reforçados com fibras contínuas e alinhadas. As camadas são empilhadas e cimentadas e a orientação da direção de alta resistência varia com a direção de cada camada. Fig.16.16. Ex.: MADEIRA COMPENSADA.

■ LAMINADOS –

Empregam-se materiais na forma de tecidos :

- FIBRAS DE ALGODÃO, PAPEL, FIBRAS DE VIDRO TRANÇADAS em uma MATRIZ POLIMÉRICA.

Um compósito laminar apresenta maior resistência em várias direções no plano bidimensional do que na direção na qual as fibras estão alinhadas.

(a) O esqui moderno é uma estrutura em compósito relativamente complexa. Nessa ilustração da seção transversal de um esqui de alto desempenho estão mostrados os vários componentes. A função de cada componente está assinalada, assim como o material usado em sua construção.

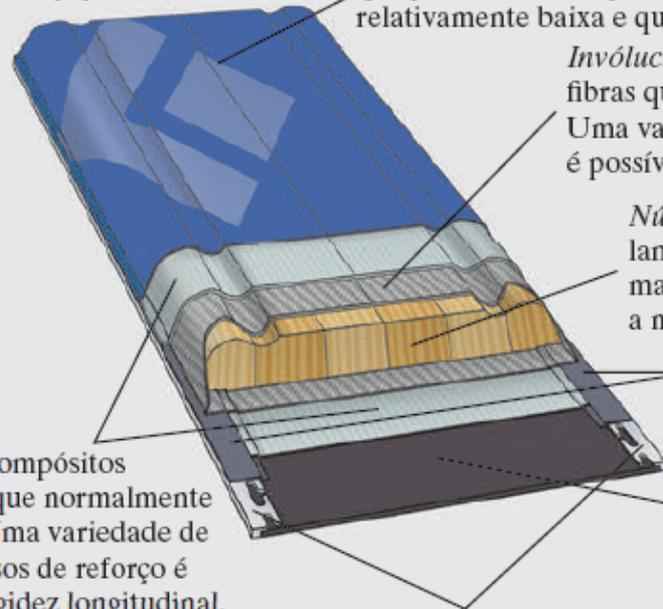
(b) Fotografia de um esquiador em uma neve fresca.

© Doug Berry/iStockphoto



(b)

Cortesia de Black Diamond Equipment, Ltd.



Lâmina superior. Polímero à base de poliamida que possui uma temperatura de transição vítrea relativamente baixa e que resiste à formação de lascas.

Invólucro da caixa de torção. Compósitos reforçados com fibras que usam fibras de vidro, de aramida ou de carbono. Uma variedade de tramas de tecidos e de pesos de reforço é possível para “ajustar” as características de flexão do esqui.

Núcleo. Espuma, laminados verticais de madeira, laminados de espuma de madeira, colmeia, e outros materiais. Entre as madeiras comumente usadas inclui-se a madeira de álamo, o bambu, a balsa e o vidoeiro.

Material para absorção de vibrações. A borracha é normalmente utilizada.

Base. Polietileno de ultra-alto peso molecular é usado por causa de seu baixo coeficiente de atrito e de sua resistência à abrasão.

Camadas de reforço. Compósitos reforçados com fibras que normalmente usam fibras de vidro. Uma variedade de tramas de tecidos e pesos de reforço é possível para prover rigidez longitudinal.

Arestas. Aço-carbono que foi tratado para ter uma dureza de 48 HRC. Facilita a realização de curvas ao “cortar” a neve.

(a)

PAINÉIS EM SANDUÍCHE

- São considerados **COMPÓSITOS ESTRUTURAIS**.
- Consistem de **DUAS FOLHAS EXTERNAS OU FACES** mais resistentes, separadas por uma camada de material menos denso – **RECHEIO** – que possui rigidez e resistência menores.
- **FACES** – suportam a maior parte da carga e tensões de flexão transversais.
- **MATERIAIS DAS FACES**
 - **LIGAS DE ALUMÍNIO**
 - **PLÁSTICOS REFORÇADOS POR FIBRAS**
 - **TITÂNIO**
 - **AÇO**
 - **MADEIRA COMPENSADA.**

PAINÉIS EM SANDUÍCHE

- RECHEIO –
 - SEPARA AS FACES E RESISTE ÀS DEFORMAÇÕES PERPENDICULARES AO PLANO DA FACE.
 - PROPORCIONA UM CERTO GRAU DE RIGIDEZ CONTRA O CISALHAMENTO AO LONGO DOS PLANOS PERPENDICULARES ÀS FACES.
- MATERIAIS DO RECHEIO –
 - POLÍMEROS EM ESPUMA, BORRACHAS SINTÉTICAS
 - CIMENTOS ORGÂNICOS E MADEIRA DE Balsa.
 - COLMEIA - consiste em finas folhas moldadas com o formato de células hexagonais que se intertravam, com os seus eixos perpendiculares aos planos das faces. O material pode ser semelhante ao das faces. Fig.16.17.

COMPÓSITOS ESTRUTURAIS

Painéis em sanduíche

São considerados uma classe de compósitos que consistem em duas folhas externas mais resistentes que se encontram separadas por uma camada de material menos denso que possui maior rigidez e menor resistência

- As faces suportam a maior parte da carga para dentro do plano*
- O recheio serve para separar as faces e resistir a deformações perpendiculares (flexão)*
- Entre os materiais que são usados para as faces estão: ligas de alumínio, plásticos reforçados com fibras, titânio, aço, madeira compensada*
- Entre os materiais usados como recheio estão: espumas, borrachas sintéticas, cimentos inorgânicos e madeira de balsa*
- Aplicações: telhados, pisos e paredes de prédios; asas, fuselagem; leme horizontal de aeronaves, assoalho de aeronaves.*

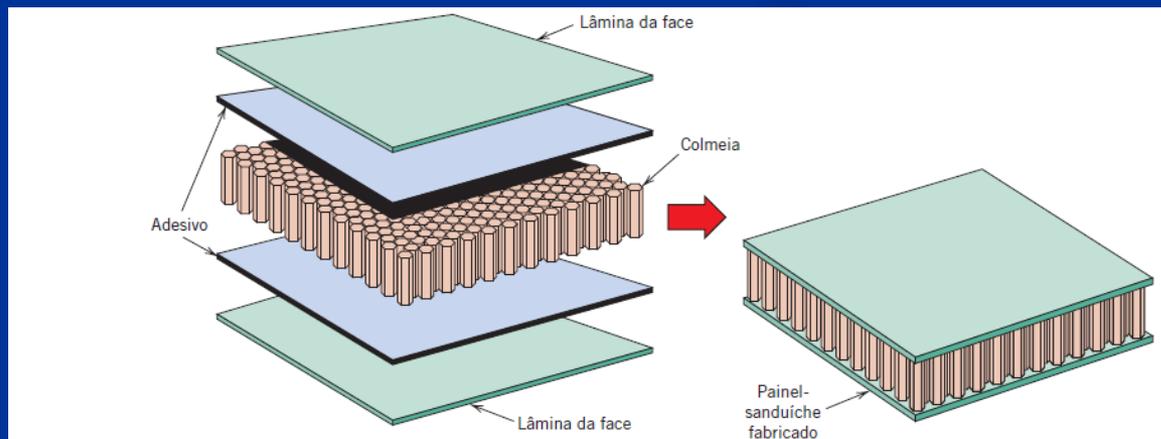


Figura 16.18 Diagrama esquemático mostrando a construção de um painel-sanduíche com núcleo de colmeia. (Reimpresso com permissão de *Engineered Materials Handbook*, Vol. 1, *Composites*, ASM International, Materials Park, OH, 1987.)

Glare composites



Glare as an example of intrinsic hybrid composites



GLARE Alumínio mais Fibra de Vidro no Avião Airbus A380



RESUMO

COMPÓSITOS

MATERIAIS MULTIFÁSICOS QUE APRESENTAM UMA COMBINAÇÃO DESEJÁVEL DAS MELHORES PROPRIEDADES DAS SUAS FASES CONSTITUINTES.

CLASSIFICAÇÃO

1. COMPÓSITOS REFORÇADOS COM PARTÍCULAS

A. COM PARTÍCULAS GRANDES. O reforço melhora ppdes mecânicas.

Concreto e concreto de cimento Portland. A resistência mecânica pode ser aumentada pela inserção de barras de aço, arames, etc, no cimento fresco, empregando-se técnicas de protensão e pós-tracionamento.

B. RESISTÊNCIA AUMENTADA POR DISPERSÃO – melhor resistência.

Partículas da fase dispersa inibem o movimento de discordâncias. Interações a nível atômico.

RESUMO

2 - COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

- MAIOR EFICIÊNCIA DE REFORÇO.
- O REFORÇO SÓ É SIGNIFICATIVO SE A LIGAÇÃO FIBRA-MATRIZ FOR FORTE.

A. CLASSIFICAÇÃO DOS REFORÇOS COM FIBRAS, BASEADA NO DIÂMETRO

- UÍSKUERES
- FIBRAS
- ARAMES

B. CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO COMPRIMENTO DAS FIBRAS

PARA A COMBINAÇÃO FIBRA-MATRIZ EXISTE UM DADO **COMPRIMENTO CRÍTICO DE FIBRA**. AS FIBRAS **CONTÍNUAS** EXCEDEM ESTE VALOR. AS FIBRAS QUE SÃO MENORES SÃO CHAMADAS DE **DESCONTÍNUAS**.

RESUMO

C. CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO ARRANJO DAS FIBRAS

a. FIBRAS CONTÍNUAS E ALINHADAS –

- Ppdes mecânicas dos compósitos são altamente anisotrópicas.
- Foi discutido o comportamento tensão-deformação para o carregamento longitudinal.
- REGRA DAS MISTURAS $p/$ módulo nas direções longitudinal e transversal
- Equação para a RESISTÊNCIA LONGITUDINAL

b. FIBRAS CURTAS E DISCONTÍNUAS

i. ALINHADAS –

- Resistência e rigidez significativas na direção longitudinal

ii. ALEATORIAMENTE ORIENTADAS –

- Limitações na eficiência do reforço.
- Ppdes são isotrópicas.

RESUMO

D. CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO TIPO DE MATRIZ

a. COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA

- Mais comuns
- Reforços com fibras de vidro, carbono e aramidas
- Temperaturas de operação não podem ser muito elevadas.
- Materiais da matriz : baixa densidade, para se obter resistência específica e/ou módulo específico elevados

b. COMPÓSITO DE MATRIZ METÁLICA

- Em geral, são reforçados com fibras e úisqueres
- Temperaturas de operação mais elevadas
- Materiais da matriz devem ter baixa densidade

c. COMPÓSITO DE MATRIZ CERÂMICA

- Maior objetivo é aumentar a tenacidade à fratura

d. COMPÓSITOS CARBONO-CARBONO

- Contendo fibras de carbono em uma matriz pirolizada de carbono

e. COMPÓSITOS HÍBRIDOS

- Contendo pelo menos dois tipos diferentes de fibras

RESUMO

E. TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

a. PULTRUSÃO

b. PREPREG

c. ENROLAMENTO DE FILAMENTOS

3. COMPÓSITOS ESTRUTURAIS

A. COMPÓSITOS LAMINARES

- Propriedades isotrópicas em um plano

B. PAINÉIS EM SANDUÍCHE

- Duas folhas de faces rígidas e fortes, separadas por uma estrutura de recheio.

- Resistência e rigidez relativamente altas, com baixas densidades.

TERMOS E CONCEITOS IMPORTANTES

Cermeto

Compósito carbono-carbono

Compósito com matriz

Cerâmica

Compósito de matriz

polimérica

Compósito de matriz

metálica

Compósito com partículas

grandes

Compósito estrutural

Compósito híbrido

Compósito laminar

Compósito reforçado com fibra

Compósito reforçado por dispersão

Concreto

Concreto armado

Concreto protendido

Direção longitudinal

Direção transversal

Fase dispersa

Fase matriz

Fibra

Módulo específico

Painel em sanduíche

Prepreg

Princípio da ação combinada

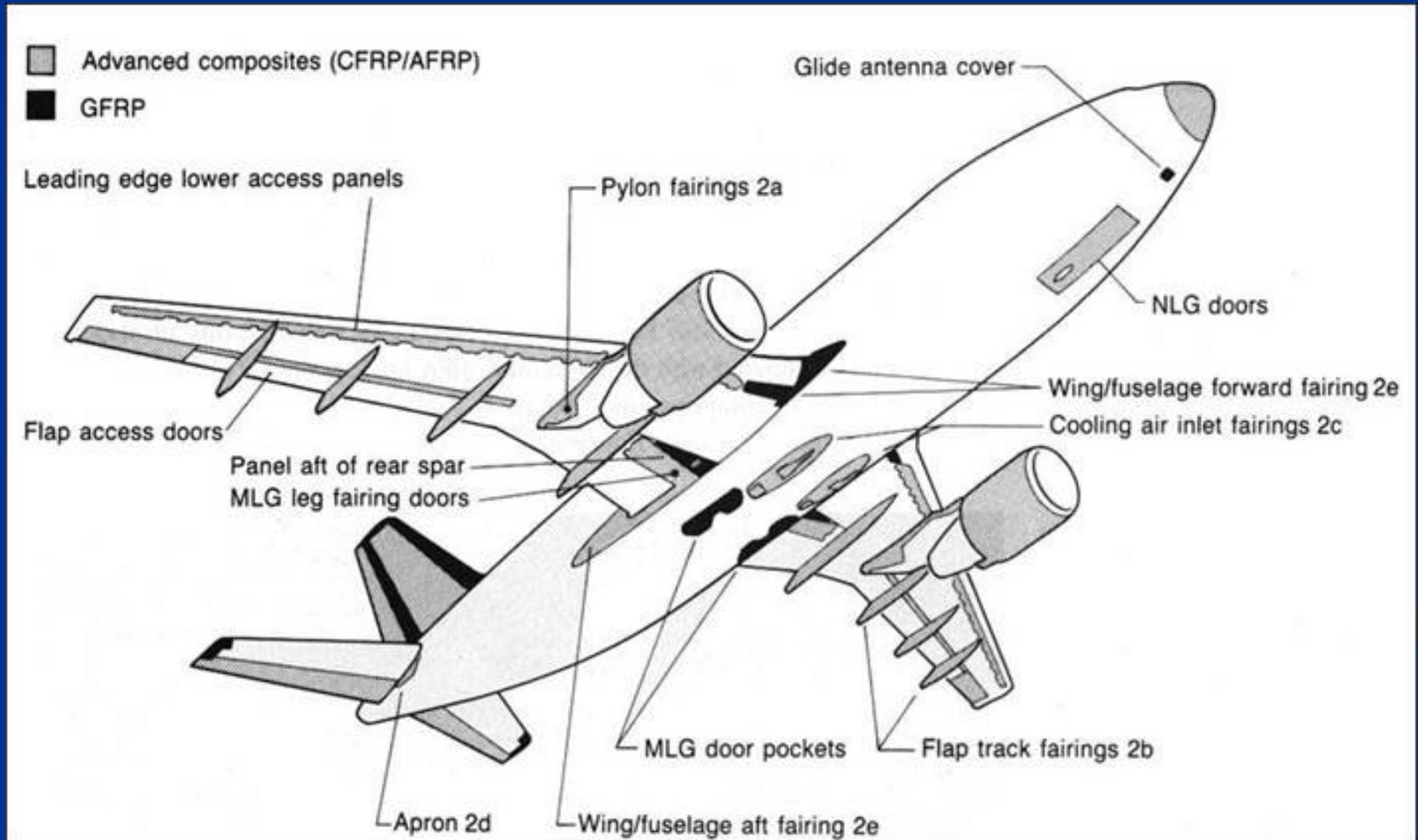
Regra de misturas

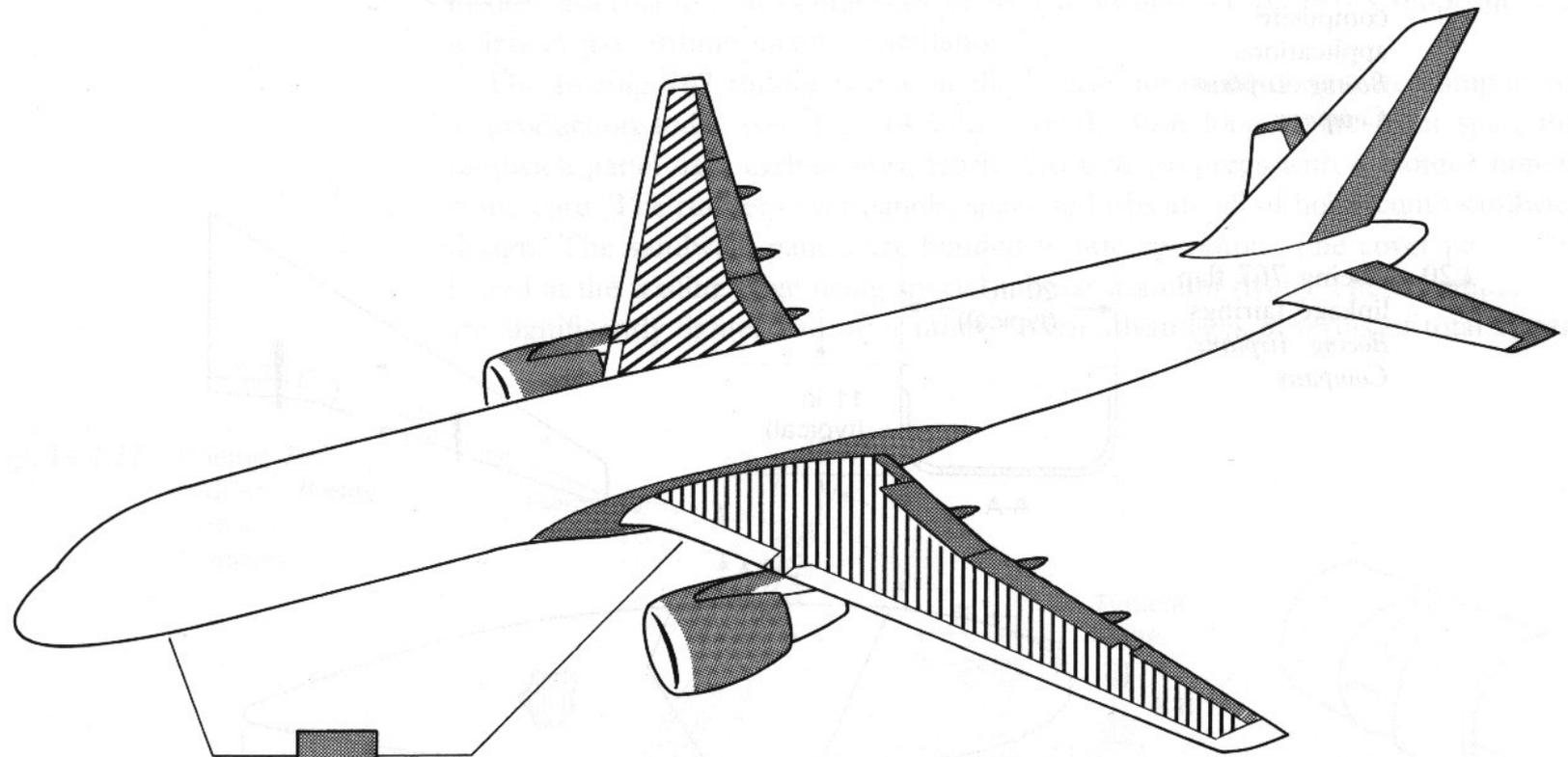
Resistência específica

Uísquer

Airbus A300/310

No “fin” traseiro, reduziu-se o peso em 20%, em relação ao alumínio. É construído em 95 peças, enquanto anteriormente compreendia 2076 peças. Dimensões do fin: 8,3m de altura e 7,8m de largura.





Landing gear doors



Improved aluminium alloys



Advanced composites
carbon
Kevlar
carbon/Kevlar

Carbon brakes

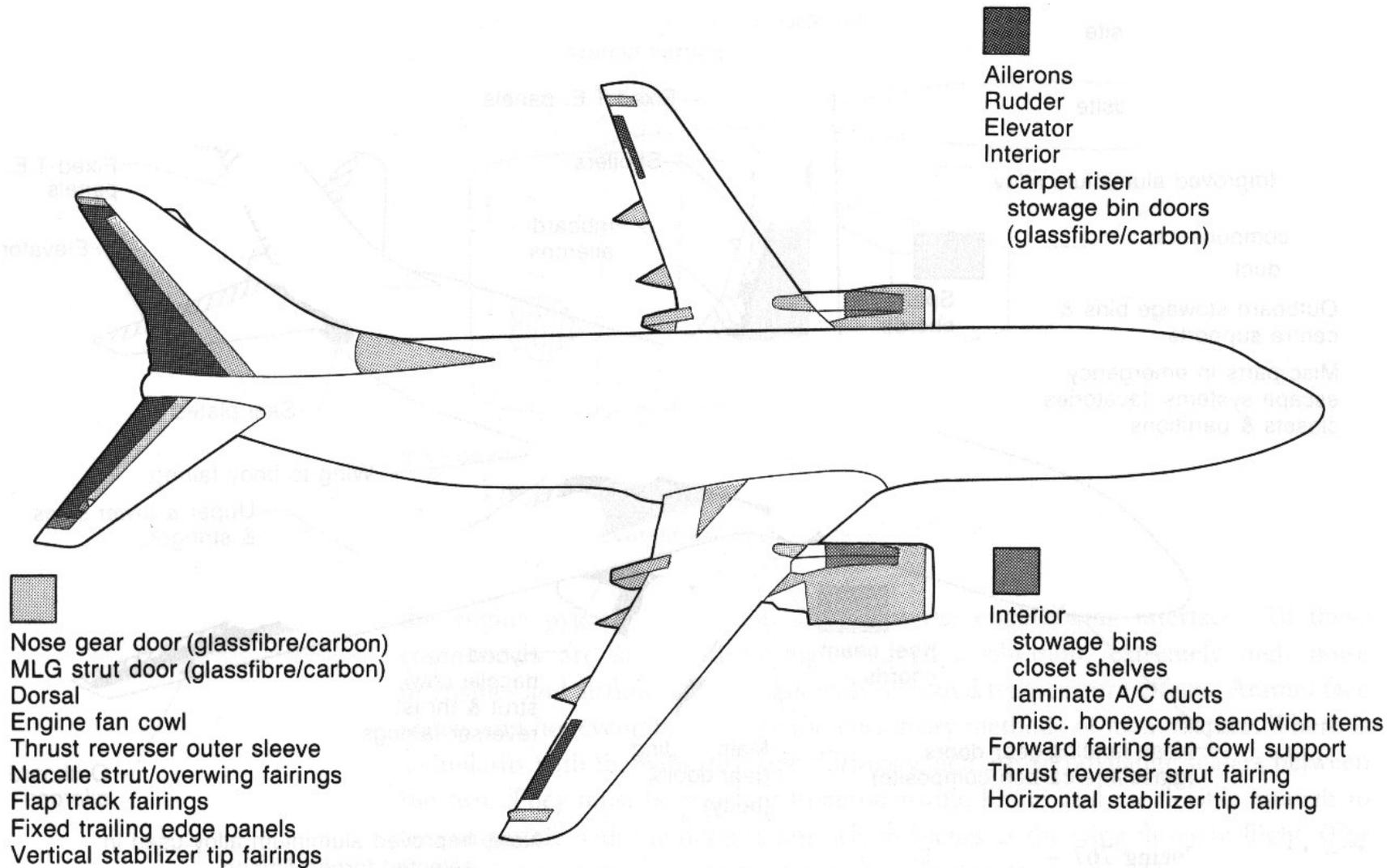
Weight savings, lb (kg)

610 (275)

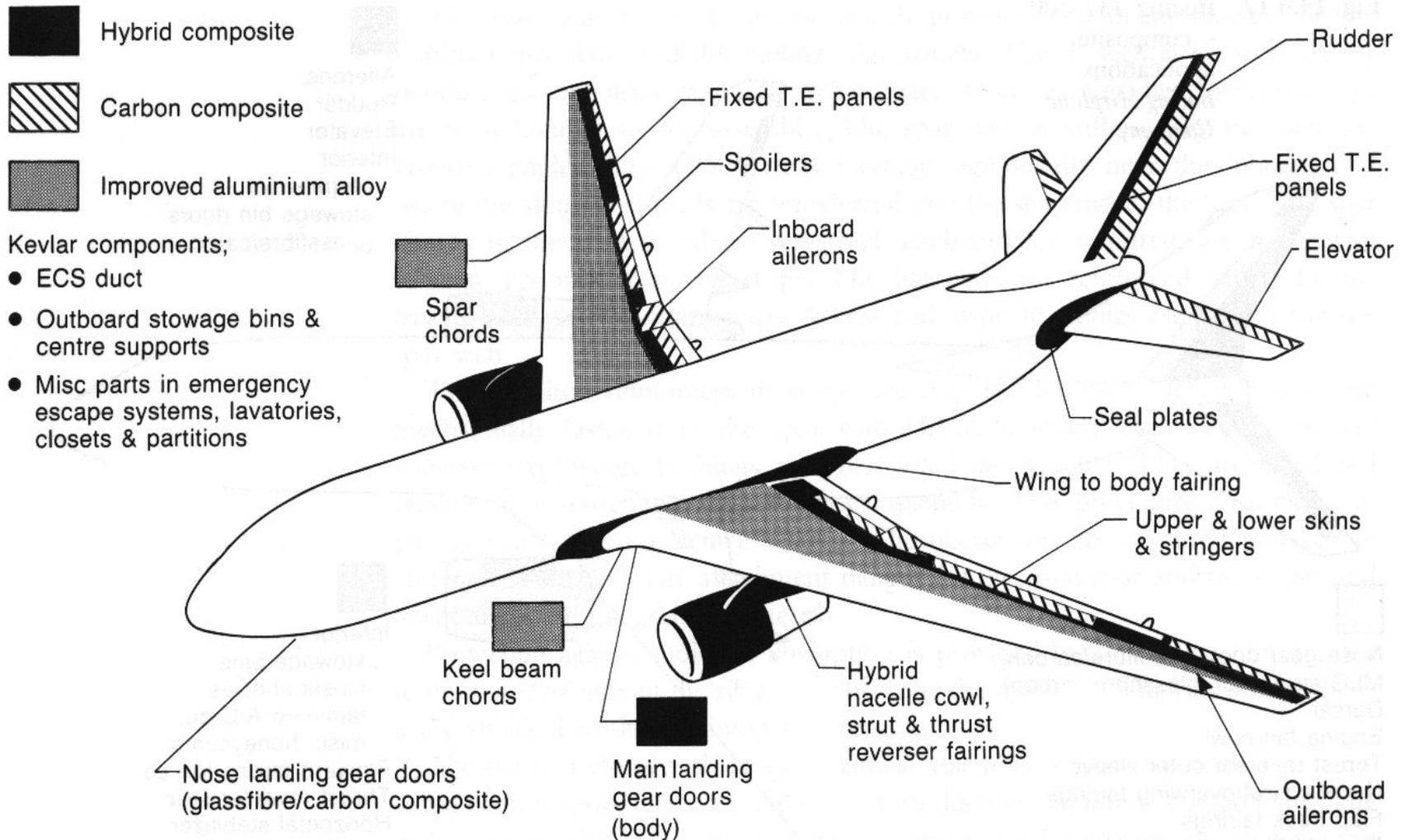
1490 (675)

580 (260)

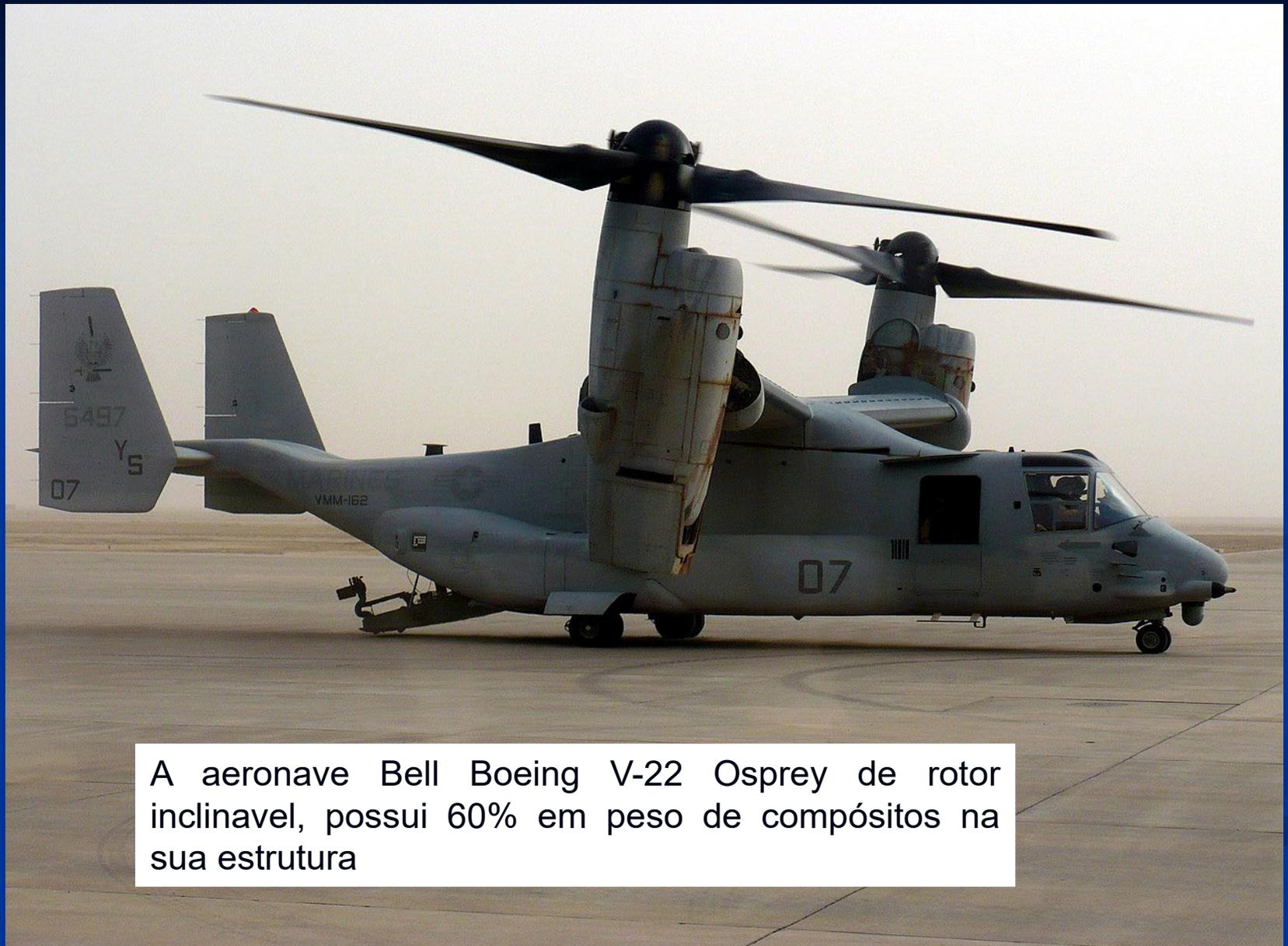
Aplicações estruturais de compósitos num Boeing 737-300.



Aplicações estruturais de compósitos num Boeing 757: a poupança em peso ronda os 600kg.

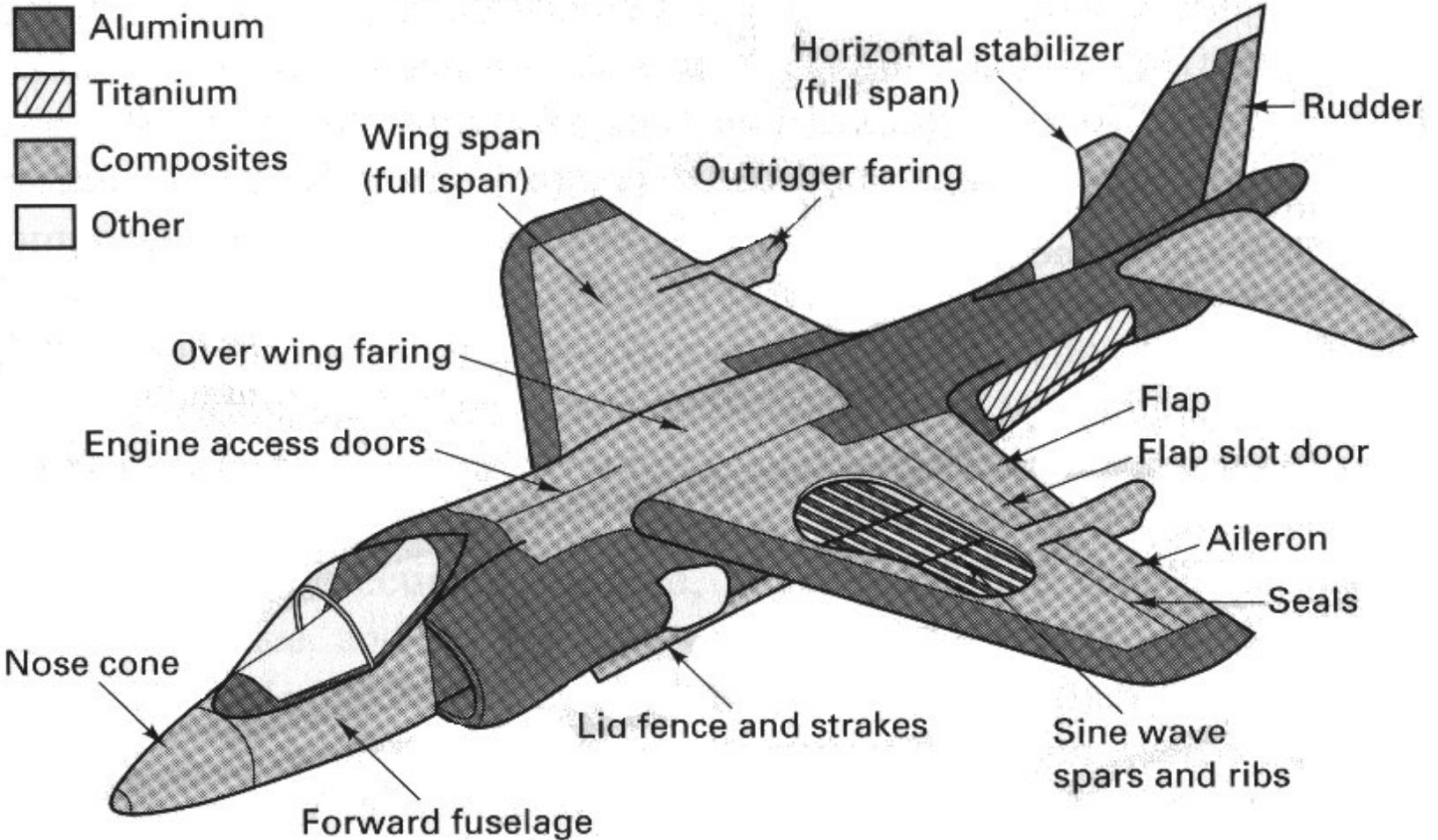


As aplicações estruturais de compósitos num Boeing 767 rondam os 3% em peso, mas esta pequena percentagem equivale a um ganho em peso de 635kg. Cerca de 30% da superfície exterior é em compósito, trazendo benefícios em termos de corrosão e resistência à fadiga.



A aeronave Bell Boeing V-22 Osprey de rotor inclinável, possui 60% em peso de compósitos na sua estrutura

AV-8B Composite applications



Uso de compósitos num Harrier AV-8B II. Cerca de 26% do peso desta aeronave é em compósito, na sua grande maioria de carbono/epoxy.

OUTROS PROCESSOS

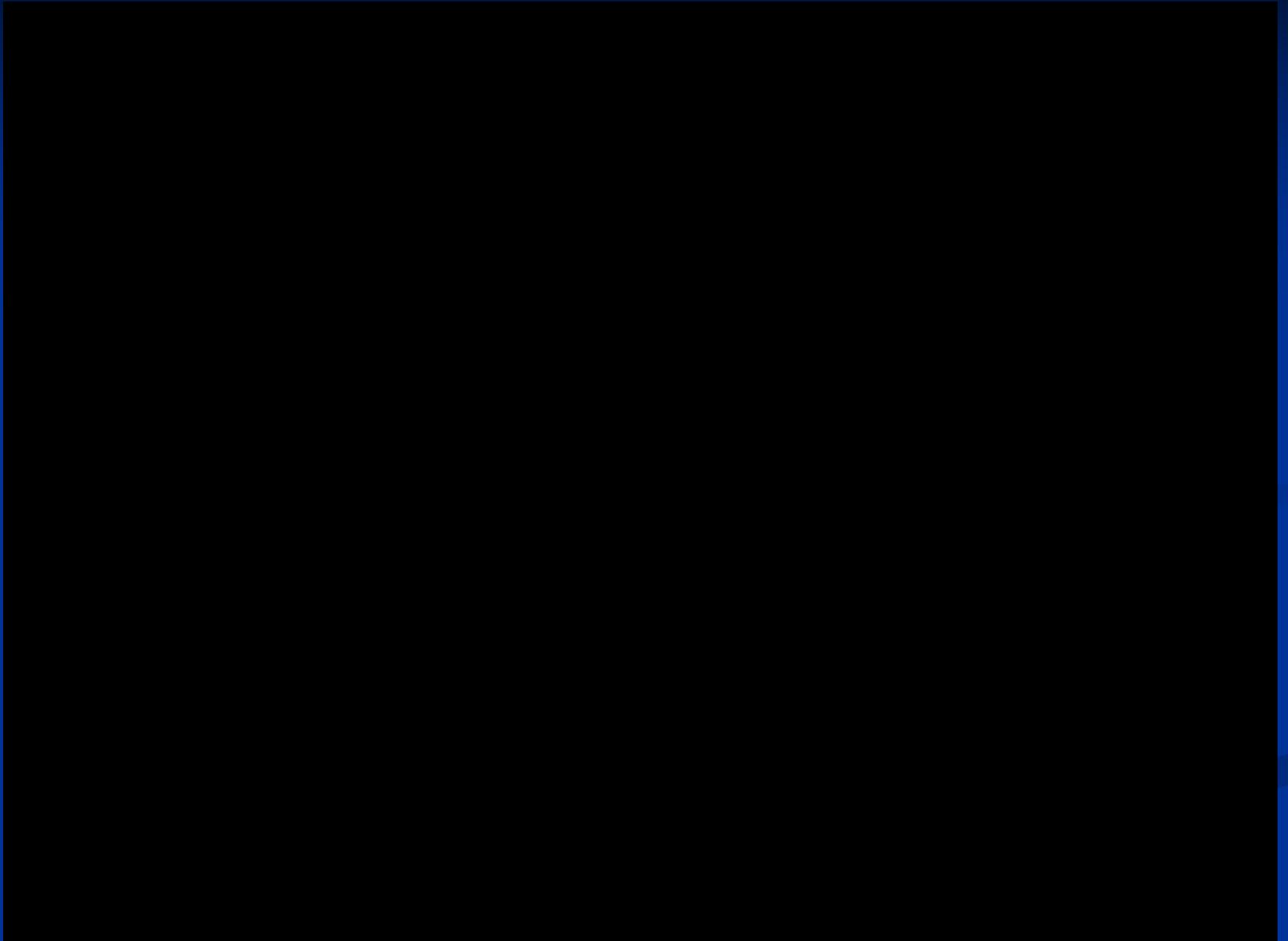
ACM (Aluminum Composite Material) PROCESS- VÍDEO



ACM PROCESS- VÍDEO



Automated Fiber Placement (AFP) of helicopter sideshells



Automated Fiber Placement (AFP) Process Optimisation



Automated Fiber Placement AFP Systems

Thermoplastic Automated Tape Placement (ATP)



Resin infusion (RFI) – com vacuo



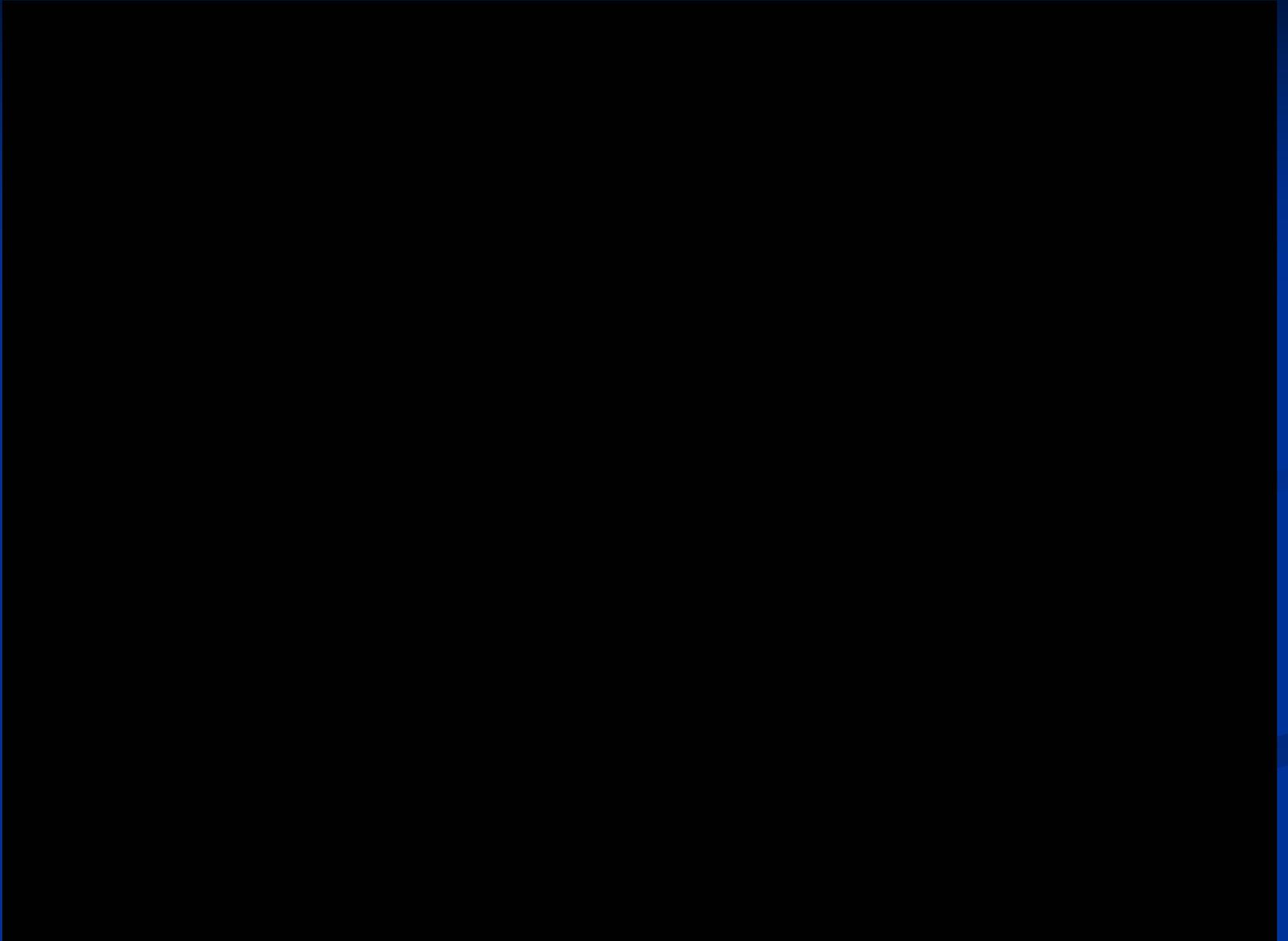
Resin infusion (RFI)



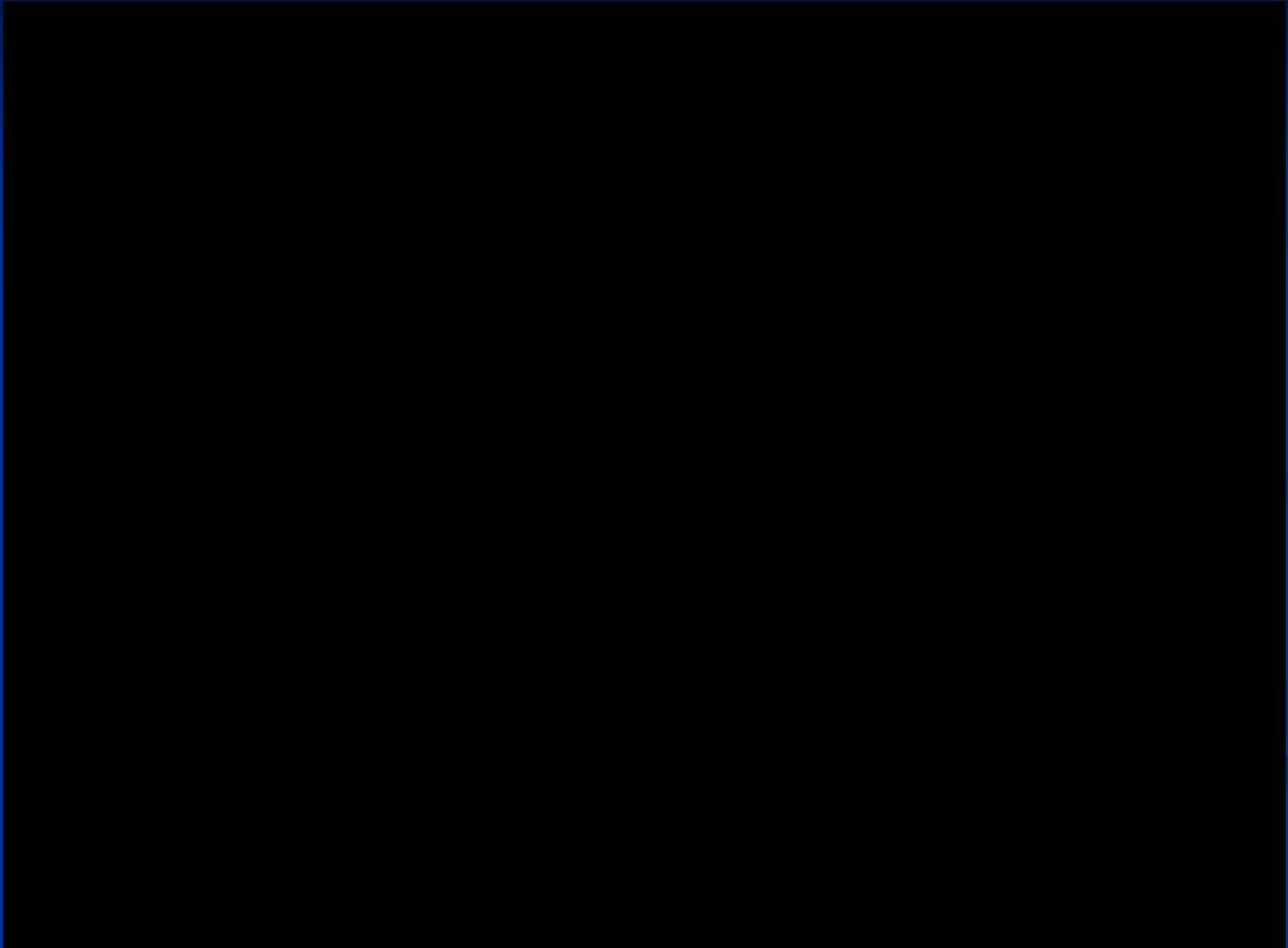
 COMPOSITE INTEGRATION^{ltd}

A demonstration of the
Direct Infusion
of a 3m Dinghy Hull

Tutorial Basic Resin Infusion Guide



MMC METAL MATRIX Composites

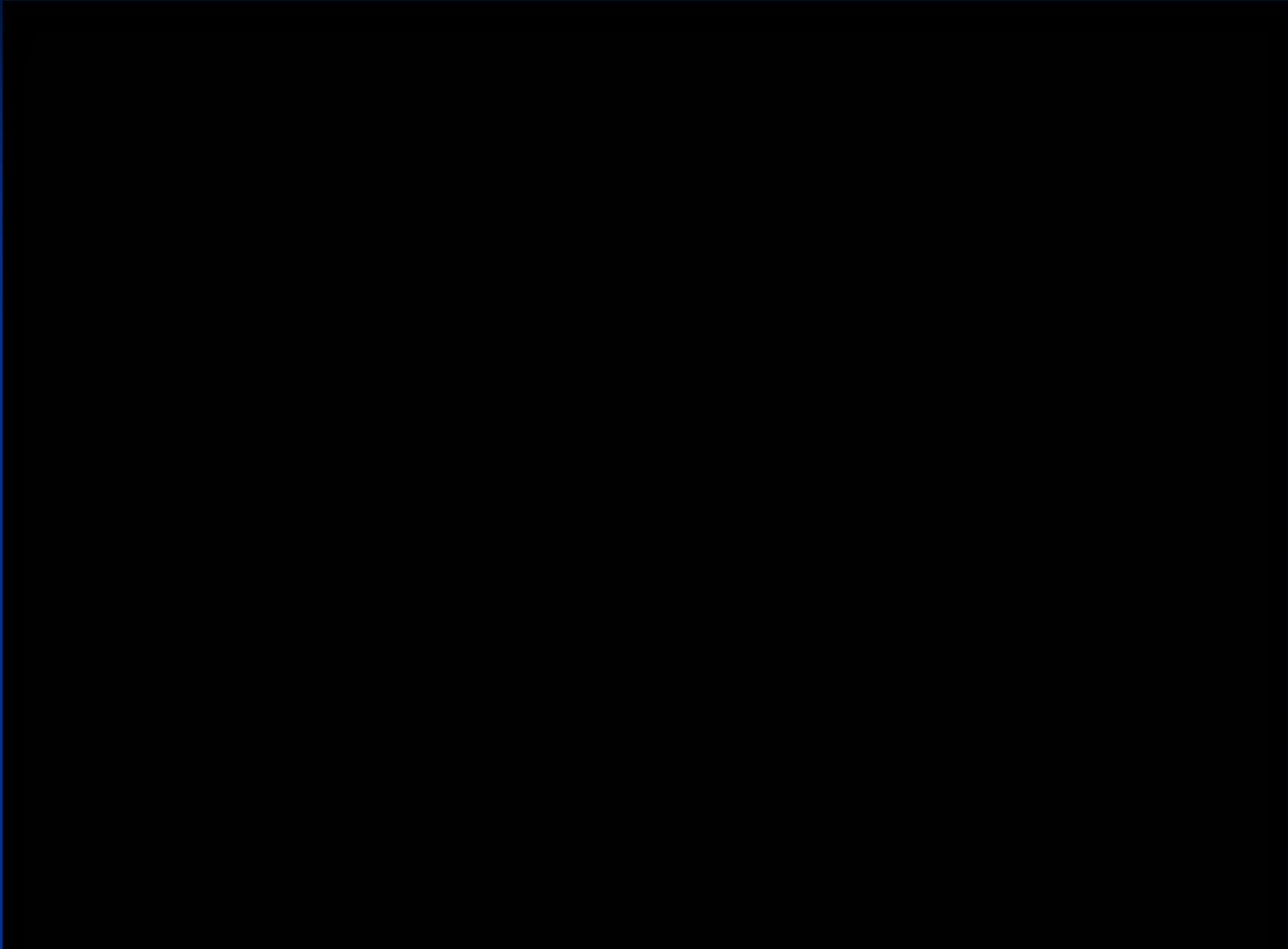


MMC METAL MATRIX Composites



VARTM Composites

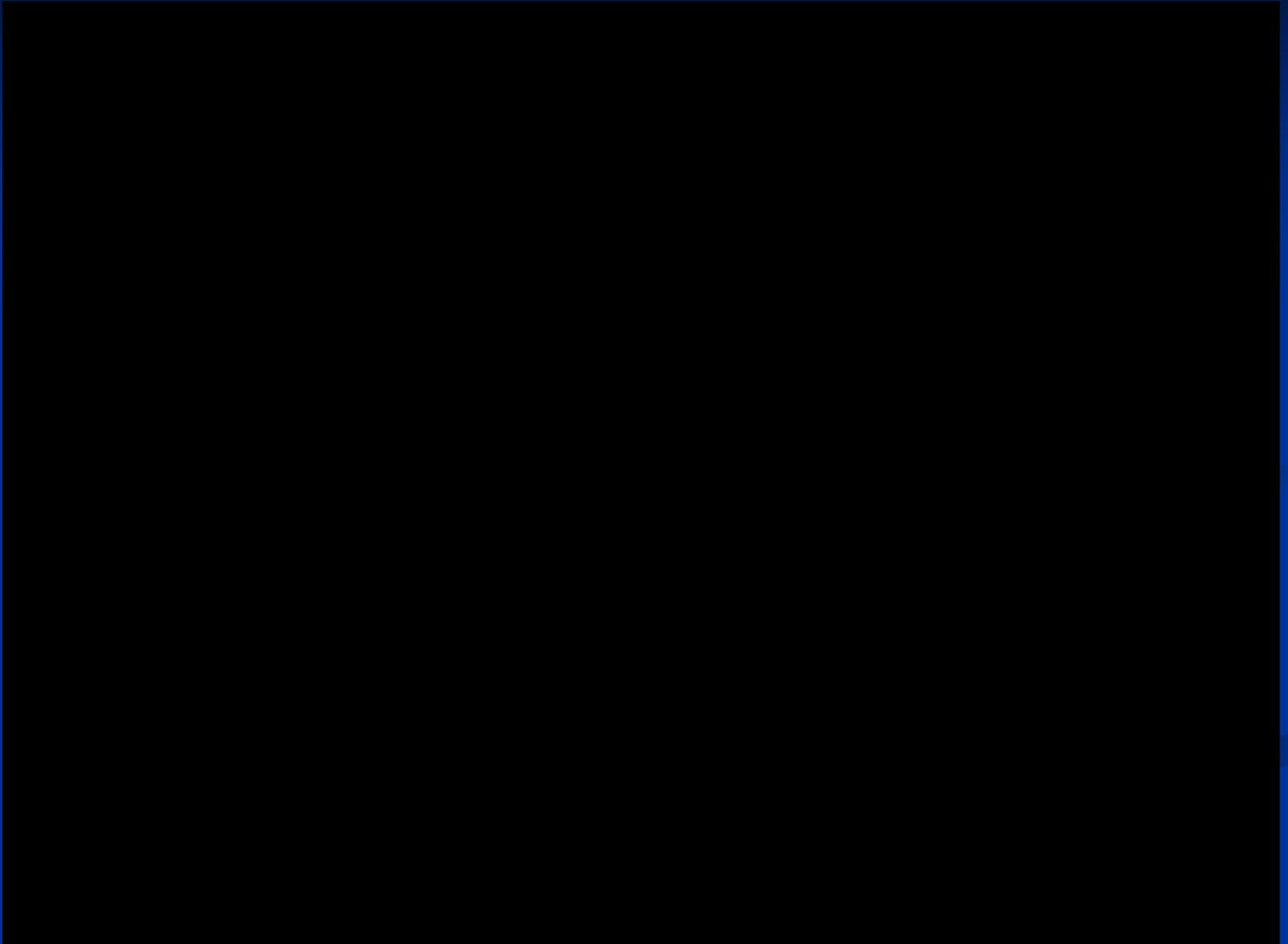
Carbon fiber vacuum infusion



VARTM Epoxy infusion on Textreme



VARTM Carbon Fiber Resin Infusion (Vertical and serial infusion)



ESTUDO DE CASO

Uso de Compósitos no Boeing 787 Dreamliner

Uma revolução no uso de materiais compósitos para aeronaves comerciais teve início recentemente com o advento do Boeing 787 Dreamliner (Figura 16.19). Essa aeronave — um avião a jato com duas turbinas, de tamanho médio (capacidade de 210 a 290 passageiros) e longo alcance — é a primeira a usar materiais compósitos para a maior parte da sua construção. Dessa forma, o avião é mais leve que os seus antecessores, o que leva a uma maior eficiência em termos de combustível (uma redução de aproximadamente 20%), menos emissões e maior autonomia de voo. Além disso, essa construção em compósito torna mais confortável a experiência de voar — os níveis de pressão e de umidade da cabine são maiores do que os dos seus antecessores, e os níveis de ruídos foram reduzidos. Além disso, os compartimentos de bagagem acima dos assentos são mais espaçosos e as janelas são maiores.

© Jens Wolf/dpa/Corbis



Figura 16.19 Um Boeing 787 Dreamliner.

Os materiais compósitos correspondem a 50% (em peso) do Dreamliner, enquanto as ligas de alumínio correspondem a 20%. Em contraste, o Boeing 777 consiste em 11% compósitos e 70% ligas de alumínio. Esses teores de compósitos e alumínio, assim como os teores de outros materiais usados na construção tanto da aeronave 777 quanto da 787 (ou seja, ligas de titânio, aço e outros) estão listados na Tabela 16.11.

Tabela 16.11 Tipos e Teores de Materiais para as Aeronaves Boeing 787 e 777

<i>Aeronave</i>	<i>Teor dos Materiais (Porcentagem em Peso)</i>				
	<i>Compósitos</i>	<i>Ligas de Al</i>	<i>Ligas de Ti</i>	<i>Aço</i>	<i>Outros</i>
787	50	20	15	10	5
777	11	70	7	11	1

De longe, as estruturas de compósito mais comuns são os laminados de epóxi com fibras contínuas de carbono, a maioria das quais são usadas na fuselagem (Figura 16.20). Esses laminados são compostos por fitas prepreg que são empilhadas umas sobre as outras segundo orientações predeterminadas usando uma máquina de colocação de fitas contínuas. Uma única seção de fuselagem (ou tambor) é confeccionada dessa maneira, a qual é subsequentemente curada sob pressão em uma enorme autoclave. Seis desses tambores são unidos uns aos outros para formar a fuselagem completa. Nas aeronaves comerciais anteriores, os principais componentes da estrutura da fuselagem eram lâminas de alumínio presas umas às outras por meio de rebites. As vantagens dessa estrutura em tambores de compósitos em relação aos projetos anteriores usando ligas de alumínio incluem:

- Redução nos custos de montagem — são eliminadas aproximadamente 1500 lâminas de alumínio presas umas às outras com aproximadamente 50.000 rebites.
- Redução programada nos custos de manutenção e inspeções de corrosão e trincas de fadiga.
- Redução no arraste aerodinâmico — os rebites aparentes nas superfícies aumentam a resistência ao vento e reduzem a eficiência em termos de combustível.

A fuselagem do Dreamliner foi a primeira tentativa de produzir em massa estruturas de compósito extremamente grandes compostas por fibras de carbono em um polímero termorrígido (ou seja, um epóxi). Dessa forma, foi necessário para a Boeing (e suas subcontratadas) desenvolver e implementar tecnologias de manufatura novas e inovadoras.

Como indicado na Figura 16.20, laminados de carbono também são usados nas estruturas da asa e da cauda. Os outros compósitos indicados nessa mesma ilustração são compósitos de epóxi reforçados com fibra de vidro e compósitos híbridos, os quais são compostos por fibras tanto de vidro quanto de carbono. Esses outros compósitos são usados principalmente nas estruturas da cauda e das asas.



Figura 16.20 Localização dos vários tipos de materiais usados no Boeing 787 Dreamliner.
 (Adaptado de Ghabchi, Arash, “Thermal Spray at Boeing: Past, Present, and Future”. *International Thermal Spray & Surface Engineering (iTSSe)*, Vol. 8, Nº 1, February 2013, ASM International, Materials Park, OH.)

Os painéis-sanduíche são usados nas carcaças de motores (ou seja, nas estruturas que envolvem os motores), assim como nos componentes da cauda (Figura 16.20). As faces da maioria desses painéis são de laminados de epóxi com fibras de carbono, enquanto os núcleos consistem em estruturas em colmeia feitas tipicamente a partir de lâminas em liga de alumínio. A redução no ruído de alguns dos componentes das carcaças de motores é promovida pela inserção de um material não metálico (ou material de “cap”) no interior das células de colmeia.