

*Handbook of Plastic Processes - Charles A. Harper - Timonium, Maryland
Wiley Interscience - A John Wiley & Sons, Inc., Publication
Copyright © 2006 by John Wiley & Sons, Inc.
Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
Dale A. Grove - Owens Corning Corporation, Granville, Ohio*

7 PROCESSOS DE COMPÓSITOS

7.1 INTRODUÇÃO

- 7.1.1 Economia de processos de compósitos
- 7.1.2 Termofixos versus Termoplásticos
- 7.1.3 Teoria do reforço
- 7.1.4 Formulações de reforço
 - 7.1.4.1 Fibras picadas
 - 7.1.4.2 Fibras Contínuas (*Rovings*)
 - 7.1.4.3 Mantas e véus
- 7.1.5 Cargas e aditivos
 - 7.1.5.1 Cargas
 - 7.1.5.2 Nanoparticulas
 - 7.1.5.3 Aditivos
- 7.1.6 Métodos de controle de qualidade

7.2 PROCESSOS DE MOLDAGEM DE COMPÓSITOS

- 7.2.1 Práticas gerais de moldagem
 - 7.2.1.1 Materiais de construção
 - 7.2.1.2 Diretrizes gerais de projeto de molde
 - 7.2.1.3 Equipamento de medição de molde de matriz fundida
 - 7.2.1.4 Medidas de desmoldagem do molde
 - 7.2.1.5 Prototipagem rápida
 - 7.2.1.6 Medidas gerais de segurança
 - 7.2.1.7 Comprando moldes
- 7.2.2 Métodos de moldes abertos
 - 7.2.2.1 Aplicação manual de camadas
 - 7.2.2.2 Pulverização (*Spray-up*)
 - 7.2.2.3 Moldagem em saco de vácuo/formação a pressão/autoclave
- 7.2.3 Métodos de moldes fechados
 - 7.2.3.1 Moldagem com transferência da resina
 - 7.2.3.2 Moldagem de lamina compósita
 - 7.2.3.3 Moldagem de compósitos em bruto ou em massa
 - 7.2.3.4 Termoplásticos fundido com vidro
 - 7.2.3.5 Fibra longa termoplástica ou fibra longa direta

Processos Termoplásticos

7.3 OUTROS PROCESSOS DE COMPÓSITOS

7.3.1 Laminação

7.3.1.1 Laminação a baixa pressão ou de estreitamento quente

7.3.1.2 Laminação de Termofixos

7.3.1.3 Laminação de Termoplásticos

7.3.1.4 Laminação de espuma

7.3.2 Pultrusão

7.3.2.1 Tecnologia básica de Pultrusão

7.3.2.2 Tecnologia de Pultrusão de Termofixos

7.3.2.3 Tecnologia de Pultrusão de Termoplásticos

7.3.2.4 Controle de qualidade da pultrusão

7.3.2.5 Variações do Processo

7.3.3 Enrolamento de filamento

7 PROCESSOS DE COMPÓSITOS

7.1 INTRODUÇÃO

A finalidade desta seção é lembrar os leitores que a escolha da matéria- prima e do equipamento são baseados no desempenho da peça, no volume de vendas, e no custo de produção desejado. Depois deste aspecto importante, o restante da seção concentra-se na seleção da matéria- prima, controle da qualidade, e as interdependências de alguns processos às matérias- primas. Segue então uma série de descrições relativamente sucintas e uma introdução a uma série de técnicas de processamento de compósitos. A finalidade deste capítulo de processamento de compósitos é disponibilizar aos profissionais novos compósitos com as várias tecnologias de processamento que hoje estão disponíveis.

7.1.1 Economia de processos de compósitos

Todos os projetos de peças comecem pelo exame e seleção da matéria- prima e a metodologia de fabricação. Recentemente, os materiais de base compósita estão sendo frequentemente selecionados ao invés dos plásticos não reforçados, que possuem menores propriedades mecânicas, ou ao invés dos metais devido à similaridade no desempenho mecânico e na facilidade de fabricação. Uma boa maneira de verificar esta mudança é analisar um automóvel e olhar as mudanças em matérias- primas dos anos 70 para os dias de hoje. Há muito mais peças plásticas e compósitas no automóvel, sujeitas a condições ambientais mais ásperas e a mais altas temperaturas do que nunca. Embora alguma influência para utilizar os plásticos na indústria automotiva seja conduzida pela melhoria de consumo de combustível ou as regulamentares, a maior parte da seleção do material é baseada simplesmente no desempenho. Quando o valor do desempenho adicionado, tal como o retardo à chama, a resistência ambiental, características anti-estáticas, melhor desempenho ao desgaste, ou possivelmente a facilidade de processabilidade de um material sobre outro, não são relevantes, é possível classificar as matérias- primas baseado em diversas fórmulas padrão que são dadas abaixo.

$$\text{Somente considerações de volume: } \rho C \quad (8.1)$$

$$\text{Desempenho à força elástica: } \frac{\rho C}{\sigma_T} \quad (8.2)$$

$$\text{Desempenho à força de flexão: } \frac{\rho C}{\sigma_F^{1/2}} \quad (8.3)$$

$$\text{Desempenho elástico à deflexão: } \frac{\rho C}{E_T} \quad (8.4)$$

$$\text{Desempenho flexural à deflexão: } \frac{\rho C}{E_F^{1/3}} \quad (8.5)$$

onde ρ é a densidade, C é o custo em unidades monetárias sobre o peso ou massa, σ_T é a força elástica, σ_F é a força de flexão, E_T é o módulo elástico, e E_F é o módulo de flexão. As fórmulas (8.1) a (8.5) são derivadas pelo cálculo do volume da peça que é exigida para realizar um teste particular, encontrando a espessura apropriada, e multiplicando o termo do volume pela densidade e pelo custo da unidade [1]. Estas equações são fundamentais na seleção do material quando todas as outras considerações de teste e despesas de fabricação forem similares. A razão principal para usar compósitos é capturada nas equações (8.4) e (8.5). Os compósitos oferecem uma maneira barata de conseguir o módulo com densidades relativamente baixas comparadas aos metais.

Após selecionar possíveis materiais a utilizar, a consideração seguinte é a de despesas de fabricação combinada com o número de peças exigidas. Há muitas escolhas e considerações aqui, dependendo da forma da peça, das considerações de desempenho, e da seleção do material para nomear alguns. As perguntas típicas incluem o seguinte:

- O volume de vendas é suficiente para investir em uma máquina completa de moldagem por compressão?
 - Há uma terceira parte certificando e autorizando a tolerância?
 - Em que volumes deve ocorrer a conversão entre o revestimento manual em camadas, a moldagem por transferência de resina, e a moldagem de lamina compósita?
 - O volume de vendas sugere que a tecnologia direta de termoplásticos de fibra longa é mais apropriada do que a dos termoplásticos de fibra longa na base de *pellets*?
 - O equipamento usado, disponível, pode ser modificado com pouco investimento?

TABLE 8.1 Composite Manufacturing Methods and Costs

| | Matrix | Reinforcement | Part Shape | Labor ^a | Investment ^b | Production Rate |
|--------------------------------------|--------|-----------------|------------------------|--------------------|-------------------------|-----------------|
| <i>Thermoset Process</i> | | | | | | |
| Hand lay-up | TS | CM, CSM, V, PRE | Open 3D surface | H | 1–20K | 1 part/5–24 h |
| Spray-up | TS | R | Rough 3D | M | 1–20K | 1 part/5–24 h |
| Vacuum bag | TS | CM, CSM, V, PRE | Smooth 3D | M–H | 20–80K | 1 part/5–24 h |
| Preimpregnated material | TS | R | 3D | M–H | 30–60K | 1 part/1.5–3 h |
| Resin transfer molding (RTM) | TS | CM, CSM, V, PRE | 3D | M–H | 50–100K | 1 part/2–10 min |
| Bulk molding compound (BMC) | TS | CS, R | 2D ^c | M–L | 500–1,000K | 1 part/50–120 s |
| Sheet molding compound (SMC) | TS | CS, R, V | 2D ^c | M–L | 800–1200K | 1 part/30–120 s |
| Mold for RIM, SMC, BMC | — | — | 2D ^c –3D | — | 5–60K ^d | — |
| Pultrusion | TS/TP | R, CSM, CM, V | Linear–1D ^e | M | 200–1,200K ^f | 5–400/min |
| Fiberglass winding | TS | R, CSM, CM, V | Hollow parts | M–L | 150K–300K ^g | 1 part/0.5–10 h |
| <i>Thermoplastic Processes</i> | | | | | | |
| Long fiber thermoplastic (LFT) | TP | CP, REC | 3D | L | 500–1,000K | 1 part/15–60 s |
| Direct LFT injection molding (DLIFT) | TP | R, REC | 3D | L | ~1500K | 1 part/15–60 s |
| Glass mat thermoplastic (GMT) | TP | CSM, CM, V, R | 2D ^c | M–L | ~2000K | 1 part/30–120 s |
| Extrusion-compression molding | TP | R, REC | 2D ^c | M–L | ~1500K | 1 part/50–120 s |
| Mold for LFT, DLIFT, GMT | — | — | 2D ^c –3D | — | 5–60K ^d | — |

^aTS, thermoset; TP, thermoplastic.

^bCM, continuous fiber mat (the mat may be solid or held together by binder); CSM, chopped strand mat (the mat may be modified or held together by binder); V, veil; PRE, preform; R, roving; CS, chopped strand; CP, chopped fiber; REC, recycled composite materials.

^c2D^c, one-dimensional part with possibility of changing normal area with length; 3D^c, two-dimensional part with some three-dimensional possibilities; 3D, Nearly any three-dimensional shape is possible.

^dLabor level: H, high; M, medium; L, low.

^eInvestment cost is based on obtaining all necessary equipment unless otherwise noted. Amount based on 2004 U.S. dollar.

^fMold cost only; the rest of the process is already present. Note that lower investment costs usually create lower part per time.

^gProduction rate are technology and part sensitive. A typical LFT pultrusion line will be more expensive, thermoset single cavity (see 8.1). This process is very part-size dependent. Large diameters usually will be expensive typical average unit around \$750,000 to \$1,000,000.

Esclarecendo, boas decisões necessitam ser tomadas de um ponto de partida baseado na economia, e/ou no equipamento disponível, se existir. Tendo isto em mente, os benefícios da produção e os custos de investimento são listados na tabela 8.1. Note que as taxas de produção

mais elevadas vêm normalmente com os custos de investimento iniciais mais elevados e que os métodos de processamento são sensíveis às matérias-primas selecionadas. Às vezes pode ser vantajoso começar com um processo e um funcionamento inicial mais barato para depois passar a um investimento completo, enquanto os volumes de venda aumentam.

7.1.2 Termofixos versus Termoplásticos

As técnicas de processamento de compósitos dependem da escolha da resina matriz, do comprimento da fibra no produto acabado, e dos objetivos desejados de projeto e custo. Os processos de termofixos tem a plena vantagem de suas baixas viscosidades iniciais para cobrir inteiramente seus agentes de reforço, enquanto que os processos de termoplásticos envolvem normalmente altas temperaturas e pressões para reduzir a viscosidade a um ponto onde o material possa ser bombeado e puxado. As maiores vantagens das resinas termofixas, tais como o poliéster, éster vinílico, colas epóxi, e fenólicas, são: (1) facilidade de conseguir boa aparência, (2) boa cobertura em consequência da baixa viscosidade, e (3) baixas taxas de aparas; enquanto os termoplásticos, tais como polipropileno, polietileno, nylon, polietileno tereftalato, e polibutileno tereftalato, oferecem: (1) a possibilidade de reciclar o material, (2) a possibilidade de reaquecer e reutilizar o material em diversos ciclos, e (3) dureza adicionada. É possível encontrar exceções à regra dos termoplásticos de alta viscosidade, especialmente se polímeros termoplásticos de baixo peso molecular, oligômeros, ou mesmo monômeros são polimerizados durante o processo selecionado; e é igualmente possível endurecer materiais termofixos adicionando alguns modificadores de impacto. A maioria dos prós e contra genéricos entre termofixos e termoplásticos são vistos na tabela 8.2, enquanto que a tabela 8.3 descreve as principais resinas, suas propriedades térmicas de transição e as propriedades físicas em termos de módulo e densidade. O módulo e a densidade representam propriedades integrais no que diz respeito aos modelos micro-mecânicos de compósitos.

Não é a finalidade nem o espaço neste capítulo fornecer uma descrição completa da polimerização de adição, a polimerização de condensação, catalisadores eficazes, iniciadores, co-iniciadores, inibidores, ou pasta de aditivos para vários efeitos, tais como o retardo à chama, a resistência ao ultravioleta, nem outros aditivos e cargas químicas baratas. Os leitores interessados nestes tópicos devem consultar as referências de 1 a 7 como um ponto de partida.

7.1.3 Teoria do reforço

Uma combinação única de grande resistência de força, de módulo, e de impacto é possível empregando fibras de módulo elevado, materiais similares a placas e com prolongamento de comprimento suficiente em relação a resina matriz. As propriedades mecânicas são altamente dependentes na concentração em volume da fibra, na relação do prolongamento do comprimento da fibra com um ponto limite assintótico (aquilo que está bastante próximo), a uma interface química (o quão bem o reforço se adapta à resina), e em particular, à orientação das fibras versus o sentido do esforço. Os benefícios máximos dos módulos ocorrem com comprimentos e reforços de prolongamentos mais longos (comprimento/diâmetro), e quando o sentido do esforço combinar com o sentido da fibra. Estes benefícios são reduzidos enquanto a diferença no sentido do esforço e o sentido de fibra aumenta até que um baixo ponto de esforço ocorre em 90°. Similarmente, as dependências do esforço em relação ao ângulo são também verdadeiras para as propriedades de impacto e a propagação do rasgo, exceto que neste caso as melhores propriedades são obtidas nas orientações da fibra normais ao sentido do rasgo. Os materiais compósitos, que exibem

dependências angulares de propriedade, são classificados como materiais anisotrópicos (que apresentam propriedades com valores distintos).

As equações que prevêem o comportamento das propriedades são complexas em sua natureza; pessoas não familiarizadas com matrizes de álgebra ou transformações terão dificuldades ao deparar com a expressão matemática. Desde que não é a finalidade nem a intenção deste capítulo cobrir a micro-mecânica composta, se indica as referências 13 e 14 aos leitores interessados. Os que desejarem aprofundamento em todos os detalhes teóricos, sem o fundo matemático, podem primeiramente consultar as referências 15 a 17 que têm explicações concisas do cálculo, das matrizes e das transformações.

TABLE 8.2 General Advantages and Disadvantages of Thermosets and Thermoplastics

| Material | Advantages | Disadvantages |
|----------------|---|--|
| Thermosets | Low viscosity, low creep rates, good appearance | Viscosity varies, pot life, cure effects T_g |
| Thermoplastics | Reprocessable, impact strength, low cycle time | High viscosity ^a , creep |

^aExceptions exist e.g., cyclic resins, nylon 6 in monomer form.

Alguns leitores podem perguntar neste momento: Por que isto é importante? A resposta é que as teorias localizam o que ocorreu de errado com uma peça pré-existente ou o que poderá ir mal com projetos futuros de peças. As falhas típicas da peça incluem áreas ricas em resina, fibras que apontam na direção errada, linhas de solda, onde as fibras não transpassam através da linha de junção, a insuficiente cura da matriz (quando aplicável), a falta do fluxo da fibra (quando aplicável), o tamanho errado da fibra feita sob medida, ou possivelmente as fibras possuindo sujidades (quando aplicável). O ponto aqui é que as teorias ou os programas com caráter de previsão existem prevenindo o problema com uma peça e/ou um projeto particular. Compreender estes conceitos pode ser particularmente importante durante estágios adiantados do projeto e da fabricação.

7.1.4 Formulações de reforço

A melhor maneira de rapidamente se familiarizar com as diferenças em várias formulações de reforço é conhecê-las. As figuras 8.1 a 8.4 mostram as principais formulações de reforço utilizadas. A tabela 8.4 lista as principais fibras de reforço empregadas na indústria de compósitos e suas propriedades associadas.

7.1.4.1 Fibras picadas

Há uma variedade de tipos de fibras picadas que podem ser empregadas em processos de compósitos. As considerações principais para selecionar uma fibra picada são: conseguir uma boa interface e obter uma relação de aspecto crítico, diâmetro da fibra e "tamanho" sem trabalhar em processos anteriores. O acabamento ou a influência de tamanho, particularmente nos materiais originados da moldagem por injeção, de comprimento extremamente reduzido da fibra, não devem ser negligenciados. As formas de tamanho ou de acabamento podem ajudar significativamente o desempenho desejado da propriedade, e são preparadas normalmente para obter os seguintes efeitos: (1) ligar a superfície de vidro diretamente ao material através dos agentes do acoplamento; (2) permitir que os pacotes fibrosos dispersem-se (tomem parte) através dos aditivos

dispersantes; (3) fornecer o resvalamento ou a lubrificação durante as operações de alimentação; (4) fornecer proteção a abrasão da fibra-fibra, que pode conduzir a entalhes e à redução correspondente da propriedade; e (5) permitir um corte mais fácil durante a manufatura com o uso de um filme formado. Embora haja as aplicações ocasionais onde é vantajoso selecionar fibras que não sejam compatíveis com a resina matriz, tal como para o desempenho adicional de impacto, neste caso uma formulação de teste deve ser executada, é aconselhável seguir as recomendações do fabricante. Se fibras picadas úmidas são empregadas sobre uma formulação seca, alguma providencia deve haver para remover ou ventilar a umidade. As fibras picadas úmidas são mais baratas que as fibras secas, mas há um problema para o processamento no que diz respeito à remoção da umidade que pode se transformar em uma barreira significativa.

TABLE 8.3 Major Composite Resin Physical Properties

| | T_g (°C) | T_c (°C) | Processing Temperature (°C) | HDT (°C) | Density ^a (g/cm ³) | Tensile Strength (MPa) | Tensile Modulus ^b (GPa) |
|-----------------------|----------------------|------------------|-----------------------------------|-------------|--|---------------------------|---------------------------------------|
| Thermosets | | | | | | | |
| Flexible epoxy | Varies | NA | | 70 | 1.2 | 40 | 1 |
| Epoxy | Varies | NA | | 175 | 1.2 | 70 | 2.6 |
| Metallane | Varies | NA | 160 ^a | | 1.48 | 40 | Filled |
| Metallane, phenolic | Varies | NA | | 169–202 | 1.6–1.7 | 53–77 | Filled |
| Phenolic | Varies | NA | 150 ^a | 160–235 | 1.3–2.1 | 94–60 | Filled |
| Flexible polyester | Varies | NA | | | 1.1 | 10 | 0.3 |
| Rigid Polyester | Varies | NA | 150 ^a | 130–204 | 1.2–2.0 | 34–70 | 3.1 |
| Polyimide | Varies | NA | | | 1.6 | 18 | 4 |
| Polyurethane | Varies | NA | | | 0.4–0.6 | 11–21 | 0.5–0.8 |
| Silicone | –130 | NA | 25–250 ^a | | 1.0–1.7 | 1.6–30 | Filled |
| Vinyl ester | 145–160 | NA | 105–260 ^a | 235–260 | 1.6–2.0 | 70 | 2.1–4.1 ^a |
| Thermoplastics | | | | | | | |
| ABS | 90–111 | NA | 100–245 | 70–88 | 1.0–1.2 | 30–65 | 1.8–3.2 |
| Acetal | –80 ^a | 160–171 | 170–306 | 66–123 | 1.3–1.4 | 37–66 | 1.4–3.2 |
| Acrylic | 100–105 | 200 ^a | 245–250 | 41–100 | 1.2 | 47–79 | 2.3–3.8 |
| Nylon 4/6 | 43 ^a | 293 ^a | 298–337 | 90–160 | 1.1–1.4 | 38–99 | 1–3.3 |
| Nylon 6 | 52 ^a ; 60 | 230 ^a | 250–335 | 70–87 | 1–1.2 | 48–100 | 0.3–4 |

| | | | | | | | |
|----------------------------|---------------------|--------------------------------------|----------------------|---------|---------|--------|---------|
| Nylon 6,6 | 50* | 2,55 ^a ; 265 ^a | 279-300 | 50-164 | 1-1.2 | 40-85 | 0.7-3.3 |
| Polyamide-imide | 280 | NA | 360 | 275-280 | 1.4-1.5 | 69-180 | |
| Polybutylene-terephthalate | 17, 80 ^b | 22.0-26.7 ^c | 230-260 | 47-175 | 1.3-1.5 | 35-75 | 1.5-5.2 |
| Polyether ether ketone | 140 | 3.43 ^d | 360-370 | 154-295 | 1.3-1.4 | 90-150 | 3.1-8.3 |
| Polyethylene (HDPE) | -125 ^e | 110-135 | 190-274 | 41-93 | 0.9-1.4 | 10-50 | 0.2-1.6 |
| Polyethylene terephthalate | 73-78 | 2.90-2.69 ^c | 280-300 | 63-100 | 1.3 | 50-57 | 2.5-3 |
| Polymethylene sulfide | 88 | 28.5-210 ^f | 309-350 | 104-260 | 1.3-1.8 | 70-124 | 2.2-5.5 |
| Polyphtalamide | 90 | 310 ^g | 300-350 ^h | 136 | 1.2 | 65 | 3.7 |
| Polypyrrolone | -17 ⁱ | 13.0-1.66 ^j | 202-25.2 | 37-146 | 0.9-1.2 | 20-60 | 0.5-1.6 |

*T_g is the glass transition temperature. The temperature where a second-order transition occurs with regard to heat capacity, density, and modulus.

^bStandard properties are from Ref. 6 unless otherwise noted.

^cValues with copolymer types, butylene types, as well as processing conditions (such as a time-temperature-transformation diagram).

^dFrom Ref. 11.

^eFrom Ref. 7.

^fFrom Ref. 10.

^gFrom Ref. 9.

^hFrom Ref. 12.

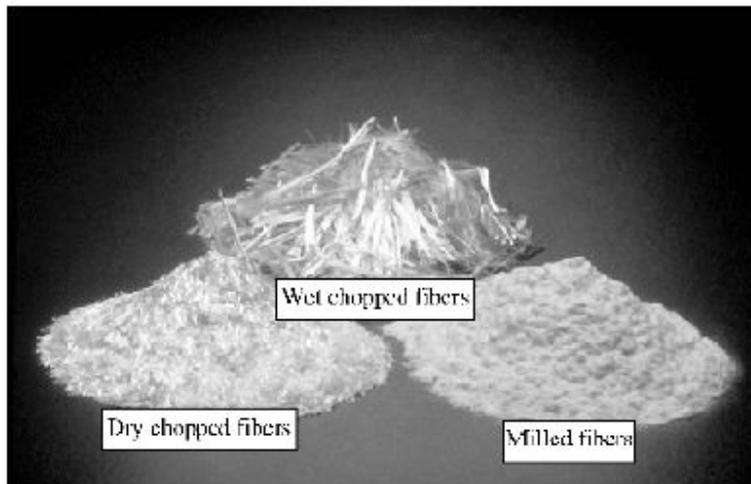


FIGURE 8.1 Milled, dry chopped strand, and wet chopped strand forms. (Courtesy of Owens Corning. Used with permission.)

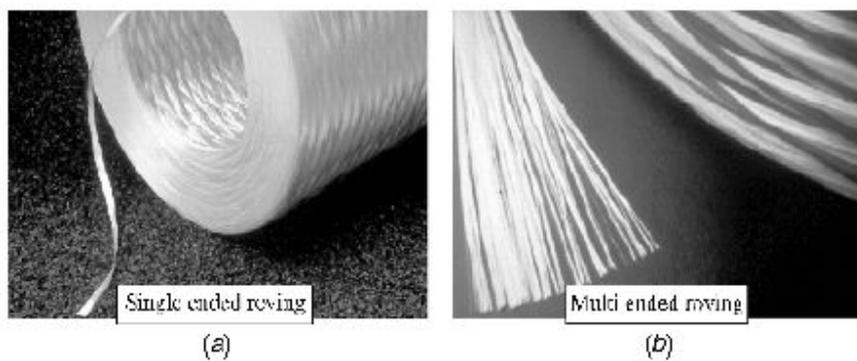


FIGURE 8.2 (a) Single- and (b) multiended rovings. (Courtesy of Owens Corning. Used with permission.)

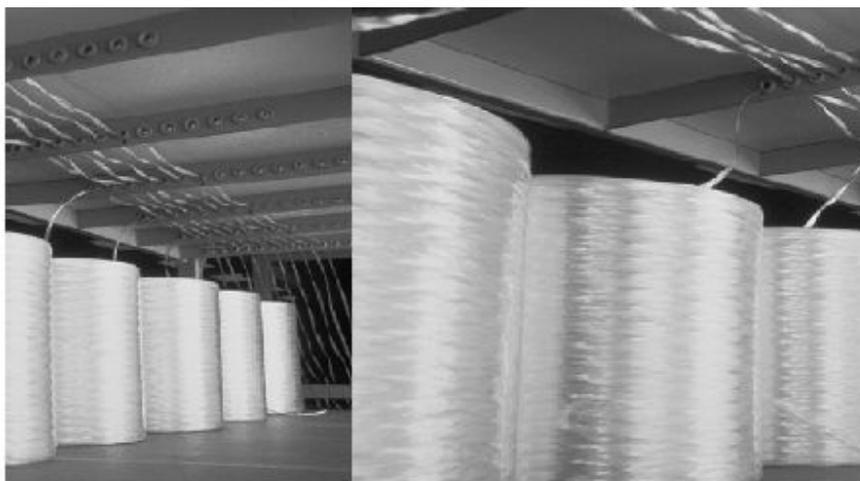


FIGURE 8.3 Typical roving unwind stand. (Courtesy of Owens Corning. Used with permission.)

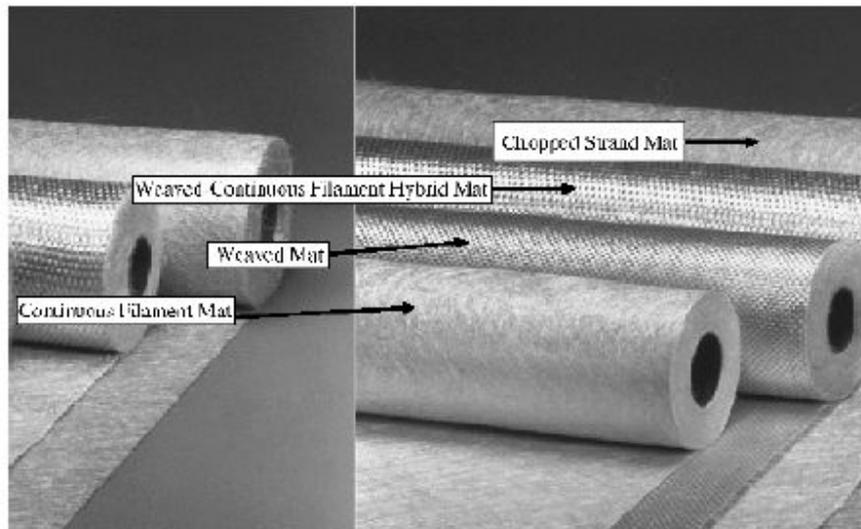


FIGURE 8.4 Various weaved and nonwoven fabrics. (Courtesy of Owens Corning. Used with permission.)

7.1.4.2 Fibras Contínuas (*Rovings*)

As formas de filamentos contínuos (*rovings*) são fornecidas com extremidade única ou múltipla, ou mesmo em formas totalmente misturadas de filamento plástico - vidro tais como o Twintex¹, dependendo do que é desejado. As embalagens de *rovings* podem vir no formato de bobinado interno ou externo. O bobinado externo oferece a vantagem de desenrolar com torção zero, enquanto que quando desenrolados de dentro das embalagens permitem uma emenda mais fácil (esta é a modalidade normal para produtos de fibra de vidro).

¹Twintex é uma marca registrada da Vetrotex France Corporation

TABLE 8.4 Major Composite Fibers and Associated Properties

| | Specific Gravity (g/cm ³) | Tensile Strength (GPa) | Tensile Modulus (GPa) | Failure Elongation (%) |
|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Boron ^a | 2.4–2.6 | 2.3–2.8 | 365–440 | 1.0 |
| Cellulose ^b | 1.5 | 1.1 | 2.4 | |
| Cotton ^b | 1.5 | 0.4 | 1.1 | |
| Flax ^c | 1.5 | 0.9 | 50 | 1.8 |
| E-glass ^a | 2.5–2.6 | 1.7–3.5 | 70 | 3 |
| S-R glass ^a | 2.5 | 4.8 | 85 | 5.3 |
| PAN-based carbon fiber ^a | 1.8 | 5.6 | 295 | 1.8 |
| Pitch-based carbon fiber ^a | 1.96 | 1.9 | 520 | 0.4 |
| Kevlar 29 ^a | 1.44 | 2.6 | 59 | 4 |
| Kelvar 49 ^a | 1.45 | 2.6 | 128 | 2.4 |
| Kraft paper ^b | 1.0 | 0.9 | 72 | |
| Nomex 430 ^d | 1.4 | 0.6 | 12 | 28 |
| Polyester (PET) ^a | 1.4 | 0.8 | | 15 |
| SiC ^a | 2.7–3.3 | 0.3–4.0 | 45–480 | |
| Silk ^b | 1.3 | 0.4 | 6 | |
| UHMWPE (spectra) ^a | 1.0 | 3 | 117 | 3.5 |

^aValue from Ref. 14.

^bValue from Ref. 13.

^cValue from Ref. 18.

^dValue from Ref. 19.

Como ocorre com as fibras picadas, os *rovings* são fornecidos com tamanho sob medida para realçar a força interfacial destes materiais às resinas desejadas. Devido ao tamanho ser obtido geralmente através de uma pasta aquosa diluída, durante a secagem a variação de tamanho pode ocorrer, fazendo com que as bordas exteriores da embalagem contenham maior tamanho do que as seções internas. Dependendo do processo, as variações do tamanho e da cura podem potencialmente conduzir a diferenças em impregnação e à durabilidade dentro de uma única embalagem. Um método de abrandar a variação do tamanho é usar a secagem dielétrica durante a operação de secagem ou enrolar propositadamente a embalagem deixando furos de respiro para acelerar o processo de secagem. O percentual de ingredientes igualmente dita como cada fibra é presa firmemente as fibras mais próximas. Filamentos firmemente aderidos podem ser vantajosos até que um ponto seja alcançado onde as fibras desenroladas enredam nas camadas da fibra abaixo (bloqueando). Os filamentos bem aderidos tendem a processar melhor sob uma perspectiva mecânica, especialmente se um ingrediente termofixo está presente, visto que menos filamentos ligados serão mais fáceis de impregnar em alguns processos. A adesão para um dado processo é uma questão de compatibilidade química à matriz e à boa processabilidade.

Embora controlado parcialmente pelo percentual de ingredientes sob medida, a geração de poeira pode ser reduzida significativamente usando olhais de guia cerâmicos. A taxa de geração da poeira (ou a taxa de desgaste) é relacionada diretamente ao quanto duramente o *roving* é empurrado de encontro a outra superfície, à velocidade com que o *roving* é arrastado sobre outra superfície e aos fatores tribológicos dos materiais (tribologia = ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados), tais como a aspereza,

os coeficientes de fricção, e as taxas de desgaste. Selecionando os olhais de guia ou as barras de tensão erradas pode-se arruinar a processabilidade do *roving*.

A consideração final importante de processamento em alguns processos relacionados a *rovings* é a uniformidade da tensão. Isto é particularmente verdadeiro onde a impregnação é uma consideração ou quando a ruptura da fibra for um fato. As tensões elevadas em alguns processos conduzirão para melhorar a impregnação às custas da ruptura da fibra, enquanto que baixas tensões podem causar falhas de impregnação ou a rupturas devido a laçadas. Para compreender inteiramente as operações de *roving* onde a tensão afeta a qualidade, verificações regulares de qualidade da tensão devem ser executadas. Os medidores de tensão podem ser comprados de companhias específicas – ver web sites (por exemplo, referencias 20 e 21). Todas as linhas de processamento devem vir equipadas com alguma medida de controle de tensão tal como aquelas sugeridas por Roisum [22].

7.1.4.3 Mantas e véus

Há um vasto leque de mantas tecidas e não tecidas de vários materiais de fibra. O material é fornecido em rolos, com acessórios de emenda especiais necessários, tais como o uso de um acumulador, balancim de flutuação e tala aérea, ou embalado em caixa, onde a “cauda” está disponível para emendar a qualquer momento e o restante do material é guiado delicadamente para frente e para trás dentro da caixa. A emenda pode ser realizada com colagem, papel adesivo, ou métodos de grampeamento.

Os véus de fios de finais simples ou os *rovings* podem conseguir ótimas propriedades no tecido (sentido da máquina), trama (sentido transversal a máquina), ou outro projetado especialmente para sentidos angulares. Estes materiais são usados quando módulos muito elevados são exigidos em alguns sentidos críticos. A manta tecida será formada com a química percentual do *roving* a menos que outros revestimentos forem aplicados. Uma característica importante de materiais tecidos é sua facilidade de conformação. Esta propriedade é ligada diretamente ao padrão do tecido, com o tecido mais frouxo tendo melhor conformação. Ou seja, quanto menor o cruzamento de *rovings* entre cada tecido, mais pode ser conformado.

As mantas ou véus formados de fibras contínuas podem ser produzidos por aspensão ou colocando filamentos contínuos em linhas retas ou em padrões regulares de redemoinho ou formando filamentos e os soprando pneumaticamente em um transportador móvel de fio. As fibras contínuas pré-formadas são então ligadas entre si, através da aplicação de uma pasta, ou aderidas mecanicamente através de fibras ou agulhas de grampeamento.

As fibras picadas podem ser formadas desbastando o *roving* de entrada ou aplicando-as secas diretamente. Fibras picadas longas podem ser processadas em véus com as técnicas de colocação a seco tais como no processo de Rando-Webber ou possivelmente cardando, enquanto que tecidos de fibras curtas são melhores para o processo de impregnação, que usa a fibra picada molhada como uma entrada. Fibras colocadas a seco são capazes de fluir melhor que as fieiras de filamento contínuo em processos de fieira de termoplástico – vidro tipo moldagem por compressão termoplástica de fibra de vidro (GMT) e ainda fornecer um comprimento razoavelmente longo da fibra. Os produtos lisos tecidos são usados frequentemente para fornecer a melhor capacidade de fluxo da fibra no GMT, ou são usados para realçar atributos estéticos e ainda fornecer algum realce da propriedade física. A finalidade principal dos tecidos na área de compósitos é esconder linhas ou padrões não visíveis do tecido colocado abaixo das camadas exteriores.

As mantas tecidas ou não tecidas são muitas vezes processadas através de vários banhos de termofixo, banhos de solvente termoplástico, termoplástico pulverizado, ou mesmo com as técnicas de impregnação de massa termoplástica para dar forma a mantas pré-prontas. Estes pedaços pré-prontos tem a vantagem da saturação quase completa da resina e são geralmente menos irritáveis a pele e mais fáceis de colocar em uma peça; as desvantagens principais são os custos adicionais da matéria-prima, combinado com a perda da conformação em torno das curvas e dos cantos.

7.1.5 Cargas e aditivos

Não é possível deixar de mencionar, mesmo que brevemente, as cargas e os aditivos. Os leitores interessados em um conhecimento maior destes insumos devem encontrá-los no livro de texto referido em [1.23]

7.1.5.1 Cargas

As cargas são usadas principalmente para reduzir custos, e secundariamente para conseguir um pouco de incrementos do módulo, do retardo a chama, de resistência ao desgaste, de dureza, de anti-bloqueio, de nivelamento, e de outras melhorias. Exemplos típicos de redução de custo incluem argila, carbonato de cálcio, talco, serragem de madeira, areias especiais, pó de rocha, e mica. O reforço é possível com os materiais que têm um suficiente aspecto de relacionamento, tal como o pó de rocha agulhado e a mica em plaquetas. Os benefícios de retardo a chama são realizáveis com cargas como o carbonato de cálcio, o tri-hidrato de alumínio, o hidróxido de magnésio, e a bauxita. O talco e a mica foram usados no passado por suas propriedades de anti-bloqueio (isto é, impedindo que os materiais furem entre si), enquanto que a alumina é usada frequentemente no campo da laminação de termofixos fornecendo dureza aos pisos ou decorações laminadas. Um dos usos predominantes de determinadas classes da mica é atuar como um agente de planicidade ou de nivelamento para produzir superfícies automotivas classe A em moldagem de laminas compósitas (SMC). Claramente, as cargas têm suas regras na formulação de compósitos e melhoria de seu desempenho. Os leitores interessados em detalhes adicionais podem procurar na referência 23 ou com fornecedores desta área.

7.1.5.2 Nanoparticulas

A mais interessante nova carga no mercado é a nanopartícula ou nanoreforço. Nanopartícula é compreendido como partículas extremamente pequenas, medidas tipicamente em nanômetros, que têm elevada compatibilidade. A mais comum é a montmorilonita, uma argila de base silicone compreendida de plaquetas ultrafinas, embora as nanopartículas de grafite e carbono em tubos estejam igualmente disponíveis [24.25]. Com a combinação correta de energia de mistura, tempo de residência, e de dispersantes carregados tais como o dimetil dihidrogenado cloreto de amônio quaternário, a octadecilamina, ou ionômeros, é possível tomar as plaquetas iniciais de montmorilonita, alargar o afastamento dentre elas com a introdução de camadas do polímero, que é denominada uma estrutura intercalada, e esfoliar finalmente as plaquetas ultrafinas formando uma estrutura composta bem dispersa [24.26-28]. O tamanho pequeno, combinado com a compatibilidade elevada destas partículas permite muito bom reforço das propriedades a níveis de 3 a 5% que podem combinar com muitos materiais normalmente extrudados de compósitos ou materiais com cargas minerais usados na faixa de peso de 20 a 40% [27]. As vantagens destes materiais são o retardo a chama, níveis mais elevados de cristalinidade (agente nucleante), propriedades de barreira ao vapor nos filmes, reforçando as

propriedades [24.25], e no caso das formulações baseadas em carbono, as propriedades de condutividade elétrica [24.25]. Os métodos de seguir com a intercalação e o processo final de esfoliação envolvem normalmente a difração de largo espectro de raio X, seguida do afastamento entre as camadas da argila, de microscopia eletrônica, e no caso das cargas condutoras, as medições de resistência [24.25]. Embora os materiais de nanocompósitos representem materiais novos, de promessa muito exitosas, eles são processados através da extrusão tradicional e não são mais discutidos neste capítulo. Ao leitor se indica o capítulo 3 deste livro e as referencias 24 a 29 em nanocompósitos e em variáveis dos parâmetros de extrusão.

7.1.5.3 Aditivos

Há uma infinidade de aditivos para melhorar as propriedades tais como o desempenho ao impacto (sacrificando a força elástica): iniciadores, ativadores, retardadores, retardadores de chama, estabilizadores de ultravioleta, estabilizadores térmicos, e muito mais. Quando um efeito desejado ou especial é exigido, é geralmente melhor consultar os livros de texto e os fornecedores destas áreas [1.23].

7.1.6 Métodos de controle de qualidade

As peças moldadas devem ser verificadas visivelmente para ver se há alguma discrepância com a solicitação do cliente. Tipicamente, isto envolve um rápido exame da peça, um teste físico ocasional, uma verificação da cura quando as resinas termofixas são empregadas, e outros testes relacionados com especificações do cliente. Medidas de controle de qualidade de termofixos incluem o uso da calorimetria de varredura diferencial (DSC), calorimetria térmica diferencial (DTA), analisadores térmicos mecânicos (TMAs), e os analisadores dinâmicos mecânicos (DMAs) para medir alterações na temperatura de transição vítrea de uma peça [2.5.14]. A temperatura de transição vítrea é definida como a temperatura onde um material apresenta um módulo abrupto (DMA), densidade (TMA), ou capacidade de calor (DTA, DSC) mudando a inclinação com a temperatura, e é igualmente uma indicação da extensão da cura, com os materiais termofixos de elevado módulo que alcançam maiores níveis de cura. As medições são executadas aquecendo o material e examinando a quantidade de calor, densidade, ou mudanças do módulo. O instrumento da calorimetria de varredura diferencial mede a diferença do calor entre uma célula vazia e uma amostra mantendo um perfil de temperatura especificado pelo utilizador. O princípio do analisador térmico diferencial é exatamente o oposto do DSC, com o fornecimento de energia sendo controlado e as diferenças de temperatura gravadas. Os analisadores térmicos mecânicos podem ser usados para observar mudanças da densidade enquanto o volume do material é observado com as mudanças na temperatura. Os métodos dinâmicos mecânicos clássicos de análise envolvem varrer a temperatura acima das temperaturas tão baixas quanto as do nitrogênio líquido e medir as diferenças de módulo experimentadas através de um pêndulo de torção dinâmico [14]. Infelizmente, a temperatura de transição vítrea é uma temperatura fugaz que é sensível ao método de medição e a taxa de temperatura [2], então todo o método de controle de qualidade que empregar estas técnicas deve ser executado consistentemente.

Em alguns materiais termofixos a constante dielétrica varia suficientemente com a cura permitindo uma medida indireta da cura. Adaptando termopares na cavidade ou na superfície, é praticável medir níveis da cura através da peça durante o processamento. Claramente, esta é uma técnica muito poderosa que pode ser usada diretamente para determinar o que está acontecendo em linha [14]. Se a matriz do compósito é uma resina termoplástica ou termofixa as medições com transdutor de temperatura e de pressão durante a moldagem são outros métodos de julgar as

diferenças na viscosidade, características da cura (quando aplicável), e possivelmente as características da completa moldagem se o transdutor estiver situado na extremidade de uma parte dianteira de fluxo [30].

O índice de fibra e de carga pode ser determinado de diversas maneiras diferentes. Se as fibras ou as cargas não são combustíveis, a peça ou uma seção da peça podem ser colocadas em um forno ou em uma mufla de alta temperatura para queimar a resina. Contanto que há a boa decomposição da resina, todo restante que permanecerá são as fibras e as cargas de interesse. As cargas podem ser então removidas agitando os materiais em uma peneira que seja suficiente para reter a maioria de tamanhos da fibra. Note que esta técnica não trabalharia bem com materiais de fibra muito curtos que contêm cargas do mesmo comprimento que as fibras. Se as etapas de queimar e peneirar são eficientes, os índices percentuais de fibra de vidro, de carga e de resina da peça são rapidamente encontrados. Uma ligeira modificação desta técnica com a substituição do nitrogênio por ar permite medições similares com pó ou fibras de carbono. O método de queima não é sempre possível. Às vezes o carbono de origem animal, da maioria das resinas; e outros tipos de fibras também queimam. Quando esta situação ocorre, a melhor opção é encontrar solventes para separar a resina matriz da fibra e das cargas. Fornecendo suficiente tempo, calor, e a seleção do solvente, é quase sempre possível separar fisicamente os vários ingredientes. Métodos analíticos tais como o trabalho com espectroscopia a infravermelho e com raio X obtém resultados razoáveis com algumas resinas termoplásticas. Por outro lado, muitas resinas de base termofixa não se dissolverão, devido ao seu muito elevado peso molecular. Às vezes é possível usar sistemas muito ácidos ou cáusticos para degradar materiais termofixos, mas neste momento há o interesse sobre as fibras e as cargas que igualmente se degradam. Quando todas as outras análises falham, pode ser necessário criar materiais de composição conhecida para serem utilizados como uma impressão digital (referencia) sendo analisados com técnicas de infravermelho e outras.

Quando é possível separar rapidamente os componentes básicos de uma peça, é possível calcular uma densidade teórica, a densidade real, e o índice de vazios:

$$\rho_t = \frac{1}{\sum(w_i/\rho_i)} \quad (8.6)$$

$$\varepsilon = \frac{1 - \rho_a}{\rho_t} \quad (8.7)$$

onde ρ_t é a densidade teórica quando não há nenhum vazio, o Σ representa uma operação de soma, o w_i é a fração de peso de um dado componente, ρ_i é a densidade de um dado componente, ε é a fração de porosidade, e o ρ_a é a densidade real medida. As medições da densidade podem ser executadas conforme a ASTM D792.

A presença de vazios pode igualmente ser detectada com métodos acústicos, ultra-sônicos, e se as fibras empregadas são condutoras, com métodos elétricos ou magnéticos. O som viaja mais rapidamente através dos materiais de módulo elevado, que é o porque da aproximação dos trens poder ser detectada muito mais rapidamente escutando trilhos metálicos da estrada de ferro do que pela visão ou pelo som. Pelo mesmo princípio, os vazios retardam o som através da peça,

e esta taxa mais lenta de velocidade pode ser detectada com métodos acústicos e ultra-sônicos. Os métodos elétricos e magnéticos podem ser úteis para aquelas circunstâncias onde uma fibra condutora é utilizada. Como no caso do som, os vazios são áreas de alta resistência, e esta será detectada através da passagem de eletricidade [14].

Outras verificações da qualidade são baseadas frequentemente na estética, tal como fibras não bem incorporadas, e nas verificações da estabilidade dimensional da peça, tais como o empenamento. O teste destrutivo deve ser feito de uma maneira consistente com amostragem aleatória e com as condições ambientais consistentes, em particular para aqueles materiais cujas propriedades físicas dependem do teor de umidade. A metodologia seis sigma pode ser particularmente útil ao empregar a amostragem adequada e em localizar métodos exatos de teste contra os procedimentos pobres de teste [31.32].

7.2 PROCESSOS DE MOLDAGEM DE COMPÓSITOS

O equipamento que a maioria de processos de compósitos tem em comum é o molde. Assim como com os plásticos não reforçados, muitos processos de compósitos, tais como a moldagem por transferência de resina (RTM), moldagem de laminas compósitas (SMCs), moldagem de compósitos em bruto (BMCs), moldagem por injeção termoplástica de fibra longa (LFT), e a moldagem por compressão termoplástica de fibra de vidro (GMT), usam moldes fechados, enquanto outros, tais como técnicas manuais de revestimento em camadas e de pulverização, empregam um molde aberto. Nas seções abaixo nós veremos a manufatura de moldes comuns entre estes processos antes da investigação em processos específicos de compósitos. A figura 8.5 mostra algumas diferenças gerais de moldagem e a terminologia genérica.

7.2.1 Práticas gerais de moldagem

7.2.1.1 Materiais de construção

Os moldes são construídos de numerosos materiais, dependendo do custo da matéria-prima, do volume da peça, custos de usinagem, seleção do material da peça, facilidade de manutenção e de reparo, e em algum grau, da propriedade de desempenho térmico. As vantagens e as desvantagens de um número de materiais comuns de molde assim como sua vida de ciclo são listadas na tabela 8.5. Note que muitos dos materiais de molde listados podem suportar revestimentos, tais como o cromo, que aumentam significativamente o número de ciclos do molde à falha. Outra consideração importante é a das propriedades térmicas do material do molde e de sua influência no tempo de ciclo; os materiais tais como o cobre-berílio oferecem tempos de ciclo rápidos às custas de uma vida mais curta da ferramenta através de características térmicas associadas.

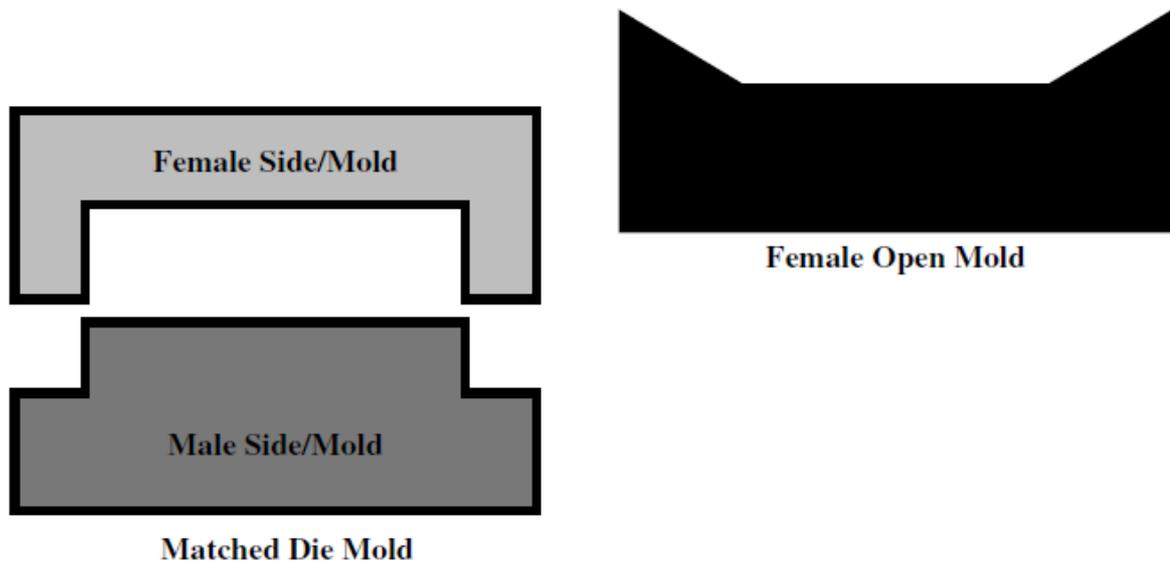


FIGURE 8.5 General mold terminology.

As condições de venda das peças influenciam fortemente na seleção do material. Como exemplo, suponhamos que uma peça desejada tem limitado volume de vendas, empregando os métodos de baixa pressão, e usa termofixos como poliésteres, epóxis, poliuretanos, ou matrizes termoplásticas de baixa temperatura de fusão. Sob estas circunstâncias pode ser válido selecionar silicões, epóxis com enchimento metálico, compósitos de epóxi, ou os vulcanizáveis à temperatura ambiente como material do molde. Se, de outro modo, um termoplástico reforçado de temperatura elevada de fusão é o material desejado e o volume de vendas da peça é elevado, a seleção apropriada pode ser o aço P-20 ou H-13 endurecido, devido à vida prevista da ferramenta ao redor de 1 milhão de ciclos.

7.2.1.2 Diretrizes gerais de projeto de molde

Evite curvaturas e ângulos acentuados nas peças usando raios suaves com um mínimo de raio para espessura de 0.25/1 em torno das curvas da peça e de 0.5/1 em torno dos reforços. Estes critérios vêm dos fatores de concentração de esforços versus os raios das curvas observados nos livros de texto de engenharia mecânica [39] ou nos livros de texto da moldagem por injeção [40]. Os compósitos adicionam mais complicações adicionais nas quais os reforços não podem estender ao mesmo canto de uma volta apertada que podem conduzir a um ponto fraco. O alto conteúdo de resina é em particular um problema nos processos como o revestimento manual de camadas ou a moldagem por transferência de resina onde é muito fácil não colocar os meios de reforço perto de uma volta da peça. Este problema igualmente existe nos materiais com meios de reforço que não fluem facilmente com a resina, tal como a moldagem por compressão de materiais termoplásticos de fibra de vidro com comprimento mais longo ou nas aplicações que envolvem telas tecidas. O problema oposto de não ter a suficiente resina pode existir quando uma resina deve impregnar numa tela tal como num processo de RTM. As cargas muito elevadas de fibra podem conduzir também ao mau desempenho desde que a resina insuficiente conduzirá a um material que não se consolide inteiramente.

Um ângulo de inclinação significativo deve ser aplicado para permitir a melhor confecção da peça. Tipicamente os compósitos exigem ângulos de inclinação maiores que dois a três graus

para seções mais curtas até cinco graus para seções mais longas de comprimento, são recomendações devido às características de fricção mais elevada e desgaste de muitas matérias-primas compósitas [40, 41].

Seções sobre cortadas, quando aplicáveis, exigem atenção particular em permitir a liberação da peça do molde. Isto pode ser tão fácil quanto uma modificação do molde, se o cliente aceitar, ou tão complicado quanto liberar uma seção da peça antes de outra, ou possivelmente ainda pior, se exigir seções giratórias do molde durante o ciclo de moldagem [40.42].

O molde deve ser projetado de modo que a peça contraia à sua forma final desejada sem empenar. Isto pode ser realizado propositadamente combinando o molde ao coeficiente de expansão térmica da peça, ou se isto não é possível, recorrendo às informações dos fornecedores da matéria-prima. As matérias-primas termofixas e os materiais termoplásticos semi-cristalinos são conhecidos na contração substancialmente maior do que nos termoplásticos amorfos, que por sua vez podem contrair mais do que um bem projetado perfil de peça adicionada com termofixo. As formulações de compósitos podem originar piores contrações. A orientação dos reforços e as cargas adicionadas reduzem significativamente a contração no sentido paralelo à linha central principal das partículas. A anisotropia destes materiais torna muito difícil de prever a contração, o que pode facilmente conduzir a algum retrabalho ou a necessidade de trabalhar com um protótipo.

TABLE 8.5 Materials of Mold Construction

| | Cost (\$/lb.) | Density (lb./in. ³) | Heat Capacity (Btu/(lb.·°F)) | Thermal Cond. (Btu·in/(in. ² ·h·°F)) | CTE (10 ⁻⁶ /(°F)) | Fib. Ease | Mold Cycles ^a | No. of Mol. Cycles ^b | Advantages |
|------------------|---------------|---------------------------------|------------------------------|---|------------------------------|-----------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| Aluminum 7075 | Medium | 79 ^c | 0.23 ^d | 860 ^e | 12.9–13.6 ^f | Medium | 250–300K | 250–300K | Thermal properties cheaper than steel |
| Beryllium-copper | Medium–high | 520–530 ^d | <0.1 ^d | 1450–1800 ^d | 9.8 ^d | Medium | 5K | 5K | Excellent thermal properties |
| Brass (Cu/Zn) | Low–medium | 580 ^d | 0.09 ^d | 1000 ^d | 9.8 ^d | Easy | 5K | 5K | Rubrication ease |
| Chaulisepoxy | Low | 100–120 ^d | 0.23 ^d | 2–3 ^d | 13.7 ^d | Easy | 0.1–2K | 0.1–2K | Low cost, castable |
| Kinkstair | Low–medium | 415 ^d | 0.10 ^d | 69 ^d | 15.2 ^d | Easy | 5–10K | 5–10K | Castable, fib. ease |
| RTV ^g | Very low | — | — | — | — | Very easy | 0.01–0.2K | 0.01–0.2K | Inexpensive, ease of fab. |
| Steel (H-13) | High | 485 ^h | 0.11 ⁱ | 120–170 ^j | 5.8–7.3 ^k | Difficult | >1000K | >1000K | Long life, strong, resists wear |
| Steel (P-20) | High | 460 ^h | 0.13 ⁱ | 200–215 ^j | 7.0–7.5 ^k | Difficult | >1000K | >1000K | Long life, strong, resists wear |
| Wood (mahogany) | Low | 44 ^l | — | 220 ^m | 12 ⁿ | Easy | –0.1 K | –0.1 K | Light, inexpensive, fib. ease |

^aRoom-temperature vulcanizes, castable rubbery mold substances.

^bMold cycles to failure are very dependent on compression strength, mold alignment, burn-in treatment (if any), coatings (if any), corrosion resistance (if applicable), thermal expansion/contraction, and molded material. Note that K=1000 in the table.

^cFrom Ref. 31.

^dFrom Ref. 17.

^eFrom Ref. 24.

^fFrom Ref. 8.

^gRTV stands for a room-temperature vulcanizes.

^hFrom Ref. 36.

ⁱFrom Ref. 15.

^jFrom Ref. 37.

As regras gerais para a contração são mostradas na tabela 8.6. De preferência a contração deve ser resolvida corretamente, primeiramente fazendo sob medida o molde, em segundo lugar usando todas as variáveis de processamento diferentes do tempo de ciclo, e por último ajustando

o tempo de ciclo como um recurso final [42.43]. O molde força a peça a suportar alguns esforços internos que poderiam ser aliviados sob circunstâncias de temperatura mais elevadas. O empenamento aumenta com ferramentas de tamanhos maiores, com o maior nível de cristalinidade em materiais termoplásticos semi-cristalinos e quando a diferença entre a temperatura de cura e a temperatura ambiente aumentam [33.40].

Considerando a influência da uniformidade da temperatura na contração, quanto maior a uniformidade de espessura da peça e a uniformidade da temperatura do molde, menos propensa será a peça de empenar. As linhas de resfriamento ou de aquecimento são preferidas sobre os trajetos de fluxo com serpentinas tendo em vista que a temperatura das linhas de resfriamento deve mudar através do molde. Estas linhas são de preferência alimentadas por um sistema múltiplo que divide o fluxo uniformemente. Os canais de resfriamento conformados, embora mais caros de usinar, são de maior valor a longo prazo, devido ao melhor controle dimensional e possivelmente, a tempos de ciclo mais curtos. A dimensão de linha típica de resfriamento/aquecimento é 16 a 19 milímetros no diâmetro e é localizada geralmente de um a dois diâmetros distantes da peça. Quando dois moldes são empregados, dois sistemas de resfriamento devem ser empregados, e estes sistemas devem usar água ou o óleo. Se uma dada prensa for colocada para comutar de moldagem por compressão (SMC) a moldagem por transferência (GMT), por exemplo, as linhas do resfriamento/aquecimento podem trabalhar para ambos, e estas linhas são preferivelmente curtas entre o molde e a unidade térmica para evitar perdas de aquecimento ou resfriamento fora do molde [41.44].

As marcas na pele e as regiões de vazios ocorrem em seções mais grossas da peça do que comparadas às seções finas. Desde que é quase sempre necessário projetar moldes com variação de espessuras, o problema de marcas na pele, de recortes na superfície próximos a seção grossa, e de vazios (furos) no centro destas seções grossas pode ser problemático. O único modo para resolver isto é empregar propositadamente um inserto na seção grossa [42]; uma segunda maneira possível é adicionar agentes de sopro na formulação.

Linhas de solda devem ser evitadas inteiramente ou serem colocadas em um ponto sem prejuízo de uma perspectiva da propriedade estética ou física. No caso dos compósitos, as linhas de solda são pontos fracos, desde que somente a força da resina será conseguida nesta área. As vezes é possível remover inteiramente as linhas de solda onde uma abertura pequena ocorre. Isto é o melhor naqueles casos com pós corte dos furos do que para tentar moldar uma solda em uma peça que sirva como um membro estrutural. Em outros casos a linha de solda pode ser colocada em uma região não crítica ao esforço com a colocação em bloco (SMC/BMC/RTM/GMT) ou a colocação em porta (LFT) [41.45.46], ou a linha de solda pode ser eliminada através do equipamento próprio que pode proporcionar um ciclo das frentes de fluxo uma com a outra [47.48].

TABLE 8.6 General Shrinkage Rules of Thumb

| Variable | Effect |
|-----------------------------------|--|
| Pressure | Higher pressure results in less shrinkage. |
| CTE difference | Larger difference will result in more shrinkage/warping. |
| Cycle time | Shorter cycles lead to hotter part release and more shrinkage. |
| Low-profile additive (thermoset) | LPAs reduce shrinkage in thermosets. |
| Crystalline level (thermoplastic) | Higher crystallinity means more shrinkage. |
| Mold temperature | Lower temperatures lead to less shrinkage. |

Source: Refs. 33 and 40.

7.2.1.3 Equipamento de medição de molde de matriz fundida

Quando empregar técnicas combinadas de moldes fundidos para processos tais como SMC, BMC, GMT, ou métodos de porta LFT, é importante que os moldes combinados da matriz fundida tenham blocos de batente, tesouras finais, blocos de orientação, pinos ejetores (se necessário), e medidas para ventagem. Os blocos de batente são blocos metálicos curtos situados em torno da periferia do molde, e estes devem somente estar em contato quando não há nenhum material no molde ou quando o tamanho em bloco inicial é demasiado pequeno. Moldagem em batentes deve ser evitada com a maioria de materiais compósitos visto que eles exercem a pressão do molde nos blocos ao invés de na peça onde as forças de consolidação são necessárias para conseguir a moldagem completa com índice mínimo de vazios [41.45]. A exceção a esta regra ocorre com RTM, onde um líquido é introduzido no molde [49] (nota que RTM normalmente não emprega uma máquina de moldagem de compressão completa) ou quando um artigo propositadamente espumado, que tenha normalmente agentes de expansão na formulação, leva a um resultado desejado da espessura [50]. As bordas da tesoura impedem o excesso de material de vazar para fora dos moldes. Trabalham reunindo duas bordas verticais, que se acoplam aproximadamente de 12 a 19mm antes do enchimento do molde, que permanecem em grande proximidade (a uma abertura de 0.05 a 0.08 mm) entre eles. As bordas de orientação acoplam ligeiramente mais cedo (50 mm) do que as bordas da tesoura e impedem dano do molde devido ao seu deslocamento. Se a remoção da peça é uma necessidade, os pinos de ejetores podem ser usados para empurrar as peças fora de suas cavidades. Estes são fixados normalmente em seções mais finas da peça, tendo em vista que estas seções solidificam primeiramente. O tamanho do pino é tal que não causará dano significativo da peça quando a empurrar. A ventagem deve existir, especialmente nos reforços ou nas seções de saliência, que podem causar desalinhamento, e marcas de queimadura nas peças do GMT e através de toda a peça. A força de fechamento real de uma máquina de moldagem típica de compressão depende da espessura da peça, da cobertura inicial do molde, da taxa de fechamento projetada da prensa, e da fluidez do material, que inclui a viscosidade, o tipo de carga, o nível de carga, e a temperatura do molde. Não é uma função simples de cobertura da peça a menos que todas as outras variáveis forem fixas. A figura 8.6 mostra um número destas características importantes [41.45].

7.2.1.4 Medidas de desmoldagem do molde

Um material nunca deve ser moldado sem o conhecimento prévio de se o material contém ou não um agente desmoldante, ou uma aplicação de um desmoldante no molde, que possa ser sob a forma de películas ou de liberações do álcool de polivinila (PVA), pulverizadores de PVA, pulverizadores de silicone, pulverizadores de flúor carbono, pulverizadores de cera, e semelhantes. Não há nada pior no mundo do processamento (à exceção de quebrar um molde por uma razão insensata) do que o tempo de despesa envolvido no cuidado das matérias-primas coladas em um molde [14.40.42.51]. Uma segunda consideração é se a peça moldada se submeterá a uma operação subsequente de pintura. Se isto for verdadeiro, é sábio usar desmoldante no molde que não reduza severamente a energia de superfície da peça, como acontece com a aplicação dos silicones e dos flúorpolímeros [40.51].

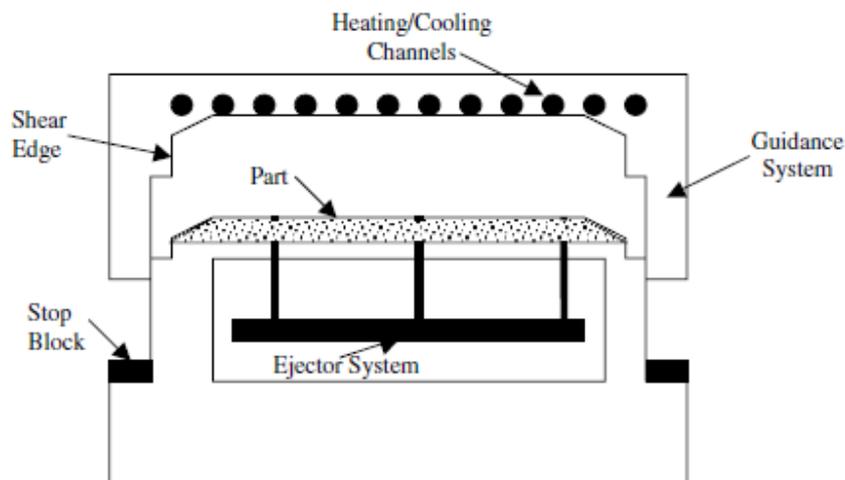


FIGURE 8.6 Important matched die mold features.

7.2.1.5 Prototipagem rápida

A tecnologia moderna possibilitou a prototipagem rápida. Hoje é possível fazer um desenho assistido por computador e usar a tecnologia do corte a laser, a litografia estereofônica, o rápido controle numérico de computador, ou outras técnicas para criar um molde de materiais tais como vulcanizáveis a temperatura ambiente (uretano/silicone), moldes em base epóxi, e outros. Embora estes moldes não durem muitos ciclos, eles permitirão a avaliação rápida das necessidades do cliente, especialmente onde o termofixo de baixa temperatura é o material escolhido [52-58].

7.2.1.6 Medidas gerais de segurança

Sob uma perspectiva da segurança, todas as máquinas de moldagem de injeção e de compressão devem vir equipadas com uma cortina de luz, um feixe de luz, ou os lasers que impedem ajustes de últimos segundos à prensa enquanto está fechando [59-62]. Houve diversas fatalidades na indústria de molde de compressão relativa diretamente aos operadores que desligam o equipamento de segurança e que fazem ajustes de última hora. É absolutamente imperativo impedir que isto aconteça, com a manutenção e a disciplina apropriadas. Quando as altas pressões são aplicadas, os procedimentos de bloqueio e de abertura rápida devem ser empregados antes que qualquer pessoa esteja sobre ou entre as duas superfícies do molde [63.64]. Os materiais termofixos exigem frequentemente a segurança e as limitações ambientais. Embora as emissões ambientais estejam fora do objetivo deste capítulo, os iniciadores de peróxido e outros materiais altamente combustíveis são perigosos se não trabalhados apropriadamente [65]. As emissões de alguns materiais exigem o uso de máscaras ou de instrumentos de respiração. Estes devem sempre ser colocados em uma área da planta longe das operações gerais e em um ambiente refrigerado

7.2.1.7 Comprando moldes

O comprador de materiais é a melhor escolha para a compra de moldes. Tudo deve ser negociado frente a frente, incluindo quem possui o molde, os termos do programa de *leasing* (se aplicável), quem armazenará o molde, que tolerâncias são esperadas, que empenamento é aceitável, e assim por diante. Seja extremamente cauteloso e ponha isso tudo por escrito.

7.2.2 Métodos de moldes abertos

7.2.2.1 Aplicação manual de camadas

A aplicação manual de camadas é um dos métodos de processamento de compósitos dos mais antigos. É usada para criar grandes peças de aviões e nas indústrias navais e em peças diárias comuns tais como saunas, banheiras e dissipadores. As telas tecidas ou feitas de malha, as fibras contínuas, e as fibras picotadas são ajustadas acima de finas mantas ou véus para os atributos de superfície lisos, assentados normalmente acima de uma camada de revestimento de gel que faz o contato direto com a superfície do molde aberto. As telas consistem normalmente de material de módulo elevado tal como a fibra de vidro, fibra de carbono, o Kevlar e semelhantes, ou as mantas pré-prontas, conjuntos de fibra pré-impregnados com uma resina. Os conjuntos são colados junto com a aplicação de uma pasta termofixa que pode ser aplicada manualmente ou através de equipamento semi-automático. Depois que a resina é aplicada, o que pode ser feito aplicando a suficiente resina sob pressão através de rolos sulcados ou de um rolo liso, o conjunto é repousado para cura ou é colocado em um ambiente de alta temperatura. Os fornos de alta temperatura são uma exigência absoluta se as mantas pré-prontas termoplásticas inteiramente polimerizadas estão sendo empregadas. A peça final pode ser cortada manualmente ou roboticamente com roteadores, com os jatos de água de alta pressão, ou por picadores. A figura 8.7 ilustra os fundamentos desta técnica. A figura 8.8 mostra o processo no uso real. A seção de molde aberto da peça será o lado de superfície de maior qualidade. É este lado onde um revestimento do gel pode ser preparado primeiramente e permitido se endurecer um pouco antes de adicionar um tecido opcional ou uma tela de tecido fino. Se o alisamento do lado oposto do molde é desejável, as laminas de sacrifício, as películas, ou os tecidos finos podem ser empregados [14.66].

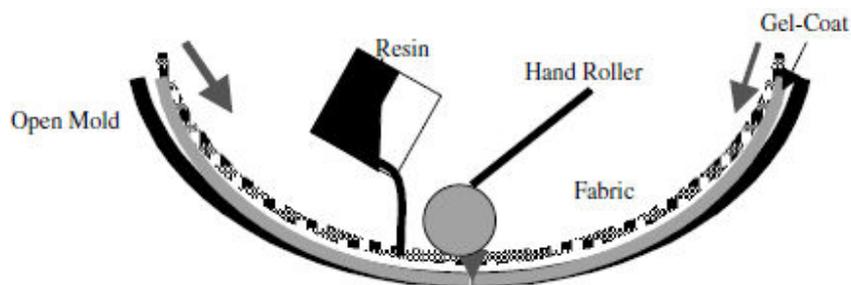


FIGURE 8.7 Hand-layup method.



FIGURE 8.8 Hand layup in practice. (Courtesy of Owens Corning. Used with permission.)

1. As propriedades mecânicas da peça final precisam ser definidas. Fibras mais longas possibilitam melhores propriedades do que fibras mais curtas. A orientação do reforço igualmente influencia. As fibras orientadas no sentido longitudinal fornecerão a força longitudinal; as telas com orientação no sentido transversal fornecerão propriedades no sentido normal; as fibras orientadas no sentido de $\pm 45^\circ$ fornecem a melhor força de cisalhamento. Se as forças de dobra elevadas são prováveis, é melhor colocar algumas das telas direcionais de fibra mais longas nas regiões exteriores desde que estas regiões suportem a estrutura sob momentos de flexão.

2. A colocação simétrica do conjunto da fibra é importante para evitar empenamento. As peças assimétricas quase certamente empenarão.

3. Na peça devem se evitar todas as curvaturas ou cantos apertados tendo em vista que estes pontos serão regiões de concentração de esforço elevado e porque as telas provavelmente não se dobrarão nem se moldarão nos cantos ou nos ângulos.

4. Evite a grande solda ou linhas de partição. Seqüências empilhadas de tecidos de fabricação devem ser desviadas um mínimo de 2 pol. para evitar a solda em grande escala ou fazer linhas de malhas.

5. A viscosidade de resina aumentada e sua aplicação são situações. Dependendo dos iniciadores e do pacote de catalisador, a resina pode solidificar tão rapidamente quanto em algumas horas. Isto exigirá dos trabalhadores terminarem rapidamente as peças grossas, antes que a resina se torne tão espessa que a fibra impregnada externamente se torna impossível. De um lado, as resinas de baixa viscosidade terão a tendência de escorrerem em regiões não horizontais e estabelecerem-se nas regiões mais baixas do molde. O efeito de impregnado externo contra o impregnado interno é influenciado fortemente pelas telas envolvidas. As telas abertas não ficam impregnadas no interior facilmente e podem conduzir a uma fibra mais uniforme impregnada externamente, visto que com menos telas abertas será menos provável ficar impregnadas no interior. As setas na figura 8.7 ilustram aproximadamente o valor de resina que se estabelece em uma peça do casco de um barco. Um método de evitar escorrimentos e resina mal

impregnada externamente é usar as mantas pré-prontas, que igualmente melhorarão o desempenho mecânico da peça final.

6. Algumas resinas exigirão ciclos longos de cura com perfis de temperatura específicos, que consistem em um aquecimento lento, um ciclo para o fluxo, um aquecimento secundário, uma compressão secundária em mais altas temperaturas para assegurar a cura, seguida por um resfriamento lento [14.66].

As principais vantagens deste método são o baixo custo de investimento (somente um molde aberto e um rolo será necessário) e a habilidade de produzir peças muito grandes. As limitações a esta técnica são curvaturas delicadas, a necessidade de se colocar no interior de um molde aberto, limitações de tempo trazidas sobre a vida de aplicação da resina, custos laborais elevados, taxas de produção lentas, e o fato de que o desempenho da peça dependerá extremamente do nível de habilidade do trabalhador em conseguir uma peça bem impregnada sob as condições de baixo conteúdo de resina [14.66].

7.2.2.2 Pulverização (*Spray-up*)

O método de pulverização da superfície ou aplicação à pistola oferece uma maneira mais rápida de colocar fibras em um molde aberto, em uma estrutura, ou em alguns casos em peças existentes (piscinas ao ar livre). Como com a aplicação manual de camadas, este método não tem virtualmente nenhuma limitação do tamanho da peça. As características essenciais da pistola de aplicação são indicadas na figura 8.9. Aqui um *roving* é colocado na pistola, picado num comprimento desejado de fibra, e pulverizado com a resina termofixa antes da pulverização sobre um molde aberto ou a um suporte de fio fino. As vantagens desta técnica sobre o método manual são a velocidade de fabricação, a colocação mais uniforme da resina, um material que seja mais intercalado, e menor necessidade de habilidade do operador. A desvantagem principal é a perda nas propriedades mecânicas associadas com a necessidade de colocar uma fibra picada mais fina e a aparência fibrosa da peça se as mantas, as telas finamente tecidas, ou os revestimentos de gel não forem empregados [14.66-70].



FIGURE 8.9 Spray-up technique. (Courtesy of Owens Corning. Used with permission.)

7.2.2.3 Moldagem em saco de vácuo/formação a pressão/autoclave

As técnicas mais atuais de moldes abertos para consolidar peças são aplicando a pressão atmosférica (moldagem em saco de vácuo), altas pressões (formação a pressão), ou uma combinação de altas temperaturas e de altas pressões (autoclave). Todas estas técnicas têm algo em comum: um saco exterior que espreme as várias telas ou panos aplicados manualmente em uma peça final que possa conseguir índices de vazios tão baixos quanto 0.5%. De várias maneiras este processo é similar às técnicas empregadas em termoformagem, mas aqui deve haver uma maneira de remover o ar e os voláteis do conjunto da fibra-resina. Como os precedentes processos de moldes abertos, a moldagem em saco de vácuo, a formação a pressão, e os métodos de autoclave são favoráveis às grandes peças tais como as asas de aviões, as seções de cauda dos aviões, os satélites, e os cascos de barco na indústria naval. Os grandes tamanhos aplicam-se igualmente também ao método de autoclave, que é um nome sofisticado para um vaso cuja temperatura (até 500°F) e pressão (até 500 lb/pol²) seja cuidadosamente controlado. Existem unidades de autoclaves tão grandes quanto 10 m no diâmetro por 30 m de comprimento [14.66, 68-70]. A figura 8.10 mostra as características essenciais deste processo.

Cada um destes processos começa aplicando um desmoldante ao molde. Os desmoldantes de molde podem ser ceras, flúorpolímeros, silicones, e semelhantes, mas deve ser tomado cuidado para assegurar a compatibilidade do revestimento do gel (ou da resina) com o restante das resinas e do conjunto fibroso. Dependendo do projeto da peça, há casos onde um anteparo não poroso ou uma beirada de desmoldagem é colocada nas bordas do conjunto para evitar seu escorrimento. As matérias-primas para este processo são então colocadas sobre esta camada. No saco de vácuo ou na formação a pressão os materiais podem ser essencialmente os mesmos que com a aplicação manual de camadas ou com a pulverização da superfície, enquanto que no processo de alta tecnologia de autoclave, as matérias-primas consistem tipicamente em mantas pré-prontas com índice de volume de fibra de aproximadamente 60%, em fitas, ou em telas pré-impregnadas de resina para conseguir os mais baixos índices de vazios possíveis. Ao usar mantas pré-prontas termofixas do estágio B, deve-se atentar para o tempo de durabilidade da

resina. A maioria de mantas pré-prontas termofixas têm uma vida de 8 dias sem refrigeração. Se a manta pré-pronta foi colocada em um ambiente refrigerado, deve ser colocada à temperatura ambiente antes da sua abertura à temperatura exterior para evitar bolhas de umidade. Mantas pré-prontas devem exibir alguma aderência, que pode ser útil para colocar insertos firmemente no lugar. Não há nenhum cuidado com o tempo de durabilidade das mantas pré-prontas termoplásticas, mas o uso de altas temperaturas torna-se imperativo a menos que o material termoplástico estiver sendo polimerizado durante a etapa do processo. As regras gerais do projeto discutidas na precedente seção de molde aberto aplicam-se aqui também no que diz respeito à orientação da fibra e à montagem geral. Uma película de separação é colocada em seguida em torno deste conjunto. Esta camada deve ser ligeiramente mais larga do que a estrutura composta, e consiste normalmente em uma película perfurada de alongamento elevado.

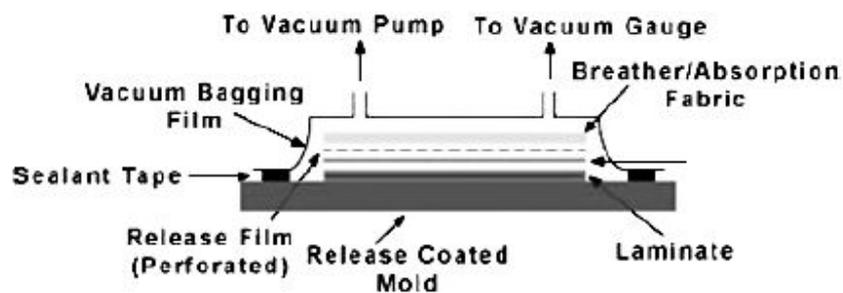


FIGURE 8.10 Vacuum bagging method. (Courtesy of Owens Corning. Used with permission.)

O separador deve ser capaz de se desmoldar da estrutura composta abaixo permitindo que o vapor e alguma resina passe através dele. Idealmente, a resina passando por esta camada é captada em um coletor, que é normalmente um poliéster de não tecido, um vidro tratado, ou uma tela de algodão. O coletor absorve a resina adicional ao ser suficientemente conformado evitando transmitir enrugamentos do saco à peça. A possível camada opcional a seguir é a da película de barreira. Esta é outra camada de película, mas com poucas perfurações. Esta camada de película perfurada de Mylar ou de Teflon deve, sob circunstâncias ideais, ser a barreira final ao fluxo da resina. Esta camada é seguida então por uma camada opcional de respiro para distribuir uniformemente o ar e para evitar transferir enrugamentos do saco abaixo deste nível. Essencialmente o mesmo tipo de materiais que o material do coletor pode ser usado aqui, simplesmente estes materiais tendem a ser mais porosos e não colapsáveis sobre vácuo. Finalmente, a fita de vedação é aplicada em torno da periferia exterior da peça, os termopares são colocados com cuidado e selados, e o conjunto final do saco é colocado em torno da parte externa deste conjunto. Os sacos de vácuo podem ser álcool de polivinila, flúorelastômeros, nylon, nylon coextrudado, ou possivelmente materiais baseados em reusáveis, dependendo das temperaturas e das pressões aplicadas. Se furos ocorrem, especialmente em torno do ponto de vácuo, remendos são possíveis de realizar com o emprego de remendos RTVs. Há muitas opções possíveis a respeito do conjunto destas camadas. Às vezes não haverá nenhuma barreira ou as camadas de respiro e uma defesa de resina é empregada para impedir que a resina fique demasiado próximo com possibilidade de obstruir as linhas de vácuo [14.66].

Quando uma autoclave é empregada, um ciclo típico de aquecimento consiste em um aquecimento lento a uma temperatura e pressão determinadas, que iniciam o fluxo da resina, um aquecimento secundário mais elevado, onde está a região de fluxo elevado, um período mais

longo em uma temperatura mais alta, onde o fluxo termine e ocorram as ligações termofixas cruzadas, seguida por um resfriamento lento. Note que estes ciclos podem durar horas [66].

As regras gerais de projeto para todos os métodos do saco são similares. O resultado destes processos é conseguir relações uniformes da resina-fibra e baixos vácuos mantendo a geometria da peça desejada. As seguintes regras são aplicadas:

1. Os cantos e os ângulos agudos devem ser evitados. Estes serão os pontos de concentração de tensão para ambos os materiais assim como para o próprio saco de vácuo. Curvas suaves próximas de 0.187 a 0.5 pol são recomendadas [66].

2. Mudanças bruscas da espessura devem igualmente ser evitadas mudando a espessura suavemente com uma plataforma de cartões espalhados através da mesa tal que cada cartão esteja em contacto com o cartão prévio e o subsequente.

3. Insetos de borracha podem ser empregados quando ocorrerem furos dentro do material. É mais fácil usar insetos quando empregar mantas pré-prontas desde que estes materiais serão menos trespasáveis e mais duros do que telas.

4. A ocorrência de uma ponte pode ser evitada usando as “orelhas” ou aletas mais longas para permitir o saco de mover-se nestas regiões sem puncionar, ou usando insetos de espuma ou de borracha como intensificadores de tensão em um ponto específico. Os intensificadores devem ser colocados em algum lugar entre a película de barreira e o conjunto do saco.

5. Como mencionado com outros métodos de moldes abertos, placas de sacrifício podem igualmente ser aplicadas como intensificador de tensão e como meios de conseguir uma superfície interna mais lisa longe do molde [66-70].

É imperativo com estes processos conseguir uma boa selagem. Os escapes ocorrem predominantemente na interface entre o saco e a linha de vácuo. Cuidado apropriado deve ser tomado para obter o fluxo da resina ao batente, como no caso das contenções, ou ser contido, como com barreiras de resina. As linhas de vácuo devem ser verificadas para ver se há pontos de resina e de pegas sempre que o vácuo é insuficiente, e o projeto inicial destas linhas para evitar as grandes alterações de pressão associadas com a perda de pressão em torno das curvas, dos encaixes, ou de um comprimento longo do tubo à bomba de vácuo [14.66]. As peças terminadas precisam frequentemente ser aparadas. Isto é realizado manualmente ou através dos roteadores de robôs, jatos de água, e em lasers de alta gama. Os furos podem ser realizados usando métodos normais.

A vantagem principal desta técnica é a remoção automática de vazios com as linhas de vácuo, os índices de vazios menores que são possíveis com esta técnica comparada a outros métodos de molde aberto, e a grande capacidade do tamanho da peça. As desvantagens residem em qualidade de superfície mais pobre das peças comparadas aos processos de molde fechado, custos muito elevados do processo de autoclave (quando usado), tempos de ciclos longos, e a possibilidade distinta que as peças grossas exigirão múltiplos ciclos para obter os níveis desejados de níveis de porosidade/força [14].

7.2.3 Métodos de moldes fechados

7.2.3.1 Moldagem com transferência da resina

A moldagem com transferência da resina (RTM) é um processo de baixa pressão que envolve injetar uma resina termofixa de baixa viscosidade em uma cavidade fechada que contém pré-formas fibrosas. Médias a grandes peças, incluindo cascos de barco, as peças automotivas, peças de caminhão, assentos, saunas, boxes de banho, e banheiras, são aplicações típicas. O maior obstáculo a superar é dividir uniformemente a resina injetada para evitar seções não impregnadas, com índices elevados de resina, e com aprisionamento de ar. Quando feito corretamente, índices elevados de fibra de 50 a 60% foram conseguidos com esta técnica. Idealmente, a resina pode rapidamente ser dividida em toda a peça com um sistema múltiplo, e então a resina enche o molde de tal forma que o volume ou a área livre de resina da peça vai sendo diminuída constantemente. Desta maneira força o ar do molde simetricamente, tal que a última seção da peça é preenchida através de um respiro ou vácuo. A RTM assistida á vácuo (VARTM) pode ser muito benéfica em fazer fluir a resina através da peça e em remover a bolsa de ar. A figura 8.11 mostra os detalhes essenciais [14.49.68.71.72].

A pré-forma é obtida combinando manualmente as mantas contínuas ou picados de desbaste, pulverizando com *roving* para dar forma a uma pré-forma, ou melhor ainda, pulverizando fibras e resina em uma tela que utilize vácuo. Para evitar linhas potenciais de solda da malha, a execução deve preencher o molde inteiro, e devido ao seu volume, deve permanecer estacionária enquanto a resina preenche a peça. Há três métodos para criar uma pré-forma. O método mais primitivo é montar à mão e opcionalmente o conjunto inteiro montado entre si. Este método tem o inconveniente de um tempo de ciclo mais elevado e de uma menor uniformidade do que é possível com outros métodos. Um avanço deste método é usar o método direto da fibra, onde os *rovings* picados e a pasta são pulverizados na pré-forma. O terceiro método envolve usar

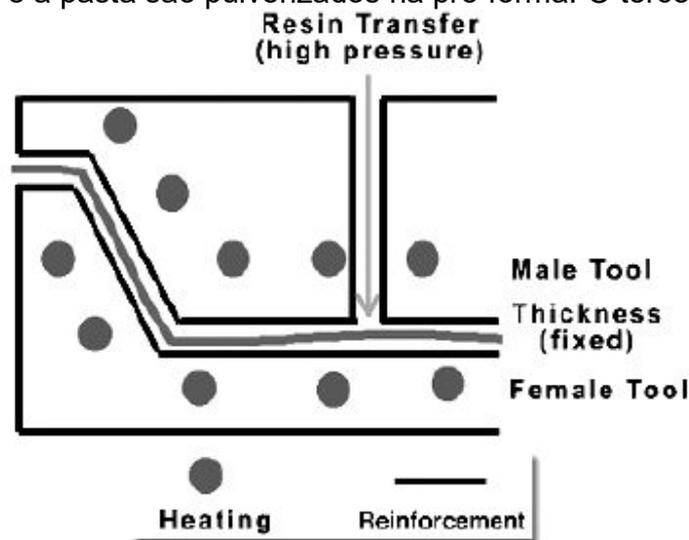


FIGURE 8.11 RTM process in operation. (Courtesy of Owens Corning. Used with permission.)

um forro onde as fibras sejam desbastadas e a resina ou o pó sejam pulverizados em uma estrutura que prenda o conjunto no lugar com vácuo. Ambos os métodos diretos da fibra e do forro podem ser feitos com robôs para ganhar tempo e conseguir a melhor uniformidade da pré-forma [14.49]. A figura 8.12 mostra um processo típico do forro, o processo P4, em operação. As

mesmas regras do porque uma tela em particular é empregada e de porque a orientação das telas deve ter camadas dispostas simetricamente aplicam-se a RTM.

A viscosidade da resina deve estar em 1 Pa.s ou menos durante o processo de moldagem, visto que a vida da resina é razoavelmente rápida (2 horas ou menos) reduzindo o ciclo de moldagem. Devido às baixas viscosidades empregadas, os materiais termoplásticos inteiramente polimerizados são pouco suscetíveis de serem empregados em RTM. Somente os termoplásticos pré-polimerizados tal como o tereftalato poli-cíclico de butileno ou os termoplásticos polimerizados *in situ* são passíveis de uso. O poliéster, o poliuretano, e as resinas de epóxi são geralmente empregadas. Os desmoldantes devem ser aplicados inicialmente para a boa liberação da peça. Se uma boa aparência exterior é desejável, um revestimento de gel deve ser adicionado antes da adição dos materiais restantes [14.49.68.71.72].

De uma perspectiva do ferramental, o processo de RTM ou de VARTM são processos a baixa pressão que exigem uma matriz de molde fundida equipada opcionalmente com um sistema de vácuo. Desde que o equipamento de moldagem por compressão não é utilizado, é mais barato do que o processo de SMC/BMC. Os moldes feitos fora do ferramental de compósitos não são raros. A utilização de ferramentas e os critérios dimensionais discutidos na seção de moldes são aplicáveis aqui. Se os métodos opcionais de vácuo devem ser empregados, a borda exterior do molde deve utilizar um anel-O para selar firmemente o molde de encontro às ligações de ar. O método de bombeamento da resina deve empregar uma válvula única ao contrário da válvula múltipla para uma manutenção mais fácil e para evitar erros operacionais [14.49].

As principais vantagens deste método são a facilidade da operação diária, tempos de ciclo mais rápidos do que o revestimento manual de camadas se os métodos não manuais da pré-forma são empregados, boa qualidade de superfície comparada aos métodos de moldes abertos, a baixa exposição aos produtos químicos, e os comprimentos longos da fibra comparados às operações de SMC/BMC. As desvantagens deste método são a necessidade de ter artesão hábil de molde e áreas ricas de resina nos reforços e parcelas exteriores do molde [14.49].

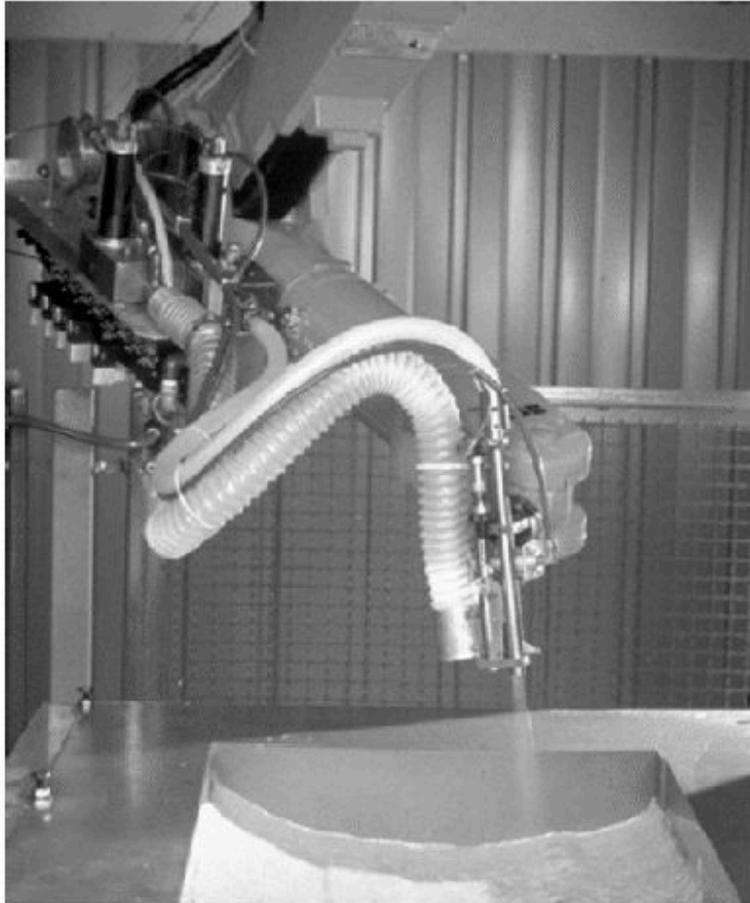


FIGURE 8.12 Plenum preform method (Owens Corning's P4 process). (Courtesy of Owens Corning. Used with permission.)

7.2.3.2 Moldagem de lamina compósita

O processo de moldagem de lamina compósita produz as peças de melhor aparência que a indústria de compósitos pode oferecer. As peças produzidas com esta técnica encontram uso pesado nas peças automotivas de classe A tais como capas, portas, colunas, e nos artigos caseiros tais como banheiras, misturadores, chuveiros, acessórios, componentes eletrônicos, e máquinas de negócio. As fibras longas presentes nestes materiais fornecem boa resistência de rigidez e ao impacto [73.74].

Este processo começa formando uma lamina de uma massa. A entrada de *roving* é picada em um comprimento de 0.75 a 2 pol., embora não haja realmente nenhuma razão para a entrada da esteira, outra que não os aspectos de fluxo, pode não ser usada, assim como a entrada de picado ou não, junto com cargas, aditivos de baixo perfil, catalisadores, DAE (dispositivo automático de entrada) de catalisador, e uma resina termofixa, normalmente resinas termofixas em base poliéster, ou possivelmente de epóxi e de éster vinílico são usadas. Este conjunto é comprimido então entre uma série de rolos para consolidação da resina em meio ao reforço. A pasta inicial tem uma viscosidade perto da escala 40.000 a 100.000 cP. A figura 8.13 indica os fundamentos do processo de fabricação da lamina de SMC, e a tabela 8.7 fornece detalhes rudimentares da formulação. O *roving* deve ser uniformemente distribuído entre duas folhas plásticas de correias de polietileno que são carregadas com o pacote químico termofixo. Uma

ligeira alteração deste processo pode ser usada para criar uma moldagem espessa de compósito (TMC). Nesta o *roving* e a pasta são misturadas junto intermitentemente com um estreitamento adiantado, e uma lamina muito espessa pode ser criada. Se é SMC ou TMC, o material deste processo então é deixado em um pacote e colocado em armazenagem por 1 a 2 dias até a cura da resina ao estágio B. O espessamento durante este período de tempo é ajudado geralmente com aditivos tais como o óxido de magnésio, o hidróxido de magnésio, ou o hidróxido de cálcio para conseguir viscosidades do estágio B na escala de 60.000 a 750.000 poise. O adequado material do estágio B é então repousado no tempo certo, pré-pesado, e colocado em um molde aquecido (250 a 350°F) de compressão, sob pressão (500 a 2500 lb/pol²) formando uma peça compósita que pode subseqüentemente ser pintada para criar a qualidade de superfície desejada. Há igualmente tecnologia recente que usa mais baixas temperaturas e pressões conseguindo ciclos mais rápidos da peça. Os tempos de ciclo típicos da moldagem de compressão de 30 segundos a diversos minutos são possíveis, com as peças mais espessas exigindo maior tempo de cura [14.68.74.75]. Um instrumento típico da moldagem por compressão é mostrado na figura 8.14.

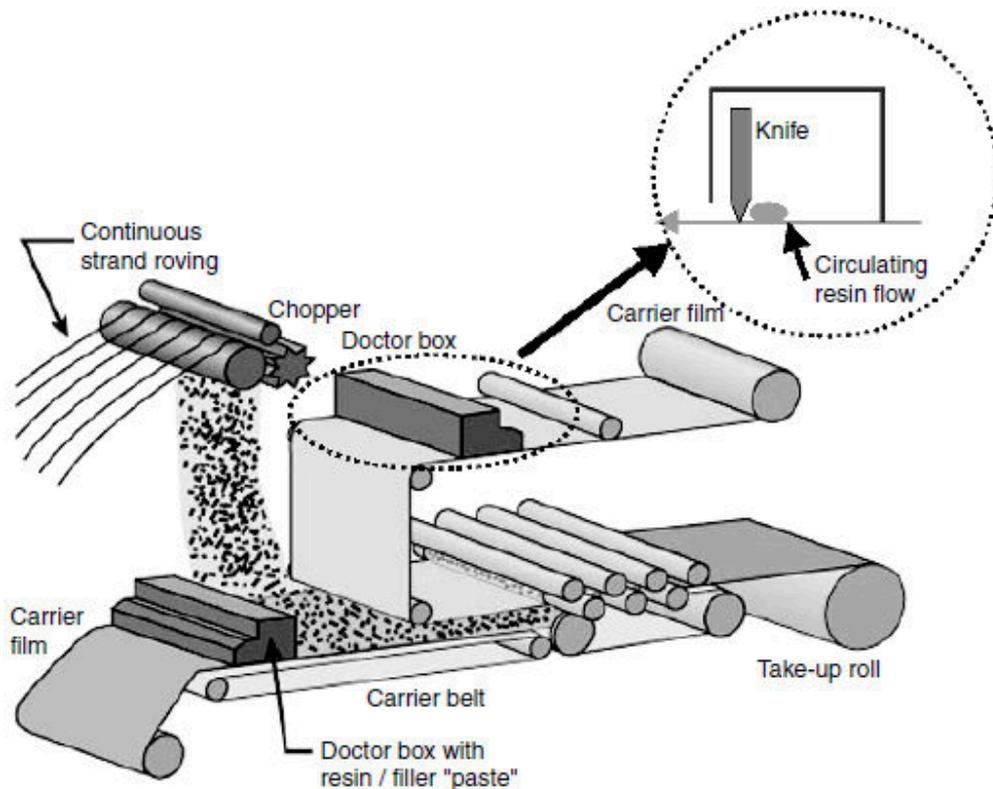


FIGURE 8.13 Sheet molding compound (SMC) process. (Courtesy of Owens Corning. Used with permission.)

Os aditivos de baixo perfil (LPAs) são uma parte integrante da tecnologia de SMC. Se a formulação não contém este ingrediente, é virtualmente impossível conseguir as peças automotrizes da classe A através das leituras do medidor de aspereza. Sem o uso de um aditivo de baixo perfil ou do aditivo de baixa contração, as resinas termofixas de poliéster encolhem na ordem de 7%. LPAs típicos são feitos de metacrilato de polimetil, de poliuretanos, de policaprolactonas, ou, em particular, do acetato de polivinila com funcionalidade ácida de 1%. É

importante que o LPA não seja inteiramente compatível com a resina de poliéster tais que a separação de fase ocorre, mas compatível o bastante para evitar as diferenças enormes do domínio [74].

TABLE 8.7 Rudimentary SMC Formulation

| Material | Percentage (%) |
|--------------------------------------|--------------------|
| Resin (typically, polyester) | 25–30 |
| Fibers (typically, glass) | 25–30 ^a |
| Fillers (CaCO ₃ , ATH) | 40–50 |
| Other (LPAs, initiators, thickeners) | 3–5 |

^aStructural parts will use more fiberglass, which results in less surface quality but more structural performance.

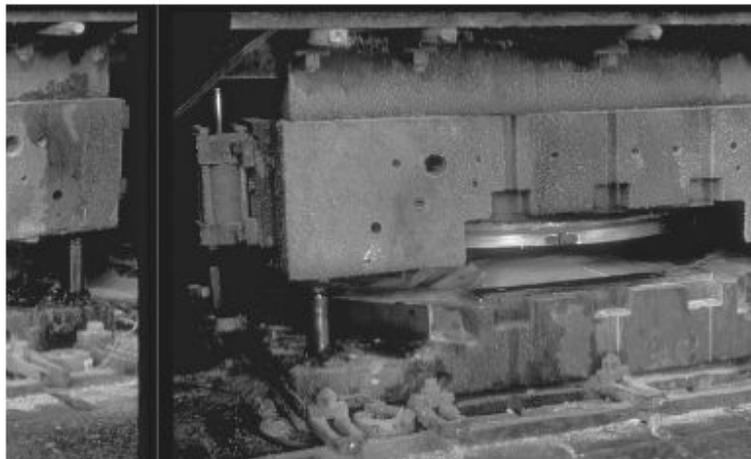


FIGURE 8.14 Compression molding operation. (Courtesy of Owens Corning. Used with permission.)

Uma consideração importante é a habilidade de preencher o molde com alguns espaços em branco bem situados. Na maioria das vezes, os espaços em branco são colocados no centro de um molde aquecido e o fluxo ocorre externamente para preencher a peça. Se o *roving* contínuo e/ou fundido são usados, as fibras contínuas não fluirão tão bem quanto os picados de *rovings* desbastados e os tamanhos em branco iniciais terão que ter maior cobertura do molde ou ser colocados proposadamente na peça onde o realce estrutural adicional é necessário. É facilmente possível funcionar com alterações da viscosidade com SMC. A baixa viscosidade resulta em menos fluxo de vidro e as peças com uma elevada fração de resina na região periférica. O oposto, com elevada viscosidade, pode facilmente conduzir às peças não preenchidas. Claramente, o comprimento da fibra, a mistura apropriada da formulação da resina, o controle de temperatura durante o armazenamento, e o controle dos estágios são aspectos importantes do processo. Quando na dúvida, diversos programas existem, como Cadpress², que podem fornecer predições teóricas para o fluxo de moldagem, o tempo de ciclo, e a orientação da fibra [76].

² Cadpress é uma marca registrada do Madison Group.

Há dois defeitos muito comuns associados com o SMC: empolar e bolhas de pintura. Para evitar empolar, os materiais de SMC devem permanecer em um ambiente com umidade controlada, razoavelmente seco antes da moldagem, e a peça formada deve ser curada suficientemente em toda sua extensão. A desuniformidade da temperatura pode promover a formação de bolhas. O defeito temido de bolhas de pintura ocorre durante processos de pintura secundários. Estes são tipicamente devido a um gás aprisionado, se ar, água, ou solvente, aquecendo-se, e eventualmente, devido à pressão mais elevada, quebrando o material circunvizinho para dar forma a uma bolha. Uma maneira para minimizar este defeito é tentar fornecer caminhos para o que gás seja emanado. Uma segunda alternativa é aplicar o revestimento no molde ou uma película de revestimento no molde sobre a peça original de SMC durante a etapa da compressão de SMC. O problema com o método da película é que a peça não pode ter demasiada estrutura tridimensional (por exemplo, valos profundos, reforços profundos) ou a película do revestimento não moldara bem sobre a superfície da peça. Bolhas de pintura podem ser removidas com remendo posterior, mas este é um processo secundário que deve ser minimizado [14.77].

Em resumo, SMC tem algumas vantagens sempre que as grandes peças de níveis de qualidade de superfície elevados são exigidas. As desvantagens principais são a limitação elevada do custo de investimento e do tamanho da peça comparada a moldagem por vácuo ou a aplicação manual de camadas.

7.2.3.3 Moldagem de compósitos em bruto ou em massa

A moldagem de compósitos em bruto (BMC) ou em massa (DMC) empregam um processo um tanto similar a SMC, salvo que o material da entrada vêm de um extrudado que contém, 5 a 10% menos fibra com comprimentos mais curtos da fibra que variam de 0.125 a 0.5 pol. O extrudado pode ser feito no local ou ser comprado de um produtor de compósitos de BMC. As figuras 8.15 e 8.16 indicam misturadores de BMC e os equipamentos típicos de moldagem. Como com SMC, ao extrudado é permitido prosseguir ao estágio B e colocá-lo então em um molde quente de compressão, ou pode ser moldado por injeção. As temperaturas típicas do molde funcionam de 250 a 350°F com pressões de 350 a 2500 lb/pol². Os tempos de ciclo de 30 segundos a diversos minutos são possíveis, dependendo da espessura final da peça, com espessuras maiores que exigem mais tempo de cura ou de interrupção. As mesmas introduções do controle da viscosidade aplicam-se do SMC junto com a necessidade de evitar a absorção de água, que conduzirá a ondas ou a empolamento em um caso extremo. As peças típicas consistem nos gabinetes elétricos, gabinetes de dispositivos, e nos gabinetes de condicionadores de ar [5.14.68].

As principais vantagens do processo de BMC combinam com aquelas do processo de SMC: taxas de produção elevadas, baixo nível de habilidade laborial, e aparência excelente da peça. As desvantagens principais desta técnica são custos de investimento elevados combinados com as limitações do tamanho da peça. A técnica BMC igualmente tem a desvantagem adicionada de menos índice de fibra em um comprimento mais baixo da fibra de vidro tais que o desempenho mecânico de uma peça de BMC será inferior àquele de uma peça de SMC [14].



FIGURE 8.15 Typical BMC mixer. (Courtesy of Owens Corning. Used with permission.)

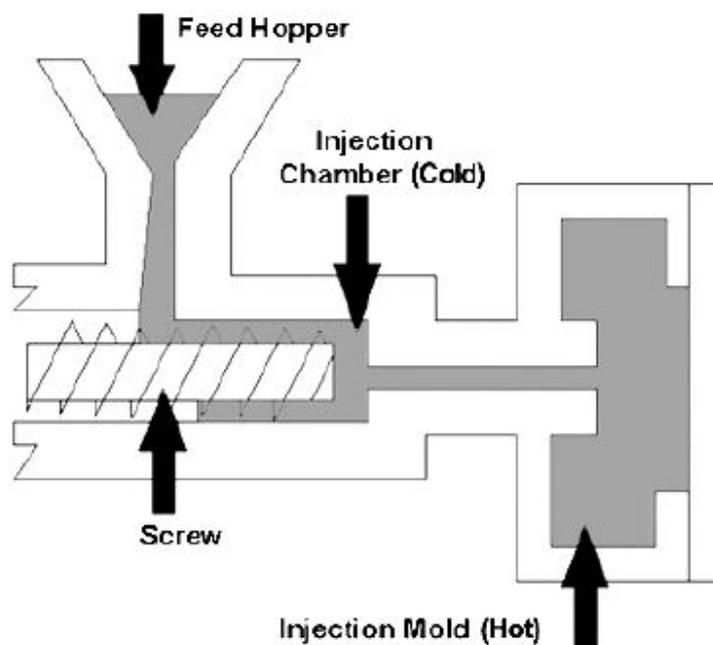


FIGURE 8.16 Typical thermoset or BMC injection molding. (Courtesy of Owens Corning. Used with permission.)

7.2.3.4 Termoplásticos fundido com vidro

Os termoplásticos fundidos com vidro (GMT) são as contrapartes termoplásticas do processo de moldagem de laminas compostas. Os blocos, que são formados com um processo termoplástico prévio de laminação, são pré-aquecidos com diversos fornos intercalados, colocados em um molde frio, e então moldados por compressão formando uma moldagem de compressão bidimensional da peça. A desvantagem principal do GMT comparada a LFT é a uniformidade da fibra, quando as vantagens principais residem do comprimento de vidro mais longo, que fornece resistência ao impacto e rigidez adicionada. A grande maioria de materiais do GMT é formada das estratificações do polipropileno-vidro que empregam alimentação contínua aleatória, alimentação unidirecional de fibra de vidro, alimentação de fibra curta picada úmida, materiais tecidos, ou fibras trançadas. A rigidez e a energia adicionada para o impacto de um

produto longo de fibra de polipropileno são difíceis de combinar com todos os outros materiais. A aplicação mais famosa do GMT é para amortecedores automotivos. Outras aplicações conhecidas incluem tabelas de basquetebol, consoles automotivos, os módulos de portas automotivas, as linhas, as varas de hóquei, os *snowboards*, as portas, e outros artigos relativamente lisos [41.43.45.78.79].

O GMT começa pré-aquecendo blocos com uns três ou quatro fornos de infravermelho ou fornos de circulação de ar quente. Os blocos amolecem e tornam-se “fluidos” na operação subsequente de moldagem por compressão. Durante a etapa do pré-aquecimento é importante que temperaturas uniformes sejam conseguidas em todo o bloco. Uma técnica usada normalmente para este objetivo é regular uma zona final ligeiramente mais fresca de forno tal que o exterior quente do bloco resfriará devido ao ar circunvizinho mais frio e aquecerá o centro mais fresco do bloco. As temperaturas típicas do bloco devem alcançar a escala de 200 a 230°C. Os blocos quentes devem ser transferidos rapidamente à máquina de moldagem por compressão. Transferências lentas podem facilmente conduzir a peças não preenchidas desde que a viscosidade deste material se elevará rapidamente com o termoplástico começando a se cristalizar ou solidificar [45.80].

A colocação em bloco dentro de um molde de compressão é crítica. A menos que for desejável preencher um reforço, os blocos nunca devem ser colocados lado a lado. Isto conduzirá a uma linha de solda que poderia facilmente ser evitada usando um tamanho de bloco maior. Os tamanhos de bloco iniciais cobrem tipicamente 80% do molde. O tipo de bloco deve ser baseado nas forças mecânicas ou em outras influências da parte externa na peça final. Se fortes propriedades são necessárias em um sentido dado, as fibras unidirecionais podem ser exigidas, mas se uma peça precisa conter fibras em um reforço fino, uma versão picada mais curta é uma escolha melhor desde que as versões picadas de fibra fluirão melhor do que as versões contínuas [80].

As máquinas de moldagem são ajustadas normalmente de 25 a 70°C com pressões de 10 a 14MPa [45]. A taxa de fechamento está na faixa de aproximadamente 900 mm/s no fechamento rápido e de 30 a 70 mm/s para a velocidade real de compressão da peça [81]. Temperaturas mais baixas do molde são associadas normalmente com os tempos de ciclo mais rápidos. Os tempos de ciclo de 20 segundos a diversos minutos não são raros. Muitas das características essenciais da moldagem foram descritas anteriormente na matriz de molde fundido. As linhas da solda ou da malha devem ser evitadas providenciando furos ou adicionando insertos durante operações secundárias a menos que a peça possa suportar aos esforços críticos com uma linha de solda bem situada.

Há diversos defeitos comuns que merecem cuidado no processo do GMT. O empolamento ou as bolhas podem ocorrer, mas ao contrário do processo de SMC, estas não são absolutamente devido à umidade. São devido a concentração de pontos quentes (projeto de resfriamento impróprio) ou devido à tentativa de remover a peça do molde antes da cristalização ou da solidificação termoplástica, especialmente nas seções mais espessas do molde. A solução a este problema é prolongar a estadia de resfriamento ou remodelar a seção de resfriamento do molde. Um segundo problema comum com GMT é um índice mais elevado da resina nos reforços ou na periferia exterior da peça. Fibras mais longas contínuas fluirão menos do que suas contrapartes de fibra picadas. Há ocasiões quando a alternativa picada deve ser empregada ou em que um carregamento híbrido será usado, com os materiais mais contínuos no centro de uma entrada empilhada em bloco e das fibras picadas para a parte externa. Uma terceira edição comum é a

pós pintura. Se isto é desejado, o material deve ser tratado com chama (flambagem), tratamento corona, ou outros métodos de aumentar a energia de superfície do material antes da pintura ou de aplicar a decoração. A tecnologia do revestimento dentro do molde pode ser usada para as peças que não têm extração pesada ou reforços. A quarta edição no que diz respeito ao GMT é de haver cuidados com a contração e o rasgamento da peça. O polipropileno é um termoplástico altamente cristalino que pode se submeter a grandes contrações. A única maneira de abrandar esta influência é ter dispositivos perto do molde que forcem o resfriamento para manter a forma desejada final às custas de ter tensões internas mais elevadas [45.78-80].

7.2.3.5 Fibra longa termoplástica ou fibra longa direta

Processos Termoplásticos

Os compósitos termoplásticos de fibra longa (LFT) representam um segmento de negócio de compósitos termoplásticos crescente onde (1) fibras longas de *pellets* ou (2) *rovings* combinados com os *pellets* plásticos são usados para criar peças de moldagem por injeção ou por compressão com uns comprimentos mais longos da fibra. Estes métodos diferem do GMT tendo em vista que o material de partida vem dos *pellets* de fibras longas pultrusadas ou diretamente de uma combinação de *pellets* termoplásticos e de reforços fibrosos. As resinas termoplásticas incluem o polipropileno, várias resinas de nylon, poliftalamida, acetal, poliuretano, e os poliésteres termoplásticos (PET/PBT), para nomear alguns. As entradas da fibra são na maior parte *rovings* de fibra de vidro seguidas pela fibra do carbono, por fibras naturais, e pelo aço inoxidável (o aço inoxidável é usado na maior parte pelas propriedades elétricas). O valor do comprimento da fibra reside nas combinações originais de maior resistência de rigidez e de impacto que são inatingíveis em materiais normais termoplásticos do mesmo *grade* de extrusão da mesma matriz de material.

As propriedades mecânicas de LFT são muito dependentes dos métodos de processamento, da espessura da peça, do projeto da porta, das variáveis da moldagem por injeção, e mesmo do próprio equipamento de moldagem por injeção. Em todos os casos, preservar o comprimento da fibra é absolutamente crítico em conseguir o melhor desempenho. A maneira mais rápida de verificar a retenção do comprimento da fibra é queimar uma peça moldada e observar se uma estrutura de esqueleto permanece. Se a peça original se torna pó, que é um erro comum ao aplicar esta tecnologia, ou se não pode ser manuseada sem se desintegrar, a seguinte lista de verificação rápida deve ser consultada [82]:

1. Use uma rosca com relação de compressão de 2: 1 a 2.5: 1 combinada com uma ponteira de fluxo livre.
2. Empregue um bico curto, um orifício de bico mínimo de 8 milímetros, e um orifício de canal de 9mm.
3. Evite a ruptura da fibra usando portas grandes com pelo menos dois terços da espessura da peça, evitando curvaturas de 90°, alimentando na posição mais espessa da peça, e usando canais ampliados.
4. Evite a ruptura da fibra ajustando velocidades da rosca sob 60 RPM com contrapressões de 3.5 bar.

5. Ajuste as temperaturas do molde mais elevadas do que para *grades* de compósitos para obter uma lubrificação adicional da resina.

6. Empregue suficientes tempo e pressão de recalque para reduzir vácuos e marcas da pele.

Embora a moldagem por injeção seja o método de formação principal, há uma variedade de outras maneiras, incluindo a moldagem por injeção e compressão, onde um lingote fibroso inicialmente é injetado em uma cavidade parcialmente aberta e moldado [82.83]; moldagem de espuma estrutural, onde os agentes de sopro são adicionados para criar uma estrutura compósita espumosa [82]; moldagem por injeção assistida a gás, que é usada para criar as peças compósitas ocas [82.84]; e moldagem por extrusão e compressão, que é uma variação da moldagem de compressão da técnica de injeção e compressão [82]. Muitas destas técnicas, particularmente a moldagem de compressão de um lingote fibroso, podem alternativamente ser feitas com as técnicas termoplásticas da fibra longa direta (DLFT) [85].

As propriedades mecânicas da fibra longa são naturalmente difíceis de medir, tendo em vista que a caracterização mecânica em cada seção do molde é uma consequência do comprimento da fibra (tenha cuidado com todo o estudo que não medir o comprimento da fibra na peça final) e das orientações da fibra na estrutura da pele e do núcleo, onde as fibras da pele são alinhadas no sentido de fluxo e as fibras do núcleo são alinhadas transversalmente. As propriedades mecânicas são dependentes da espessura da peça, do tempo de preenchimento do molde, da temperatura da parede, e dos campos de fluxo divergentes e convergentes, para nomear alguns parâmetros [82.86-88]. Desde que as propriedades mecânicas variam através da peça, os protótipos devem sempre ser testados suficientemente antes da introdução do mercado.

O principal ponto fraco de materiais de LFT ocorre onde existe a linha de solda. Ou a peça deve ser projetada colocando estes pontos fracos em áreas não críticas, ou um equipamento especial pode ser usado para vibrar para frente e para trás as partes dianteiras do fluxo para migrar as fibras através da solda. As linhas de solda são uma consideração integral do projeto que não podem ser ignoradas [80].

O período de projeto e teste podem ser reduzidos através dos modelos dinâmicos de fluidos que são capazes de prever como o molde se preenche, onde as linhas de solda ocorrem, e a distribuição áspera da orientação da fibra das camadas da pele e do núcleo nas peças moldadas [89-92]. A pele tem sempre as fibras situadas no sentido de enchimento do molde, visto que o núcleo tem as fibras orientadas no sentido transversal. Isto ocorre devido aos fenômenos de enchimento da fonte de fluxo e as características de resfriamento e de viscosidade [46]. Os projetos inteligentes de peça aproveitam-se da previsão da orientação da fibra para projetar o molde e as partes dianteiras do fluxo para o melhor desempenho da peça. Quando estas técnicas são tomadas em consideração com os critérios descritos anteriormente, o tempo para comercialização pode ser reduzido significativamente.

De uma perspectiva histórica e do mercado, a fibra longa termoplástica e mais recentemente, tecnologias termoplásticas da fibra longa direta vem trilhando um caminho longo desde os anos 60, quando Wilson Fiberfil introduziu concentrados de fio revestidos à comunidade de moldagem por injeção. Os produtos de fio revestidos mal impregnados antigos não conseguiram o desempenho mecânico que é possível impregnando polímeros fundidos nos *rovings*. A PCI (agora Ticona/Celstran³) e a ICI (agora LNP/Verton⁴) descobriram que passando os *rovings* em torno de “propagadores de aquecimento” era possível impregnar os *rovings* com um

termoplástico fundido [93]. Algumas das patentes originais de compósitos impediram que muitos concorrentes incorporassem a tecnologia, mas com a expiração destas patentes, a LFT tornou-se cada vez mais popular e segmentada. Um número de companhias juntaram-se a Ticona e a LNP, incluindo Sabic, Montech Technologies, RTP, Neste, Vetrotex, e CPI, para nomear alguns [94]. Diversas companhias, tais como Baycomp, obtiveram uma técnica da impregnação do pó para conseguir pellets de fibras longas; entretanto, o custo de obter um pó fino restringiu esta rota com alguns sistemas de resinas.

Com o crescimento desta indústria, um número de fabricantes de equipamentos desenvolveu o equipamento próprio para manusear os *rovings* e os pellets de resina para criar diretamente compósitos de DLFT. Estes métodos eliminam eficazmente a etapa de composição média em troca do investimento em equipamento e da complexidade operacional. As vantagens de DLFT incluem uma única história de calor e possivelmente uma poupança em custos a longo prazo [95]. Dependendo do volume da peça, pode ser de valor considerar o investimento no equipamento para conservar os custos com a matéria-prima. As companhias tais como Lawton, Woodshed DLFT, Krauss Maffei, Husky, Coperion, e Berstorff desenvolveram o equipamento apropriado para o DLFT. O conceito é o de usar uma extrusora própria e/ou rolos convergentes para puxar os *rovings* na extrusora, cortar as fibras, espalhar e misturar as fibras cortadas com a resina termoplástica fundida, liberar todo o vapor (ar arrastado ou umidade que entra com o *roving*), e forçar o material em uma máquina de moldagem por injeção ou, opcionalmente, criar uma carga quente para aplicações de moldagem por compressão.

³ Celstran é marca registrada de Ticona GmbH, Germany.

⁴ Verton é marca registrada de LNP Engineering Plastics/General Electric.

Aproximadamente 90% destes materiais encontram sua aplicação na indústria automotiva; o restante ocorre para o gramado e a jardinagem, a indústria naval, esportes, engrenagens, e as aplicações da construção civil. As aplicações automotivas típicas incluem os painéis de instrumento, partes frontais técnicas, faróis, isolamentos térmicos, bandeja da bateria, sistemas da porta, assoalhos de carga, e estruturas de assento, para nomear alguns [96]. Com toda a tecnologia dos equipamentos recentes nesta área, é um tanto surpreendente que 90% do negócio permanece sob a forma de pellets compostos diretos, com o 10% remanescente dirigido para DLFT em aplicações automotivas de grande volume. O caminho mais econômico para as peças de grande volume permanece aberta ao debate, com a introdução de pellets super concentrados em vidro de 70 a de 75% [94.97.98]. O tempo dirá que caminho tomará o mercado.

7.3 OUTROS PROCESSOS DE COMPÓSITOS

7.3.1 Laminação

Os processos de laminação intermitentemente combinam/aderem diversos materiais de entrada em um único material na saída. Estes processos empregam baixos pontos de pressão como os encontrados em um único estreitamento quente, ou em estreitamentos quentes consecutivos, ou em um laminador de Meyer, que consiste em uma correia dupla contínua envolvida em torno de diversas seções aquecidas de estreitamento, ou eles podem empregar alta pressão como encontrado nas pressões contínuas de correia dupla que aplica a pressão em pontos pequenos numerosos do rolo (Sandvik) ou em uma forma contínua (Hymenn).

7.3.1.1 Laminação a baixa pressão ou de estreitamento quente

A laminação mais simples combina vários materiais com um único estreitamento quente e frio sucessivos onde uns ou vários dos materiais atuam como um adesivo para ligar junto os materiais restantes. Os estreitamentos são como pontos de pulso de pressão quente para comprimir e consolidar materiais no sentido da espessura. Este método pode ser usado para aderir a superfície de não tecidos reforçadas a outros materiais, para adicionar películas desejadas a outros substratos, ou consolidar compósitos através de uma série sucessiva de estreitamentos com ajustes mais apertados da folga. A figura 8.17 indica a essência de uma operação baixa pressão típica da laminação.

Roismum [22.99.100] fez um excelente trabalho descrevendo os mecânicos de uma operação de estreitamento. Idealmente, ambos os estreitamentos devem ser conduzidos com uma movimentação independente para impedir os rolos de trabalharem um contra o outro devido às diferenças nos seus diâmetros causados geralmente pelo desgaste desigual. Embora seja possível mudar em linha a pressão de estreitamento, com técnicas tais como a mudança da inclinação em um rolo, um rolo menor em um rolo maior, os rolos carregados intermediários, ou os rolos com cruzamento controlados, aplicando a pressão em pontos específicos do rolo, deflexões devem ser minimizadas na maioria das operações. Os materiais do estreitamento podem variar de metais à vários tipos de borrachas, dependendo de quão duramente é o estreitamento desejado combinado com quanto tempo deve durar. Ambos os rolos não devem mostrar diferenças de diâmetro através de sua largura, a menos que o cruzamento seja desejável (TIR = indicação total de leitura), devem ser alinhados sob intervalos regulares no sentido de máquina e no sentido transversal, e devem ser controlados com métodos de controle da folga ou da carga [22.99.100].

As folgas devem ser verificadas regularmente com papel de impressão do estreitamento. Quando a uniformidade do estreitamento está em dúvida, o papel de impressão do estreitamento pode rapidamente resolver a pergunta de se o estreitamento é simples ou tão complicado quanto um laminador de correia dupla [101].

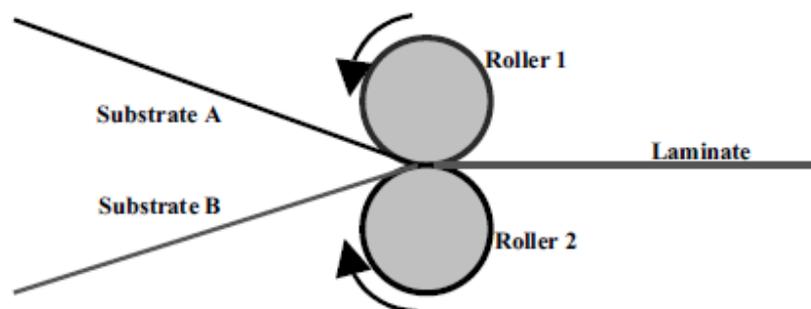


FIGURE 8.17 Low-pressure lamination process.

A onda ou o entrelaçamento são ocorrências comuns da laminação. Qualquer uma delas está relacionada diretamente às diferenças na tensão através da laminação final. Se a onda está relacionada às diferenças dos módulos (não temperatura), é às vezes possível alterar uma das tensões de entrada para combinar as tensões. Se o ajuste das tensões não resolve, torna-se necessário examinar outras variáveis, incluindo a construção do laminado. A equação (8.8) expressa o relacionamento de harmonização da tensão para impedir a onda no sentido cruzado, e a equação (8.9) fornece o relacionamento de harmonização da tensão no sentido da direção da máquina:

$$\frac{T_A}{T_B} = \frac{t_A}{t_B} \frac{E_A}{E_B} \quad (8.8)$$

$$\frac{T_A}{T_B} = \frac{t_A}{t_B} \frac{\nu_B}{\nu_A} \frac{E_A}{E_B} \quad (8.9)$$

onde T_A e a T_B são as tensões dos materiais A e B, respectivamente; t_A e a t_B são a espessura dos materiais A e B, respectivamente; o E_A e o E_B são os módulos dos materiais A e B, respectivamente; e ν_A e ν_B são as relações de Poisson dos materiais A e B, respectivamente. Claramente, o efeito da relação de Poisson pode fazer a laminação não entrelaçada uma tarefa difícil, se não impossível [99]. Talvez a melhor maneira de evitar a indução de materiais entrelaçados é construir estruturas laminadas de uma forma absolutamente simétrica e com orientação equilibrada [80].

De uma perspectiva da segurança, os estreitamentos de elevada pressão devem ter uma resposta da carga máxima tal que um controlador comute ao atingir um determinado valor de carga [12]. Embora este mecanismo proteja o equipamento, a inércia do equipamento é pouco suscetível de abrir ou parar o ponto do estreitamento antes de seriamente ferir um operador retirando um braço. Os operadores devem permanecer afastados do ponto do estreitamento [102.103].

7.3.1.2 Laminação de Termofixos

O painel translúcido ou opaco é feito frequentemente com um processo de laminação de termofixos. Este processo começa de uma maneira muito similar ao método de fabricação de SMC, mas o material é curado agora diretamente através de alguns fornos, ao contrário de um molde do tempo/compressão de armazenamento, para dar forma a um painel liso ou ondulado. *Roving* pode ser adicionado a um ou outro lado desta construção para impedir uma borda falhada e para facilitar o processo final de aparelamento. A corrugação é realizada pela formatação em rolos ou gradualmente conformando o material à forma desejada da corrugação dentro do forno de cura [67.68].

Para impedir esforços residuais ou entrelaçamentos indesejados, é importante que o material esteja curado uniformemente de um lado a outro e que o material seja uniforme na quantidade de resina. Um método de verificar isto é utilizar termopares ao longo da parte superior, do meio, e do lado de baixo do material e de mostrar que ambos os lados do laminado tenham a mesma temperatura [68.80]. Os aditivos de baixo perfil podem ajudar nas ocorrências de minimizar a contração e o empenamento [67.68].

A laminação termofixa igualmente aplica-se à área de laminação decorativa de alta pressão (HPL). Aqui as camadas de papéis tratados com melanina e fenol são combinadas em laminação de alta pressão isobárica de correia dupla para criar artigos decorativos que são usados para decorar bancadas, assoalhos laminados, mobília de escritório, armários, e semelhantes. A camada exterior, geralmente consiste de lamina a prova de desgaste elevado, emprega uma combinação de partículas de melanina e de óxido de alumínio para criar uma camada altamente resistente. Isto é seguido por uma camada de papel impresso e por uma sobre camada de papel de embalagem (Kraft) tratado com fenol para equilibrar a laminação [104-108].

7.3.1.3 Laminação de Termoplásticos

Os blocos de GMT ou os painéis termoplásticos são formados combinando a resina termoplástica na forma de uma película ou como um *hot melt* (massa fundida) através de esteiras reforçadas sob a influência de altas temperaturas e pressões. Isto é realizado espremendo os materiais entre correias duplas quentes. A pressão pode ser aplicada de forma contínua com a pressão de ar (isobárico) [109.110], com uma série de rolos pequenos que fazem o contato entre prensas e as correias duplas (isocórica) [109.111], ou através de pontos descontínuos de estreitamento que são aplicados às correias duplas [112]. A aplicação de sistemas isobáricos ou isocóricos contínuos é absolutamente essencial na realização de impregnação de materiais termoplásticos espessos. Por este motivo, o método de rolos múltiplos (isocórica) ou o método de alta pressão contínuo (isobárico) são recomendados. A vantagem do projeto de rolos isocóricos é a eficiência da transferência térmica desde que rolos metálicos estão sempre fazendo contato entre as prensas quentes e as correias duplas, enquanto isto o laminador isobárico tem a vantagem de uma pressão inteiramente uniforme [80.109-111]. A laminação de GMT ou de painéis termoplásticos deve sempre aplicar a pressão diretamente ao painel consolidado para obter a impregnação completa.

As películas termoplásticas ou as resinas fundidas extrudadas são colocadas acima, abaixo, e entre as esteiras/véus fibrosos bidimensionais. Se as resinas são bombeadas nas correias ou nas esteiras fibrosas, é importante usar uma matriz de extrusão com lábios ajustáveis e também as barras transversais, dispositivos que restringem o fluxo no sentido transversal [113.114]. As esteiras fibrosas podem incluir uma variedade de entradas, incluindo esteiras tecidas, os *rovings* aleatórios rodados que se mantêm unidos com as fibras de vidro, os *rovings* contínuos combinados com um véu ou com redemoinhos aleatórios da esteira, os véus de fibra curta, ou os véus colocados a seco com fibras de meio comprimento tal como o processo de Rando-Webber [80.110]. Os reforços da entrada devem vir em caixas com uma cauda final que está disponível para emendar à caixa seguinte, ou ao equipamento tal como, acumuladores para obter uma operação contínua. O equipamento leve de detecção de defeitos pode ser empregado para encontrar defeitos em todo não desbobinado estoque do rolo [116].

A massa da resina e as entradas fibrosas então são combinadas e passadas por uma zona quente pressurizada. A pressão suficiente deve ser aplicada para obter baixos índices de vazios. Embora as represas da borda possam impedir o escapamento de resinas de fluxo elevado, elas podem ser evitadas, e é importante evitar usar tais altas pressões que a resina de impregnação escape para fora das correias do laminador. As represas da borda têm a vantagem que o escapamento da resina nunca ocorreria às custas possivelmente da atuação como batentes. A manutenção apropriada deve ser executada para manter um perfil liso contínuo com correia lisa, rolos lisos, ou todo outro equipamento que afetar a conformação do material entre as duas correias [80.104]. O papel carbono ou películas especiais podem ser empregados para determinar se o perfil da pressão é verdadeiramente parelho [100.101].

Depois que o material passa na zona quente, é imperativo que seja resfriado uniformemente em ambos os lados durante a seção de resfriamento pressurizada; caso contrário, resultará em empenamento em consequência de um lado que cristaliza-se mais cedo que o outro. A melhor maneira de resolver isto é colocar termopares entre as várias camadas e assegurar-se de que ambos os lados do composto esfriem uniformemente [80]. É igualmente possível obter o empenamento se há resina extra em pontos através da largura; se isto está ocorrendo, o ajuste da matriz será necessário para proporcionar a mesma porcentagem da resina através da largura.

Finalmente, um sistema de medição deve ser usado para verificar rapidamente o peso e a espessura [117]. Isto poupa tempo de ajuste correto dos lábios da matriz. Os laminados produzidos subseqüentemente são usados para aplicações de painéis ou cortados nos tamanhos de blocos desejados para a moldagem por compressão subseqüente de GMT [45].

7.3.1.4 Laminação de espuma

Estruturas de muito pouco peso podem ser formadas com a técnica de laminação de espuma. Ao contrário da laminação termoplástica, onde a pressão deve ser aplicada ao material diretamente, na laminação de espuma a altura é fixa e a espuma expande sob o calor a uma altura determinada. Os materiais típicos tais como o poliuretano ou resinas fenólicas são espumados entre dois substratos de não tecidos tal como véus de fibra de vidro ou CSM para formar os painéis isolantes que são usados na indústria da construção civil [50].

7.3.2 Pultrusão

A pultrusão é a contraparte compósita à extrusão termoplástica. O processo de pultrusão representa um eficiente, de baixo trabalho, e razoavelmente bom processo de velocidade de linha para criar varas de pesca, tacos de golfe, faróis, degraus de escada, martelos, grades de passeios, antenas, marcos de porta, marcos de janela, e hastes de sucção de poços de petróleo, para nomear algumas aplicações. As formas perfiladas são formadas por puxamento de *roving*, esteiras, e/ou por véus através de um banho em termofixo ou em termoplástico fundido quente, impregnando os meios de reforço em torno de pinos para impregnar o *roving*, se os pinos estão em um banho termofixo prévio de resina ou em uma câmara aquecida para materiais de base termoplástica, e então puxando o conjunto impregnado para fora através de uma matriz. A matriz é seguida por uma seção opcional de forno para um material termofixo, por uma seção de resfriamento para artigos pultrudados termoplásticos ou termofixos, por um grande puxador, e então um granulador, se os pellets termoplásticos de fibra longa são desejados, ou uma serra móvel de carvão ou diamante se as grandes peças lineares são desejadas [14.68.118-121].

7.3.2.1 Tecnologia básica de Pultrusão

A tecnologia de pultrusão começa no desbobinador, onde os *rovings*, as esteiras, ou os véus de entrada residem. As embalagens de *rovings* podem vir no formato de bobinado interno ou externo. O bobinado externo oferece a vantagem de desenrolar com torção zero, enquanto que quando desenrolados de dentro das embalagens permitem uma emenda mais fácil (esta é a modalidade normal para produtos de fibra de vidro). Não é raro ter tanto quanto 1200 a 1500 rolos de material no desbobinador ao mesmo tempo, o que força a uma instalação cuidadosa. Quando a entrada vem na forma de rolo, os sistemas de desbobinagem em carrossel são vantajosos em fornecer o suficiente espaço tais que todos os rolos podem ser alcançados sem perturbar o outro. Os desbobinadores são equipados normalmente com alguma forma de controle de tensão e de sistema de orientação para começar o processo de alinhar os materiais na região da pultrusão.

Daqui os meios de reforço fazem contato e arrastam a resina, a maneira exata depende do tipo da resina, em uma região de formação e chegam a matriz de pultrusão. O controle de temperatura cuidadosamente dividido deve existir nesta região para curar as resinas termofixas de modo que evite superaquecer ou para fundir suficientemente resinas termoplásticas para obter boa impregnação. O material passa finalmente na matriz de pultrusão onde é formatado, curado (termofixos), e consolidado. A ascensão na pressão que ocorre arrastando o líquido em uma região mais apertada ajuda a obter a impregnação do reforço para resinas termofixas e termoplásticas. As matrizes devem manter o controle de temperatura uniforme, devem ser muito lisas para impedir qualquer bloqueio dos materiais, e devem ser endurecidas a uma dureza de maior que 70 Rockwell. Ao contrário da extrusão termoplástica, as matrizes de pultrusão são fabricadas exatamente para a forma final da peça. Há pouco inchamento na saída da matriz com o elevado percentual de cargas.

Após ter deixado a matriz, o material é resfriado (termoplástico) ou possivelmente mais aquecido (termofixo) antes de resfriar e de chegar ao puxador. O puxador ideal possui uma velocidade constante e tem normalmente uma correia ou uma série de lagartas que se conformam à forma da estrutura pultrudada. De uma perspectiva de segurança, os puxadores devem ser equipados com os botões e/ou cordas de emergência em sua entrada. É possível perder um braço se estes dispositivos estão ausentes. Além disso, os puxadores devem ser ancorados firmemente no piso. As forças de tensão podem ser elevadas nestes processos, e é muito possível para o puxador se mover sem a ancoragem apropriada.

O material é cortado então a uma forma final desejada através de uma serra móvel. Desde que os materiais compostos empregam frequentemente cargas e fibras abrasivos, os dentes da serra devem ser de carbeto ou diamante. As velocidades típicas da linha de uma pultrusão de termofixo, que está indicada na figura 8.18, é de 2.5 a 3000 cm/min, dependendo do tipo da espessura do pultrudado e da matéria- prima [14.68.80.119.120].

7.3.2.2 Tecnologia de Pultrusão de Termofixos

O grande volume de peças pultrudadas termofixas emprega as resinas não saturadas dos poliésteres seguidas pelo éster fenólico, do vinil, e pelas resinas epóxi. As resinas termofixas são aplicadas tipicamente em um banho de resina. A pré-impregnação das resinas de baixa viscosidade (0.5 a Pa 2•s) é relativamente direta usando mudanças menores de trajeto do rolo, quantidade de química apropriada nos reforços, e possivelmente por agentes de impregnação nas resinas. É vantajoso manter a área do banho de resina razoavelmente fresca ao pré-aquecer os meios de reforço enriquecidos de resina. Há igualmente algumas vantagens em executar a pultrusão vertical tendo em vista que a resina adicional não cairá naturalmente do lado mais baixo do meio de reforço, devido aos efeitos da gravidade. A otimização da velocidade da linha é possível pela utilização de métodos de pré-aquecimento ou de aquecimento tais como a radio frequência (RF) em reforços isolantes tais como o vidro, ou pelo aquecimento de indução em reforços condutores tais como fibras de carbono.

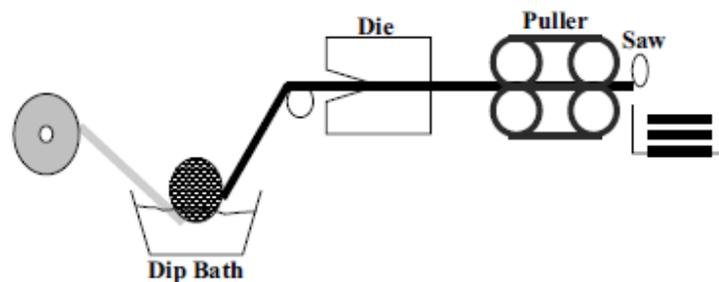


FIGURE 8.18 Typical thermoset pultrusion operation.

O objetivo do pultrusão de termofixos é conseguir uma estrutura quase inteiramente curada bem impregnada (90% curada) desprovida de defeitos da pele queimada ou áspera. A impregnação pode ser uma ocorrência se a reação for demasiado rápida permitindo o fluxo suficientemente arrastado pelo acréscimo da pressão que ocorre com o líquido comprimido na região da matriz. Há algumas incongruências entre o acréscimo da pressão, trazida sobre uma linha de velocidades mais rápidas e o tempo de residência sempre decrescente para que o fluxo ocorra. Em algum ponto ocorre um fluxo insuficiente, e não é possível funcionar mais rapidamente a menos que esforços de pré-aquecimento sejam empregados combinados com os mesmos métodos do perfil de temperaturas, tal como o RF ou o aquecimento de indução.

Os vazios podem ainda aumentar devido ao estireno ou à umidade aprisionada. Houve um tempo que se acreditava ser impossível de funcionar com a pultrusão fenólica, devido à evolução da água ou dos gases, mas depois isso se mostrou possível, os gases são exalados naturalmente da matriz, não causando nenhum problema diferente dos normais de interesse dos VOC (componentes voláteis orgânicos).

A cura deve bem ser controlada. Rápida, extremamente rápida cura causa uma grande exotermia que conduz a pele exterior curar-se prematuramente, visto que o material interior ainda

não está completamente curado. Tal condição, particularmente nas peças espessas, conduzirá às superfícies rachadas e queimadas. Claramente, a temperatura crescente não é frequentemente a resposta a taxas mais rápidas da pultrusão. Ao invés disso, é melhor controlar ajustes de temperatura e uniformidade da temperatura tais que um ponto de gel quase uniforme ocorra perto da saída da matriz. Na pultrusão de termofixos um delicado balanço existe entre a pressão, a taxa de cura, e a contração.

A resina termofixa ideal para a pultrusão expande na aplicação de calor, continua a expandir durante a cura, e então as contrações após a cura estão completas. Expandindo durante toda a etapa da cura, a pressão continuará a subir na matriz conduzindo a uma aparência de superfície uniforme. Os poliésteres não saturados se comportam muito próximos desta maneira, que é o porque deste material ser a resina preferida. As resinas de epóxi, de um lado, tendem a contrair mais cedo do que resinas de poliéster e podem ocasionar em processar insuficiente enchimento se a insuficiente moldagem também ocorre. Controlando a expansão ou a contração de resinas termofixas dentro da matriz, é possível obter controle considerável sobre o processo. As pesquisas mostraram que as forças mais elevadas de tração ocorrem durante o período de tempo de cura tendo em vista que taxas mais elevadas da cura conduzem em baixar as forças de tração.

Por causa das tendências naturais das resinas expandirem, há um acúmulo contínuo de pressão até que a resina sólida contraia na superfície da matriz. Puxando as forças aumentam constantemente durante a pultrusão. No início a força é devido ao arrasto viscoso; então como o líquido se transforma em um sólido, nas ascensões da pressão devido a expansão ou das forças de fricção, e finalmente, os aumentos da força de tração devido aos efeitos de fricção somente [14.68.118-120].

7.3.2.3 Tecnologia de Pultrusão de Termoplásticos

A resina termoplástica mais importante para a pultrusão compósita é o polipropileno seguido por uma variedade de resinas, incluindo o poliuretano, o nylon, o sulfureto de polifenileno, o PMMA, e o ABS [119.120]. Estas resinas oferecem desafios únicos de impregnação no processo de pultrusão. As viscosidades elevadas encontradas nas resinas termoplásticas exigem equipamento especializado de impregnação tal como propagadores cilíndricos, propagadores de cilindro de giro, ou as colisões de espalhamento, combinadas com o pré-aquecimento opcional do *roving*/tela, e ajustes elevados de temperatura de fusão. Os propagadores cilíndricos (pinos) ou as regiões de colisão do propagador são como as regiões de estreitamento da resina, onde a resina arrastada com os meios de reforço começa a ser puxada em uma região apertada do estreitamento, que é onde o envoltório fibroso das mantas em torno dos propagadores, experimentam um aumento na pressão, e penetram então nos meios de reforço. A figura 8.19 captura o essencial da técnica. Se o ângulo ou a tensão do envoltório são grandes o bastante, é possível para os *rovings* ou as esteiras tocarem na superfície curvada, tendo por resultado o potencial dano de abrasão da fibra - o tamanho da carga de vidro possui um papel muito significativo no que diz respeito à extensão do dano. Os aceleradores de impregnação também penalizam com uma tensão mais elevada ou forças de puxamento nos *rovings* ou nas telas. O controle de ângulos do envoltório, a pré-tensão, o número de zonas de impregnação, a quantidade de resina arrastada nas regiões do estreitamento, e outros aspectos geométricos das superfícies curvas todos desempenham um papel [80.114.116.117]. Dois estudos recentes demonstraram a influência de ambos os pinos e matriz na impregnação termoplástica e nas propriedades físicas [121.122].

A pultrusão termoplástica emprega diversos métodos alternativos de introduzir a resina às fibras. O método mais popular envolve criar uma matriz de cabeçote cruzado, onde a resina é bombeada em uma câmara de impregnação antes da saída da matriz. Este método tem a vantagem de que as matérias-primas são alimentadas na sua formulação mais simples, de pellets mais baratos (dependendo do tipo de resina, a formulação em pó pode frequentemente ser mais cara do que a de pellets.) Outros métodos envolvem a entrada pulverizada, que é pulverizada tipicamente sobre uma cama eletrostática, de *rovings* termoplásticos ou fibrosos, ou os métodos de solução onde o termoplástico é dissolvido em um solvente e a tela ou o *roving* são passados neste meio de baixa viscosidade [80.116]. O uso dos panos não é raro nesta tecnologia [120]. O pré-aquecimento pode ser muito vantajoso desde que são muito difíceis as fibras fora de impregnação. Medidas de resfriamento devem ser tomadas para evitar empenar ou a distorção que é causada de uma maneira similar, como discutido na seção da laminação [80.115].

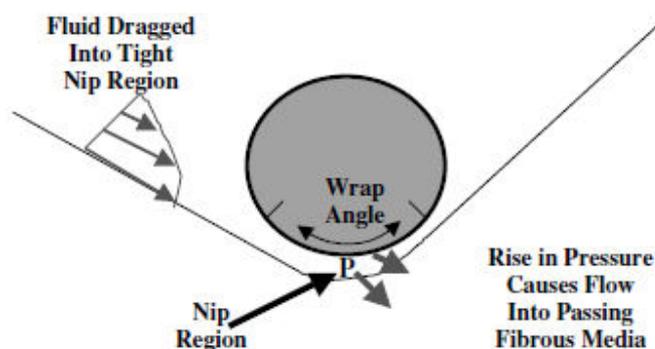


FIGURE 8.19 Thermoplastic resin impregnation around a curved region.

7.3.2.4 Controle de qualidade da pultrusão

O processo de pultrusão é particularmente sensível à densidade linear de *roving* ou ao peso da base das esteiras ou dos véus que o incorporam, especialmente se a matriz é fixa. Os fornecedores destes materiais devem normalmente fornecer as densidades lineares apertadas ou os limites básicos de peso. Dependendo da velocidade da linha, a saída pode ser tão lenta que a área ocupada pela matéria fibrosa está relacionada diretamente à fração de volume deste material e daí a um peso fibroso final. Uma linha de velocidades mais rápidas conduzirá para efeitos de arraste que fazem a relação do índice de fibra depender da geometria e das propriedades reológicas da resina. Desde que as mantas ou os véus se incorporam nesta massa fundida são prováveis observar as diferenças das taxas de cisalhamento através de suas alturas ou larguras, particularmente na pultrusão termoplástica, é importante que a química da cola e da pasta destes materiais evitem as catenárias (isto é, que a manta ou o véu permaneçam um tanto juntos ao contrário do encaminhamento distante sob a aplicação de vários esforços através de sua espessura). O processo deve ser monitorado no que diz respeito aos ajustes de temperatura, forças de puxamento, cura (termofixos), e níveis da impregnação de uma forma contínua para obter o melhor desempenho [80.114].

7.3.2.5 Variações do Processo

O processo de pultrusão de termofixos é favorável a diversas variações notáveis do processo. As peças curvadas são manufaturadas selecionando matrizes de uma maneira curvada para induzir a curvatura da peça. Uma grande peça curvada força o material através das paredes da superfície curvada, tendo por resultado uma peça curvada em grupo da mesma maneira. É igualmente possível alterar a área ou o volume tendo uma matriz flutuante, que permita mudanças simples da área, ou pelo processo de formação por puxamento, onde é possível opcionalmente adicionar o material de BMC e comprimir essencialmente o material ao longo de um dispositivo da moldagem por compressão de câmara múltipla móvel (contínuo), ou de um dispositivo de câmara simples da moldagem por compressão (grupo). Uma adaptação adicional é essencialmente fazer uma combinação de enrolamento do filamento com a pultrusão, denominada enrolamento de tração, para produzir peças como os tubos ocos com resistência melhorada do aro. Neste processo, os filamentos adicionados são colocados em torno de um mandril ou o conjunto prévio da pultrusão antes da obtenção sendo puxado através de uma matriz aquecida [120].

7.3.3 Enrolamento de filamento

Os artigos cilíndricos ocos tais como encanamentos, as embarcações, os tacos de golfe, e os bastões de beisebol, ou artigos esféricos tais como satélites, abóbadas, e outros artigos, são todos formados com enrolamento de filamento. Neste método *rovings* arrastando pasta ou impregnados de pasta, as fitas, ou as correias são envolvidos circunferencialmente em torno de um mandril móvel para criar objetos abertos ou parcialmente fechados como ilustrado na figura 8.20 [14.68.123-125].

A técnica termofixa mais frequentemente empregada é o enrolamento impregnado do filamento. Meios de reforço de torção zero são mergulhados em um banho termofixo, onde a impregnação da pasta ocorre, colocados em um mandril, estacionados em B, e curados. Durante o estágio B o material de enrolamento é mais consolidado acolchoando-o para baixo enquanto é girado continuamente. Neste momento a cura pode ocorrer em um forno normal, sob circunstâncias de vácuo, ou sob pressão e calor de uma autoclave. O enrolamento de filamento termofixo pode igualmente ser realizado com enrolamento impregnado, com os filamentos estacionados B, ou por meio de panos. Quando os precursores estacionados B são empregados, o artigo de enrolamento está imediatamente pronto para curar-se [14.68.125].



FIGURE 8.20 Filament winding apparatus. (Courtesy of Owens Corning. Used with permission.)

O enrolamento de filamento termoplástico, que está em estágios adiantados de desenvolvimento, é muito mais difícil do que o termofixo, devido às viscosidades elevadas da resina. Normalmente, os meios de reforço devem ser pré-impregnados com pó, os filamentos trançados, os métodos de impregnação de fundido, ou os métodos de impregnação com solventes. A maioria destes métodos empregam barras ou colisões de impregnação para dar forma a uma região de estreitamento que faça amassamento do fundido termoplástico espesso no reforço de passagem. Se desejado, o pó parcialmente impregnado ou outras formulações termoplásticas podem ser envolvidos em uma folha termoplástica. As etapas no enrolamento de filamento termoplástico consistem de pré-aquecer os materiais, envolver o reforço sob tensão razoavelmente elevada para impregnar mais a resina, e empregar um rolo de consolidação diretamente na tela de enrolamento para consolidar mais os meios do enrolamento. As baixas tensões e as pressões de estreitamento devem ser evitadas porque no caso dos termoplásticos conseguir a impregnação completa é absolutamente essencial [126-129].

Há essencialmente três técnicas diferentes do enrolamento circunferencial ou enrolamento do aro, um enrolamento helicoidal, e um enrolamento polar. O enrolamento circunferencial ou de aro envolve envolver os materiais em uma única faixa ou no múltiplo que repetem faixas em um ângulo de quase 90° ao mandril. Esta técnica, que é usada para criar os tubos e os artigos de encanamento, exige o mandril girar muito mais rápido do que a ação de atravessamento do ilhós do aplicador. O enrolamento helicoidal segue padrões geodésicos por meio dos quais o padrão do enrolamento seguiria realmente uma linha reta se a superfície do mandril fosse desempacotada e aplainada para fora como uma folha de papel. (O enrolamento circunferencial é realmente um subconjunto da aproximação helicoidal mais geral do enrolamento.) Este método é usado igualmente em artigos tubulares de enrolamento. A última técnica, enrolamento polar, é a única maneira de dar forma a um artigo fechado em uma extremidade do mandril. Este padrão vai literalmente terminar nas extremidades tais que há um ilhós de atravessamento razoavelmente

rápido com um mandril quase estacionário. Porque o meio de envolvimento alcança a extremidade do artigo, o mandril gira rapidamente 180° antes do meio de envolvimento que retorna ao extremo oposto do artigo. Se uma peça exige um movimento do enrolamento fora destes métodos gerais, o envolvimento submeter-se-á ao resvalamento na tentativa de encontrar a linha geodésica mais próxima. O resvalamento pode ser reduzido usando os pinos a determinadas curvaturas da força ou aplicando o material de elevada fricção tal como o silicone para aumentar o coeficiente de fricção da estrutura do enrolamento [14.125].

A colocação da fibra é ajudada mais pelos altos níveis da liberdade que podem existir no enrolamento do filamento. Estes incluem (1) a volta do mandril, (2) ação transversal do filamento que coloca meios no sentido de x, (3) atravessando a ação do filamento que coloca meios no sentido de y, (4) atravessando a ação do filamento que coloca meios no sentido de z, (5) volta do filamento que coloca meios no plano xy, (6) volta do filamento que coloca meios no plano do xz, e (7) na inclinação do mandril. Há literalmente sete maneiras independentes de mover-se e de girar sobre um eixo para obter muitos padrões diferentes de cobertura [125].

Por causa da disposição vasta de ângulos, das técnicas da colocação, e dos graus de liberdade, para não mencionar as propriedades mecânicas desejadas, é necessário quase um perito com um grau avançado para projetar uma peça com equações diferenciais sofisticadas que se levantam. Felizmente, estas edições bem foram estudadas e abordadas através de softwares de computador presentemente disponíveis. Os programas modernos podem fornecer padrões de cobertura, no momento de criar uma peça, condicionamento de cura para evitar os esforços residuais, comprimento do reboque exigido, peso da peça final, espessura da peça final, e assim por diante. Diversos pacotes, que incluem FiberGrafiX⁵, Cadwind⁶, e PatternMaster⁷, existem para executar estas tarefas [130-132].

De uma perspectiva do trabalho feito com ferramentas há uma variedade de mandris que podem ser empregados. Estes incluem os cilindros metálicos reusáveis; mandris dobráveis que vindos distante com alguma desmontagem; mandris solúveis em água, de que contenha normalmente misturas de álcool de polivinila e areia (estes podem ser dissolvidos e removidos de uma extremidade do artigo terminado); mandris dobráveis, que usam a pressão de ar para empurrar firme de encontro ao meio de enrolamento; mandris destrutíveis feitos de emplastro; e mandris do forro interno, que se transformam literalmente em parte do artigo terminado. O método do forro interno é empregado frequentemente nos tanques de contenção [14.125].

As ocorrências típicas que se levantam com enrolamento do filamento envolvem a boa consolidação, baixos esforços residuais, e remoção do mandril. A consolidação melhora com redução da viscosidade, girando o mandril durante a plataforma de B, aplicando a suficiente tensão para consolidar o material durante o enrolamento do filamento, e caso necessário, curar o material sob o vácuo ou circunstâncias pressurizadas. Os esforços residuais levantam-se naturalmente neste processo desde que o mandril pressiona constantemente de encontro ao material envolvido para o controle dimensional e desde que as forças de contração ocorrem das reações termofixas da contração ou da cristalização termoplástica. Os esforços residuais podem ser diminuídos usando um mandril dobrável, de expansão, aplicando perfis de temperatura uniforme, a aproximação curada da camada (onde algo do material é curado antes de adicionar as camadas exteriores), e usando às vezes camadas não homogêneas ou perfis de temperatura incomuns. O último lugar a funcionar no problema, para não mencionar o lugar o mais doloroso para perder uma peça, é durante a remoção do mandril. O método destrutível do emplastro conduz frequentemente à ocasional perda da peça devido ao erro do operador em cinzelar para

fora a peça. Uma segunda fonte de problema ocorre se um atarraxamento é ausente de alguma geometria. É completamente possível para artigos de enrolamento tornar-se literalmente furado a um mandril simples de metal [14.125]. De uma perspectiva do desempenho, todo o local de fabricação deve medir e manter registros na largura recorrida, na tensão recorrida, na viscosidade da resina, na relação da mistura da resina (através de um refratômetro), na cobertura da fibra, na temperatura, e em reforçar o índice de fibra [14]. As mudanças nestes parâmetros alterarão o desempenho da peça.

⁵ FiberGrafiX é marca registrada de Entec Composite Machines/Zoltek.

⁶ Cadwind é marca registrada de Material Belgium.

⁷ PatternMaster é marca registrada de McLean Anderson.

7.4 CONCLUSÕES

É minha esperança sincera que este capítulo coloque ao corrente e equipe profissionais dos novos compósitos à grande variedade de processos compósitos disponíveis hoje. Dependendo das dimensões e dos critérios de desempenho físicos do artigo final desejado, há métodos múltiplos para criar uma peça compósita de módulo elevado que possa ser usada em automotiva, em aeroespacial, na recreação, em áreas industriais. Possam suas peças compósitas sejam duras e bem consolidadas.

RECONHECIMENTOS

O autor reconhece a Owens Corning por fornecer quase todas as figuras; por fornecer revisões úteis com os esforços de Jim Dottavio, Y.M. Lee, Len Adzima, e Bob Schweizer; pelo auxílio legal de Jim Dottavio e de Todd Hall; pelo auxílio de pesquisa de Karen Hettler; e para alguma informação de fundo de custos de Kevin Spoo e Mark Greenwood. Uma quantidade significativa de ajuda foi recebida igualmente de diversos membros da Composite Division of the Society of Plastic Engineers (contate SPE em www.4spe.org para mais informação, e seja você mais um membro!): Klaus Gleich, Enamul Haque, e Tim Simko. Finalmente, os desejos do autor para agradecer sinceramente a sua esposa, Gloria, por tolerar um marido que esteve distante no escritório em muitos fins de semana demais.

REFERENCIAS

1. R. Gachter and H. Muller, *Plastics Additives Handbook*, 3rd ed., Hanser Publishers, New York, 1990, p. 607.
2. Z. W. Wicks, F. N. Jones, and S. P. Pappas, *Organic Coatings: Science and Technology*, Volume 1, *Film Formation, Components, and Appearance*, Wiley, New York, 1992.
3. D. Stoye and W. Freitag, *Resins for Coatings: Chemistry, Properties, and Applications*, Hanser Publishers, New York, 1996.
4. F. A. Cassis and R. C. Talbot, Polyester and vinyl ester resins, Chapter 2 in *Handbook of Composites*, S. T. Peters (editor), Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1998.
5. R. E. Wright, Thermosets, reinforced plastics, and composites, Chapter 2 in *Modern Plastics Handbook*, C. A. Harper (editor), McGraw-Hill, New York, 2000.
6. O. C. Z Ashe and S. H. Goodman, Unsaturated polyester and vinyl ester resins, Chapter 4 in *Handbook of Thermoset Plastics*, S. H. Goodman (editor), Noyes Publications, pp. 97–168.
7. G. Odian, *Principles of Polymerization*, 2nd ed., Wiley, New York, 1981.

8. www.matweb.com/search/searchSubcat.asp.
9. J. Brandrup and E. H. Immergut, *Polymer Handbook*, 3rd ed., Wiley, New York, 1989.
10. *Modern Plastics Encyclopedia*, 71(12), 1995, Mid-November 1994 issue, McGraw-Hill, New York.
11. Plastics, 9th ed., Thermoplastics and thermosets desk-top data bank, *International Plastics Selector*, 1987.
12. www.zeusinc.com/peek_thermal_prop.asp.
13. M. R. Piggott, *Load Bearing Fibre Composites*, Pergamon Press, Elmsford, NY, 1980.
14. S. M. Lee (editor), *International Encyclopedia of Composites*, VCH Publishers, New York, 1991.
15. E. Kreyszig, *Advanced Engineering Mathematics*, 4th ed., Wiley, New York, 1979.
16. J. G. Simmonds, *A Brief on Tensor Analysis*, Springer-Verlag, New York, 1982.
17. R. H. Perry and C. H. Chilton, *Chemical Engineers' Handbook*, 5th ed., McGraw-Hill, New York, 1973.
18. J. Rich and H. G. Fritz, Compounding and characterization of long fiber reinforced composites based on flax and polypropylene, *ANTEC 2002 Plastics: Annual Technical Conference, Volume 2, Materials*, SPE, Brookfield Center, CT, 2002.
19. L. L. Clements, Organic fibers, Chapter 10 in *Handbook of Composites*, S. T. Peters (editor), Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1998.
20. www.tensionmeters.com.
21. www.tensitron.com/quicklinks.html.
22. D. R. Roisum, *The Mechanics of Rollers*, Tappi Press, Atlanta, GA, 1996.
23. G. Wypych, *Handbook of Fillers: The Definitive User's Guide and Databook of Properties, Effects, and Uses*, 2nd ed., Plastics Design Library, 1998. www.4spe.org.
24. R. Stewart, Nanocomposites, *Plastics Engineering*, May 2004, p. 22.
25. B. K. Kandola, Nanocomposites, Chapter 6 in *Fire Retardant Materials*, A. R. Horrocks and D. Price (editors), Woodhead Publishing, 2001.
26. M. K. Doglovskij et al., Effect of mixer type on the exfoliation of PP nanocomposites, *ANTEC 2003 Plastics: Annual Technical Conference, Volume 2, Materials*, SPE, Brookfield Center, CT, pp. 2255–2259, 2003.
27. D. Merinska et al., Properties of polypropylene nanocomposites prepared by different ways of compounding, *ANTEC 2003 Plastics, Annual Technical Conference, Volume 3, Special Areas*, SPE, Brookfield Center, CT, pp. 2744–2750, 2003.
28. G. D. Barber et al., Dispersion of nanoscopic clay particles in thermoplastic composites, *ANTEC 2000 Plastics: The Magical Solution, Volume 3, Special Areas*, SPE, Brookfield Center, CT, 2000.
29. S. J. Dahman, Melt processed polymer clay nanocomposites properties and applications, *ANTEC 2000 Plastics: The Magical Solution, Volume 2, Materials*, SPE, Brookfield Center, CT, 2000.
30. L. E. Nunnery, Tooling innovations for thermoset molding, *ANTEC 1996 Plastics: Racing into the Future, Volume 1, Processing*, SPE, Brookfield Center, CT, 1996.
31. G. Eckes, *Six Sigma for Everyone*, Wiley, New York, 2003.
32. T. Pyzdek, *The Six Sigma Handbook Revised and Expanded: A Complete Guide for Greenbelts, Blackbelts, and Managers at All Levels*, McGraw-Hill, Norwell, MA, 2003.
33. J. L. Cadden and P. F. Sadesky, Tooling for composites, Chapter 25 in *Handbook of Composites*, S. T. Peters (editor), Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1998.

34. J. R. Welty et al., *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, 2nd ed., Wiley, New York, 1976.
35. www.imsteel.com.
36. www.eazall.com.
37. www.ess.elwd.com.
38. www.tooling.vantico.com, for Renshape SL5185.
39. W. C. Young (editor), *Roark's Formulas for Stress and Strain*, 6th ed., McGraw-Hill, New York, 1989.
40. D. V. Rosato (editor), Molds to Products, Chapter 4 in *Injection Molding Handbook*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 2000.
41. H. Giles, Compression molding tooling for thermoplastic composites, *ANTEC 2001 Plastics: The Lone Star*, Volume 2, *Materials*, SPE, Brookfield Center, CT, 2001, 1-58716-098-6.2
42. Design of plastic products, Chapter 8 in *Plastics Processing Data Handbook*, (2nd ed.), Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1997.
43. H. Giles, Effect of flow in glass reinforced thermoplastic composites on part warpage and shrinkage, *ANTEC 1996 Plastics: Racing into the Future*, Volume 2, *Materials*, SPE, Brookfield Center, CT, 1996.
44. P. F. Jacobs, New frontiers in mold construction: high conductivity materials and conformal cooling channels, *Rapid Technologies for Plastic Tooling Applications*, December 10–11, 1999.
45. E. Haque and P. Bristow, Processing of glass fiber mat reinforced thermoplastic composites, *ANTEC 2001 Plastics: The Lone Star*, Volume 2, *Materials*, SPE, Brookfield Center, CT, 2001.
46. J. E. Travis et al., *Proceedings of the SPE Reinforced Plastics/Composites Institute 42nd Annual Conference*, 1987.
47. B. B. Jensen, J. Graae, and J. Christiansen, The influence of push–pull process on weld lines, fibre length, and fibre orientation, Aalborg University, <http://iprod.auc.dk/forsk/poly/student/proj/10-97-2.htm>.
48. www.plasticstechnology.com/articles/200208cul.html.
49. Resin transfer moulding, Chapter 6 in *Component Design for RTM*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1997.
50. A. H. Landrock (editor), *Handbook of Plastic Foams*, William Andrew Publishing/ Noyes, Mendham, NJ, 1995.
51. S. T. Peters (editor), *Handbook of Composites*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1998.
52. S. Schermer, The development of medium to long run tooling with a view to rapid manufacturing, *ANTEC 1999 Plastics: Bridging the Millennia*, Volume 3, *Special Areas*, SPE, Brookfield Center, CT, 1999.
53. M. A. Kotnis, Composite material for rapid tooling produced by high speed CNC machinery, *ANTEC 1999 Plastics: Bridging the Millennia*, Volume 3, *Special Areas*, SPE, Brookfield Center, CT, 1999.
54. K. Bussard, Building soft tooling molds using rapid prototyping and different methods of construction in a university environment, *ANTEC 2000 Plastics: The Magical Solution*, Volume 3, *Special Areas*, SPE, Brookfield Center, CT, 2000.
55. B. J. Arnold-Feret, Working draft—Rapid tooling—What works and what doesn't, update 2002—Will be updated and revised soon, *ANTEC 2002 Plastics: Annual Technical Conference*, Volume 1, *Processing*, SPE, Brookfield Center, CT, 2002.
56. F. Lindner and W. Michaeli, New rapid tooling concept, *ANTEC 2000 Plastics: The Magical Solution*, Volume 1, *Processing*, SPE, Brookfield Center, CT, 2000.

57. M. J. Janaes and J. E. Folkestad, Rapid tooling: the Rapid-to-market advantage #663, *ANTEC 2000 Plastics: The Magical Solution*, Volume 1, *Processing*, SPE, Brookfield Center, CT, 2000.
58. B. A. Ferret, Rapid tooling—it's not rocket science, *ANTEC 2003 Plastics: Annual Technical Conference*, Volume 1, *Processing*, SPE, Brookfield Center, CT, 2003.
59. www.sti.com/curtains/cudatash.htm.
60. <http://world.keyence.com/products/safety/slc.html>.
61. <http://oeiweb.omron.com>.
62. <http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/safetysensors/>.
63. www.safetytrainingnetwork.com/products/lockout.html.
64. www.lockout-tagout.com.
65. *Safety and Handling of Organic Peroxides: A Guide*, prepared by the Organic Peroxide Producers Safety Division of the Society of Plastics Industry, Publication AS-109, August 1999.
66. D. R. Sidwell, Hand lay-up and bag moulding, in *Handbook of Composites*, 2nd ed., S. T. Peters (editor), Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1998.
67. Society of the Plastics Industry Inc., *SPI Plastics Engineering Handbook*, 5th ed., Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1991.
68. *Kirk–Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 4th ed., Volume 21, Wiley, New York, 1997.
69. S. T. Peters, Composite materials and processes, Chapter 5 in *Handbook of Materials for Product Design*, C. A. Harper (editor), McGraw-Hill, New York, 2001.
70. Reinforced plastics, Chapter 12 in *Plastics Processing Data Handbook*, 2nd ed., Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1997.
71. P. Hubert et al., Dimensional stability of complex shapes manufactured by the VARTM process, *ANTEC 2002 Plastics: Annual Technical Conference*, Volume 2, *Materials*, SPE, Brookfield Center, CT, 2002.
72. D. J. Michaud, Curing behavior of thick sectioned RTM composites, *Journal of Composite Materials*, 32(14), 1273–1296, 1998.
73. M. C. Rios and J. M. Castro, Multiple criteria optimization studies in in-mold coated SMC, *ANTEC 2003 Plastics: Annual Technical Conference*, Volume 2, *Materials*, SPE, Brookfield Center, CT, 2003.
74. K. E. Atkins, Low profile additives in thermosets, in *Plastics Additives: An A–Z Reference*, G. Pritchard (editor), Chapman & Hall (London), Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1998.
75. L. M. Abrams and J. M. Castro, Practical methods for predicting steady-state cure time during SMC compression molding, *ANTEC 2000 Plastics: The Magical Solution*, Volume 1, *Processing*, Brookfield Center, CT, SPE, 2000.
76. M. Wacker and G. W. Ehrenstein, Rheological and thermoanalytical investigations on a “Class A” LP-SMC paste, *ANTEC 2002 Plastics: Annual Technical Conference*, Volume 1, *Processing*, SPE, Brookfield Center, CT, 2002.
77. M. C. Rios and J. M. Castro, SMCstuff: multiple criteria optimization studies in in-mold coated SMC, *ANTEC 2003 Plastics: Annual Technical Conference*, Volume 2, *Materials*, SPE, Brookfield Center, CT, 2003.
78. www.azdel.com.
79. www.quadrant.com.
80. Personal experiences of D. Grove (author).
81. Based on an e-mail from K. Gleich.

82. S. Gottgetreu, Injection molding long glass fiber reinforced thermoplastic composites, *ANTEC 2001 Plastics: Annual Technical Conference*, Dallas, TX, Paper 505, SPE, Brookfield Center, CT, 2001.
83. M. Miklos, Updated process builds reinforced plastic parts, *Machine Design*, 71(5), 204, 1999.
84. O. Becker, D. Karsono, K. Koelling, and T. Altan, Gas-assisted injection molding of long glass fiber reinforced thermoplastics, *ANTEC 1997, Plastics: Annual Technical Conference*, SPE, Brookfield Center, CT, 619.
85. D. Schwendemann, New developments in co-rotating twin-screw extrusion for production of long glass fiber composites, *ANTEC 2002, Plastics: Annual Technical Conference*, San Francisco, CA, Paper 544, SPE, Brookfield Center, CT.
86. F. Gonzalez and C. Chassapis, Fracture toughness variations of injection molded long fiber reinforced thermoplastics, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 20(10), 810–820, 2001.
87. M. Pechulis and D. Vautour, The effect of thickness on the tensile and impact properties of reinforced thermoplastics, *ANTEC 1997, Plastics: Annual Technical Conference*, SPE, Brookfield Center, CT, pp. 1860–1864.
88. F. Gonzalez and C. Chassapis, Experimental investigation of fracture toughness in injection molded long fiber reinforced thermoplastics, *ANTEC 1999, Plastics: Annual Technical Conference*, New York, SPE, Brookfield Center, CT, pp. 2171–2175.
89. J. Linn, On the characterization of the phase space of the Folgar–Tucker equation, presented at the SIAM-EMS Conference: AMCW 2001, Berlin, September 2–6, 2001.
90. A. Rios, B. Davis, and P. Gramann, Computer aided engineering in compression molding, presented at the Composites 2001 Convention and Trade Show, Tampa, FL, October 3–6, 2001.
91. P. Carreau, Rheological properties of concentrated fiber suspensions in polymers, presented at the 74th Annual Meeting of the Society of Rheology, Paper HS23, October 2002.
92. S. G. Advani, University of Delaware, www.me.udel.edu/~advani/index.html.
93. P. Mapleston, Process technology upgrades long-fiber compounds, *Modern Plastics International*, 27(1), 78–83, 1997.
94. K. Gleich, Extrusion/compression of long fiber thermoplastic composites, *ANTEC 2001, Plastics: Annual Technical Conference*, Dallas, TX, SPE, Brookfield Center, CT, Paper 506.
95. M. Voelker and C. Weber, CPI in-line compounding systems, *ANTEC 2001, Plastics: Annual Technical Conference*, Dallas TX, SPE, Brookfield Center, CT, Paper 507.
96. K. Gleich, New developments in long fiber reinforced thermoplastic composites, *ANTEC 2002, Plastics: Annual Technical Conference*, San Francisco, CA, SPE, Brookfield Center, CT, Paper 185.
97. A. Bricout, Processing and benefits of commingled glass fiber reinforced thermoplastic composites, *ANTEC 2001, Plastics: Annual Technical Conference*, Dallas, TX, SPE, Brookfield Center, CT, Paper 508.
98. F. Esposito, LNP, Vetrotex partner to market LFRT's, *Plastics News (USA)*, 12(25), August 2000.
99. D. R. Roisum, Web Handling and Converting Course.
100. D. R. Roisum, *The Mechanics of Web Handling*, Tappi Press, Atlanta, GA, 1998.
101. www.sensorproducts.com.
102. www.cesphepherd.com/utility_mesh.html.
103. www.gabions.net.
104. www.wilsonart.com.
105. www.formica.com.

106. F. S. Merritt and J. T. Richetts (editors), *Building Design and Construction Handbook*, 6th ed., McGraw-Hill, New York, 2002.
107. R. J. Porter, Paper for resin bonded paper laminates, in *Plastics Additives: An A–Z Reference*, G. Pritchard (editor), Chapman & Hall, London, 1998.
108. Roger M. Rowell, Specialty treatments, Chapter 19 in *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 2001.
109. www.hymmen.com.
110. www.berndorf.co.kr.
111. www.smt.sandvik.com.
112. www.meyer-machines.com.
113. Extrusion, Chapter 16 in *Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook*, William Andrew Publishing, Mendham, NJ, 1998.
114. E. B. Gutoff, E. D. Cohen, and G. I. Kheboian, *Coating and Drying Defects*, Wiley, New York, 1995.
115. A. F. Turbak, *Nonwovens: Theory, Process, Performance, and Testing*, Tappi Press, Atlanta, GA, 1993.
116. www.cognex.com/pdf/downloads/Smartview_Nonwoven.pdf.
117. www.acs.honeywell.com/ichome/rooms/DisplayPages/LayoutInitial?_pageName_chem_filmsconv&CategoryName_chem_filmsconv&ParentCalatogName_ICHome&ParentName_ROOT
118. A. F. Freed and R. K. Gupta, Minimizing voids in pultruded polymer composites, *ANTEC 2003 Plastics: Annual Technical Conference*, Volume 2, *Materials*, SPE, Brookfield Center, CT, 2003.
119. S. M. Moschiar, M. M. Reboredo, and A. Vazquez, Pultrusion processing, Chapter 6 in *Advanced Polymer Processing Operations*, William Andrew Publishing, Mendham, NJ, 1998.
120. B. A. Wilson, Pultrusion, Chapter 23 in *Handbook of Composites*, S. T. Peters (editor), Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1998.
121. I. Ekhatior and P. Bates, Pultrusion compounding of commingled glass and polypropylene fibers, *ANTEC 2002 Plastics: Annual Technical Conference*, Volume 2, *Materials*, SPE, Brookfield Center, CT, 2002.
122. P. J. Bates et al., Pressure build-up in staggered pin compounding system, *ANTEC 2000 Plastics: The Magical Solution*, Volume 2, *Materials*, SPE, Brookfield Center, CT, 2000.
123. www.owenscorning.com.
124. Reinforced plastics, in *Plastics Processing Data Handbook*, 2nd ed., Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1997.
125. Y. M. Tanopul'skii, S. T. Peters, and A. I. Beil, Filament winding, Chapter 21 in *Handbook of Composites*, 2nd ed., S. T. Peters (editor), Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1998.
126. A. Lutz and T. Harmia, 2nd Impregnation techniques for fiber bundles and tows, in *Polypropylene: An A–Z Reference*, J. Karger-Kocsis (editor), Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1998.
127. Processing of advanced thermoplastic composites, Chapter 5 in *Handbook of Materials for Product Design*, C. A. Harper (editor), McGraw-Hill, New York, 2001.
128. J. P. Nunes et al., Advances on filament winding technology to produce composites from thermoplastic tow pregs and coated tapes, *ANTEC 2002 Plastics: Annual Technical Conference*, Volume 2, *Materials*, SPE, Brookfield Center, MA, 2002.
129. J. P. Nunes et al., Production of structures from thermoplastic composite towpregs, *ANTEC 2001 Plastics: The Lone Star*, Volume 2, *Materials*, SPE, Brookfield Center, MA, 2001.
130. www.entec.com/modules.shtml.

131. www.material.be/products/cadwind.html.
132. www.mcleananderson.com/controls/PMRWIN.htm.