

N. CLASS. 171 068.4  
CUTTER V685c  
ANO/EDIÇÃO 2015

**NORIVAL DE SOUZA VILELA**

**COMPÓSITOS: análise de diferentes orientações nos reforços de fibra de vidro**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção de grau de bacharel, sob orientação do Prof. Me. Alexandre de Oliveira Lopes.

**Varginha**

**2015**

**NORIVAL DE SOUZA VILELA**

**COMPÓSITOS: análise de diferentes orientações nos reforços de fibra de vidro**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção de grau de bacharel, sob avaliação da banca.

Aprovado em / /

---

Prof.

---

Prof.

---

Prof.

OBS.:

## **AGRADECIMENTOS**

Dedico este trabalho ao meu pai (in memoriam) e a minha mãe por tudo, a minha irmã, grande companheira nesta difícil caminhada e meu irmão, que me inspirou os estudos na área de engenharia.

## RESUMO

Os compósitos ou plásticos reforçados com fibras de vidro são materiais de baixo custo, alta performance, leve, forte, resistente à corrosão de substâncias químicas. Estas características são importantes para desenvolvimento de novas tecnologias nas áreas de engenharia e exigem conhecimentos sobre as propriedades mecânicas, critérios de projetos e processos disponíveis para obtenção dos laminados. Portanto, o correto dimensionamento dos equipamentos com o intuito de redução de custo deve ser realizado através uma análise préviado processo mais econômico a ser utilizado, antes da execução. A análise é feita comparando as propriedades mecânicas dos laminados, que possuem diferentes composições, e a especificação do tipo de laminado deve ser feito de acordo com as necessidades do projeto.

Palavras-chave: compósitos, plástico reforçado com fibras de vidro, equipamentos industriais

## ***ABSTRACT***

*Composites or reinforced plastic glass fiber are low-cost, high performance, lightweight, strong, and corrosion-resistant chemicals materials. These features are important for development of new technologies in engineering and require knowledge of the mechanical properties, design criteria and processes available for obtaining laminates. Therefore, the correct sizing of the equipment with the cost reduction objective should be achieved through an analysis provided the most economic process to be used before the execution. The analysis is made by comparing the mechanical properties of laminates, having different compositions, and laminate type specification must be made according to needs design.*

*Keywords: composites, reinforced plastic fiberflass, industrial equipment*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Materiais utilizados na fabricação dos liners.....	176
Figura 02 - Roving para laminação.....	177
Figura 03 - Roving UD (unidirecional).....	18
Figura 04 - Mantas de fibras picadas.....	19
Figura 05 - Tecidos tramados T800 e T600.....	20
Figura 06 - Composição dos laminados industriais.....	27
Figura 07 - Laminação manual com pistola (spray-up).....	30
Figura 08 - Laminação manual (hand lay-up).....	32
Figura 09 - Padrão de espessuras dos laminados feitos com laminação manual.....	33
Figura 10 - Enrolamento helicoidal (filament winding).....	34
Figura 11 - Esquema de enrolamento helicoidal.....	35
Figura 12 - Esquema de enrolamento circunferencial.....	36
Figura 13 - Laminação hoop-chop.....	37
Figura 14 - Estrutura para coberturas.....	38
Figura 15 - Casas feitas através do processo de laminação contínua.....	38
Figura 16 - Edificações feitas através do processo de laminação contínua.....	39
Figura 17 - Teto, frente e traseira fabricados com compósitos.....	40
Figura 18 - Capô e para-choque fabricado através do processo de RTM light.....	40
Figura 19 - Tanque para transporte de produtos perigosos.....	41
Figura 20 - Lanchas com peças feitas com compósitos.....	41
Figura 21 - Jet ski com peças fabricadas por SMC e BMC.....	42
Figura 22 - Turbinas eólicas.....	42
Figura 23 - Direções principais das laminas padrão.....	44
Figura 24 - Propriedades mecânicas das lâminas padrão.....	45
Figura 25 - Combinação de lâminas padrão.....	45
Figura 26 - Propriedades mecânicas dos laminados com fibras picadas.....	46
Figura 27 - Propriedades mecânicas dos laminados M450 e T600.....	46
Figura 28 - Propriedades mecânicas dos laminados M450 e T800.....	47
Figura 29 - Propriedades mecânicas dos laminados hoop-chop sem areia.....	47
Figura 30 - Propriedades mecânicas dos laminados helicoidal $\Theta 55^\circ$ .....	48
Figura 31 - Propriedades mecânicas dos laminados helicoidal $\Theta 70^\circ$ .....	48

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 COMPÓSITOS.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 As matériasprima .....</b>	<b>15</b>
2.1.1 Véu de superfície.....	15
2.1.2 Rovings para laminação .....	16
2.1.3 Roving unidirecional.....	17
2.1.4 Manta de fibras picada .....	18
2.1.5 Tecidos tramado .....	19
2.1.6 Sistemas de cura.....	19
2.1.7 Estireno.....	19
2.1.8 Inibidores.....	19
2.1.9 Cargas.....	19
2.1.10 Massa de reparo.....	19
2.1.11 Agente tixotrópico.....	19
2.1.12 Parafina.....	19
2.1.13 Resina .....	19
2.1.14Fibras de vidro.....	19
<b>2.2 Processos.....</b>	<b>26</b>
2.2.1 Laminado comerciais .....	19
2.2.1.1 Liner .....	19
2.2.1.2 Barreira de corrosão .....	19
2.2.1.3 Laminado estrutural.....	19
2.2.1.4 Topcoat.....	19
2.2.2 Laminação com pistola (spray-up).....	19
2.2.3 Laminação manual (hand lay-up).....	31
2.2.4 Enrolamento helicoidal (filament winding) .....	34
2.2.5 Enrolamento circunferencial (hoop winding).....	35
2.2.6 Laminação hoop-chop .....	36
<b>2.3 Áreas de aplicação dos materiais compósitos .....</b>	<b>37</b>
2.3.1 Construção civil.....	37
2.3.2 Transportes.....	39
2.3.3 Náutico .....	41
2.3.4 Energia eólica.....	42

<b>2.4 Propriedades mecânicas dos laminados .....</b>	<b>43</b>
2.4.1 Propriedades mecânicas das lâminas.....	44
2.4.2 Laminados padrão de fibras picada.....	446
2.4.3 Laminado padrão combinando M450 e T600 .....	446
2.4.4 Laminado padrão combinando M450 e T800 .....	447
2.4.5 Laminado hoop-chop.....	447
2.4.6 Laminado padrão helicoidal com $\Theta 55^\circ$ .....	48
2.4.7 Laminado padrão helicoidal com $\Theta 70^\circ$ .....	48
<b>3 CONCLUSÃO .....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>50</b>



## 1 INTRODUÇÃO

No atual cenário industrial, onde a competitividade está cada vez mais “acirrada”, um atributo básico de um engenheiro mecânico é analisar os modos mais econômicos para execução de seus projetos. O correto dimensionamento de equipamentos para indústria é uma tarefa que exige conhecimento técnico e aplicação de normas, atendo os requisitos de segurança, qualidade, e preço competitivo.

O presente trabalho é uma análise das propriedades mecânicas dos laminados feitos em plástico reforçado com fibras de vidro. O correto dimensionamento dos equipamentos com o intuito de redução de custo deve ser realizado através uma análise previa do processo mais econômico a ser utilizado, antes da execução. A análise é feita comparando as propriedades mecânicas dos laminados, que possuem diferentes composições, e a especificação do tipo de laminado deve ser feito de acordo com as necessidades do projeto.

O estudo tem o objetivo geral analisar a diferença das propriedades mecânicas dos laminados, feitos por diferentes processos, alternando a orientação ou tipo dos reforços das matrizes poliméricas.

O objetivo específico é demonstrar as materiais primas envolvidas no processo de laminação, bem como os processos de fabricação de compósitos para uso industrial e os diferentes laminados feitos com os materiais compósitos.

Segundo Carvalho (2012) a orientação dos reforços em fibra de vidro tem influência na resistência dos materiais compósitos, podendo ser obter laminados isotrópicos ou anisotrópicos, tornando imprescindível a verificação do melhor processo de fabricação, antes da execução de qualquer projeto, afim de atingir o menor peso, conseqüentemente, menor custo de fabricação.

No início do trabalho é apresentado uma revisão bibliográfica, com objetivo de conhecer as matérias primas envolvidas no processo com ênfase na resina polimérica e o reforço de fibra de vidro.

No segundo momento é apresentado alguns processos de fabricação de laminados em compósitos e também as diversas áreas de aplicação dos compósitos.

E finalmente é apresentado as propriedades mecânicas dos laminados feitos por diferentes processos e é feita uma análise e comparação.

## 2 COMPÓSITOS

Os compósitos ou plásticos reforçados com fibras de vidro são materiais de baixo custo, alta performance, leves, fortes, resistente à corrosão de substâncias químicas (ANDRADE S. et al., 2009).

De acordo com Carvalho (2012) para entender as funções dos compósitos ou Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) é necessário definir de forma restrita o que é o compósito.

Os compósitos são materiais de engenharia constituídos de uma matriz plástica reforçada de vidro ou de carbono. Os compósitos são caracterizados por duas ou mais fases que quando combinadas devem apresentar propriedades melhor desempenho do que teriam se atuassem isoladamente (CARVALHO, 2012).

A definição abrangente é muito genérica e não ajuda no entendimento deste trabalho, pois até mesmo a natureza é pródiga de no uso de compósitos, como por exemplo as madeiras, osso, unhas, dentes e etc.

### 2.1 As matérias prima

Para entender as propriedades mecânicas dos compósitos é preciso conhecer as principais matérias primas envolvidas no processo.

#### 2.1.1 Superfície dos laminados

As superfícies dos laminados são feitas com um uma manta de baixa gramatura (35 g/m<sup>2</sup> a 40 g/m<sup>2</sup>), feitas com fibras de poliéster ou de vidro C, conhecida como véu de superfície. Quando impregnada com resina, essa manta forma uma lâmina fina na superfície do equipamento, chamada de liner. Essa camada é rica em resina e tem espessura média de 0,3 mm e 0,5 mm. O véu assegura a uniformidade de espessura do liner e também não exige tempo de cura para iniciar o processo de laminação estrutural como o gelcoat (CARVALHO, 2012).

O véu de superfície é a primeira camada do laminado, aplicado no molde juntamente com a resina. Segundo ASME – RTP-1, o véu deve representar 10% em peso do liner, sendo os outros 90% em resina especificada de acordo com o fluido que entrará em contato com a superfície do laminado.

Em aplicações onde é necessário a barreira contra a penetração de produtos agressivos, é utilizado a resina e o véu de superfície. Já em aplicações que precisam apresentar bom acabamento superficial, como barcos e piscinas, essa camada é feita apenas com gelcoat (híbrido de resina e pigmentos). Os gelcoats são pigmentados para ter acabamento colorido, liso e brilhante. Eles são aplicados no molde, no estado líquido, onde curam antes de receber o laminado estrutural (ORRO L. et al., 2009).

Figura 01 – Materiais utilizados na fabricação dos liners



Fonte: (O AUTOR)

### 2.1.2 Rovings para laminação

Segundo Carvalho (2012) os equipamentos industriais usados em ambientes agressivos devem ser feitos com uma barreira de fibras de vidro picadas, conhecida com barreira de corrosão, aplicada sobre o liner. A barreira de corrosão pode ser laminada com mantas ou com rovings. As fibras dos rovings devem ser cortadas em comprimentos pequenos (em geral 2,5 cm) antes de ser impregnadas com resina para formar a barreira de corrosão.

Zurstrassen (2009) explica que existem duas variedades de rovings que são:

- a) O roving de pistola tem tratamento superficial feito com PVA, que o torna fácil de cortar e de espalhar. Mas, como o PVA tem baixa solubilidade em algumas resinas, o roving de pistola pode produzir laminados com fibras esbranquiçadas e secas. A barreira de corrosão feita com esse roving tem alta permeabilidade e é facilmente penetrada por produtos químicos. Se o compósito for usado em ambientes não agressivos, como água, etanol, formol e outros, isso não é problema. Mas, nas aplicações em contato com produtos químicos agressivos, a alta permeabilidade da barreira de corrosão pode reduzir significativamente a vida funcional dos equipamentos. A barreira de corrosão não deve ser feita com roving de pistola;
- b) O roving de telhas tem tratamento superficial feito com polímeros de alta solubilidade nas resinas poliéster, e por isso os laminados feitos com ele não têm fibras secas ou esbranquiçadas. Esse roving é difícil de cortar e de espalhar, mas é muito bom para fazer barreiras de corrosão de baixa permeabilidade e de longa vida funcional.

Figura 02 – Roving para laminação



Fonte: (O AUTOR)

### 2.1.3 Roving UD (unidirecional)

O roving de fibras contínuas, mais conhecido como roving UD, é usado para fazer lâminas unidirecionais (conhecidas como lâminas UD) e lâminas tecidas. Essas lâminas são usadas nos laminados estruturais dos equipamentos industriais. Da mesma maneira que o roving

de telha, o roving UD tem tratamento superficial de alta solubilidade nas resinas e não produz laminados com fibras brancas (ZURSTRASSEN E. et al., 2009).

As lâminas feitas manualmente com tecidos ou feitas por enrolamento helicoidal com roving UD, têm propriedades mecânicas mais altas que as feitas com fibras picadas. Mas, ao contrário das lâminas feitas com fibras picadas, elas são anisotrópicas e suas propriedades variam com a direção das fibras (CARVALHO, 2009).

Figura 03 – Roving UD (unidirecional)



Fonte: (O AUTOR)

#### 2.1.4 Manta de fibras picadas

As mantas de fibras picadas são fornecidas em rolos com gramaturas de  $225 \text{ g/m}^2$ ,  $450 \text{ g/m}^2$  ou  $600 \text{ g/m}^2$ . Elas são feitas com fibras de vidro cortadas e aglutinadas com ligante de resina poliéster bisfenólica. As mantas feitas com esse ligante são usadas para fazer as barreiras de corrosão, as emendas e também as estruturas de laminados. Geralmente as mantas são designadas por suas gramaturas expressas em gramas por metro quadrado, como M225, M450 e M600 (ZURSTRASSEN E. et al., 2009).

Figura 04 – Manta de fibras picadas



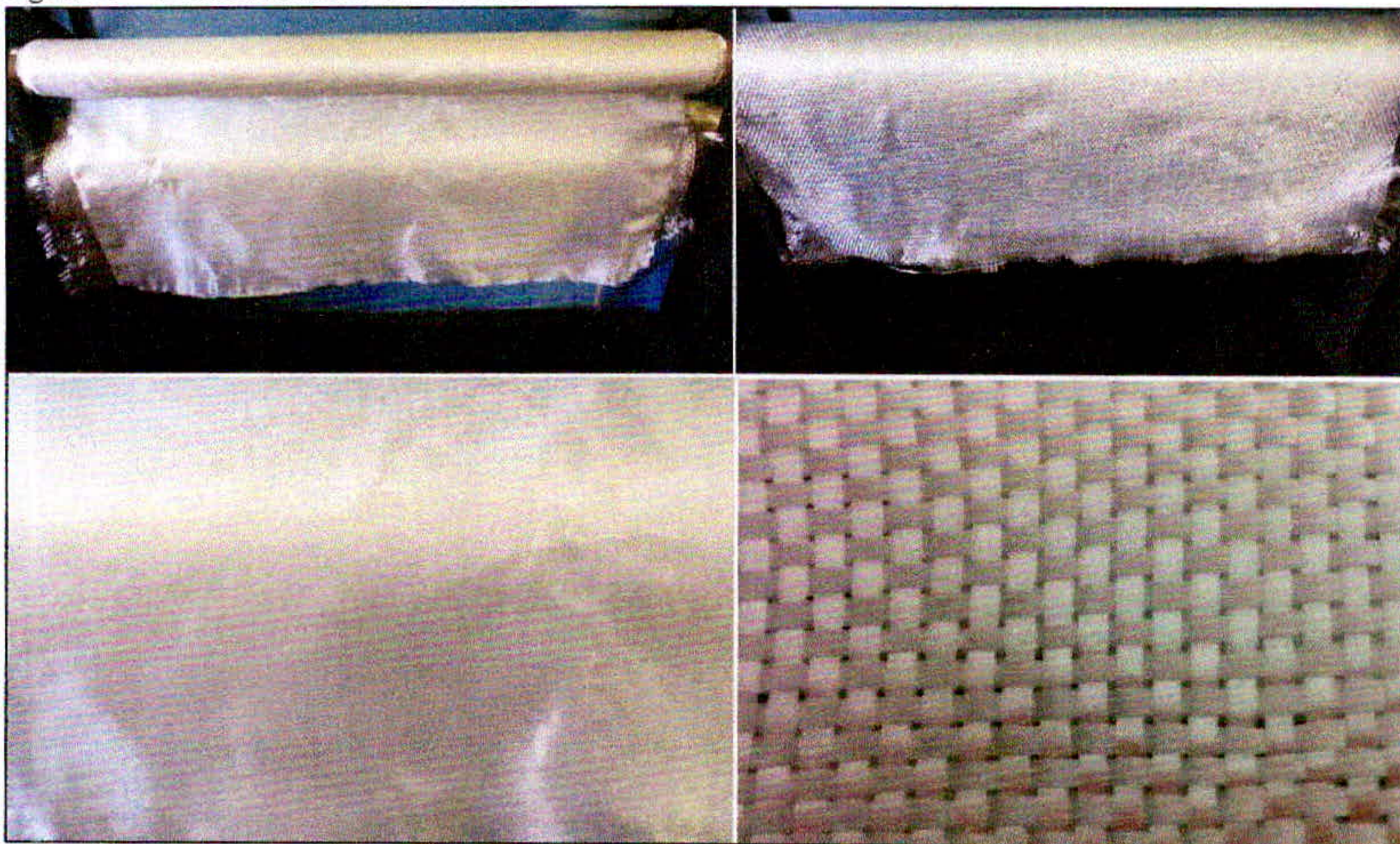
Fonte: (O AUTOR)

Carvalho (2012) explica que importante notar a diferença entre o ligante que é usado para ligar as fibras picadas das mantas, e o tratamento superficial, que é aplicado nas fibras quando elas são formadas. O ligante das mantas é feito com resina poliéster bisfenólica. O tratamento superficial das fibras é feito com vários ingredientes, como silanos, formadores de filme, etc. Como todas as fibras, as usadas para fazer mantas também têm tratamento superficial. Além desse tratamento superficial, elas são ligadas pelo ligante bisfenólico.

#### 2.1.5 Tecidos tramados

Os tecidos feitos com roving UD são fornecidos comercialmente em rolos com gramatura de 600 g/m<sup>2</sup> ou de 800 g/m<sup>2</sup>. As lâminas de fibras tecidas aumentam a resistência ao impacto e outras propriedades mecânicas dos laminados. Os tecidos disponíveis comercialmente são compatíveis com resinas epóxi, viniléster ou poliéster e são designados por suas gramaturas, como T600 e T800 (ZURSTRASSEN E. et al., 2009).

Figura 05 – Tecidos tramados T800 e T600



Fonte: (O AUTOR)

### 2.1.6 Sistemas de cura

Depois de processadas, as resinas gradualmente se transformam do estado líquido ao estado sólido. Essa transformação é conhecida como cura. As substâncias adicionadas na resina líquida para fazer a cura na temperatura ambiente são conhecidas como sistemas de cura. Os sistemas de cura são formados por um acelerador (promotor) e um catalisador (iniciador). É impossível curar as resinas na temperatura ambiente sem usar catalisadores e aceleradores. Os sistemas de cura mais usados são os formados pelas duplas MEKP + Cobalto e BPO + DMA (CARVALHO, 2012).

Ainda segundo Carvalho (2012) o sistema MEKP + Cobalto é o mais utilizado devido sua notável versatilidade e facilidade de uso, o que lhe assegura praticamente a universalidade das aplicações. O sistema BPO + DMA é usado em apenas em aplicações especiais.

### 2.1.7 Estireno

O estireno é um líquido transparente e incolor, usado para baixar a viscosidade e para interligar as resinas. Ele é fornecido pré-misturado na resina. O transformador adiciona estireno na resina apenas para fazer pequenos ajustes de viscosidade, ou como veículo para introduzir

pequenas quantidades de aditivos (CARVALHO, 2012).

#### 2.1.8 Inibidores

As resinas diluídas em estireno são muito reativas e curam espontaneamente quando armazenadas por longo tempo na temperatura ambiente. Os inibidores são usados para retardar a cura e alongar o tempo de estocagem das resinas. Os mais usados são o terc-butil catecol (TBC), a hidroquinona e a parahidroquinona. Esses inibidores são adicionados na resina pelo fabricante, sendo usados pelos transformadores apenas em casos extremos, para ajustar o tempo de gel ou para reduzir o pico exotérmico (CARVALHO, 2012).

Carvalho (2012) explica que alguns inibidores específicos, como o naftenato de cobre e a pentanodiona, podem ser adicionados à resina pelos transformadores no momento de aplicação.

#### 2.1.9 Cargas

As cargas minerais são misturadas na resina para fazer as bases usadas em revestimentos de substratos de aço ou de concreto. Elas servem também para encher cavidades e para nivelar irregularidades na execução de reparos. As cargas usadas em ambientes agressivos devem ser inertes e devem ter baixo coeficiente de dilatação térmica. As mais usadas são a sílica (areia) e o grafite. A alumina hidratada é usada em algumas aplicações, para reduzir a propagação de chamas e a liberação de fumaça dos laminados (CAMATTA P. et al., 2009).

#### 2.1.10 Massa de reparo

As massas de reparo são usadas para arredondar cantos, encher cavidades e acertar irregularidades na execução de emendas ou de reparos. Elas são feitas com resina, agente tixotrópico, catalisador e acelerador, podendo conter também cargas minerais inertes e fibras de vidro moídas. A massa de reparo deve ser feita com cargas inertes e com a mesma resina usada na barreira de corrosão dos equipamentos (CAMATTA P. et al., 2009).



impostos pela resina. A temperatura de uso dos compósitos é limitada pela distorção térmica da matriz polimérica.

Essas propriedades das fibras devem ser comparadas com as das resinas poliéster e viniléster, por exemplo, o módulo de elasticidade das fibras de vidro ( $720.000 \text{ Kg/cm}^2$ ) é pelo menos 20 vezes maior que o das resinas poliéster ou viniléster ( $30.000 \text{ Kg/cm}^2$ ). Da mesma maneira, o coeficiente de dilatação térmica das fibras de vidro ( $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) é pelo menos 10 vezes menor que o dessas resinas ( $60 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) (CARVALHO, 2012).

As fibras de vidro são particularmente atraentes pela facilidade de processamento e pelo baixo custo em relação a outras fibras, como as de carbono (ZURSTRASSEN E. et al., 2009).

Os plásticos reforçados retêm todas as propriedades desejáveis dos não reforçados, como resistência à corrosão, baixo custo de processamento, liberdade de projeto e outras. As deficiências dos plásticos, como baixa estabilidade dimensional, baixa rigidez e, para alguns plásticos, baixa tenacidade, são atenuadas pela inclusão de fibras de vidro (CARVALHO, 2012). Portanto, parece natural que os compósitos sejam feitos com fibras de vidro

De acordo com Carvalho (2012) as inclusões das fibras de vidro transformam os plásticos de baixo custo em materiais de engenharia, dotados de propriedades muito apreciadas, como:

- a) Alta rigidez
- b) Boa resistência a temperaturas
- c) Excelente estabilidade dimensional
- d) Excepcional resistência à fadiga

A inclusão das fibras de vidro expande o campo de aplicação dos plásticos, tornando possível seu uso em concorrência direta com os metais (ZURSTRASSEN E. et al., 2009).

As mantas são fornecidas com gramatura de  $225 \text{ g/m}^2$ ,  $450 \text{ g/m}^2$  ou  $600 \text{ g/m}^2$ , que são representadas como M225, M450 e M600. A gramatura é controlada pela velocidade da esteira. As mantas são aplicadas por laminação manual para reforçar resinas poliéster, viniléster ou epóxi (CARVALHO, 2012).

Ainda segundo Carvalho (2012) os tecidos de fibras de vidro são feitos tecendo rovings UD, isto é, rovings feitos com uma mecha. O paralelismo dos filamentos assegura o máximo aproveitamento das propriedades das fibras de vidro. Os tecidos de uso comercial são compatíveis com resinas poliéster, epoxi e viniléster e têm gramatura de  $600 \text{ g/m}^2$  ou  $800 \text{ g/m}^2$  e são representados como T600 ou T800.

#### 2.1.14 Resina

Os polímeros comerciais podem ser classificados como termoplásticos ou como termofixos. Os primeiros têm alto peso molecular e alto ponto de fusão. Eles são sólidos na temperatura ambiente e exigem altas temperaturas para processamento. Os segundos têm baixo ponto de fusão e muitas vezes são diluídos em monômeros reativos para ser processados como líquidos. As resinas termoplásticas sofrem apenas transformações físicas no processo de moldagem (fusão seguida de solidificação) e podem ser reprocessadas repetidas vezes. As resinas termofixas, ao contrário, passam por transformações irreversíveis no processo de moldagem que as tornam permanentemente sólidas. Depois de processadas as resinas termofixas se transformam em sólidos insolúveis e infusíveis (MOREIRA W. et al., 2009).

As resinas termoplásticas mais conhecidas são o PVC, o nylon, o polietileno e o polipropileno, que geralmente são processadas por injeção, extrusão ou sopro. No grupo das termofixas, as mais usadas são as viniléster, as epóxi e as poliéster insaturadas. As termofixas são processadas no estado líquido, na temperatura ambiente e sem pressão. A cura (solidificação) delas acontece por ativação química. As termoplásticas são sólidas na temperatura ambiente e por isso devem ser fundidas e moldadas sob pressão (CARVALHO, 2012).

A transformação dessas resinas do estado líquido ao estado sólido é conhecida como cura, ou polimerização. A cura acontece na temperatura ambiente, pela ação de radicais livres liberados por peróxidos orgânicos. Depois de ativadas pelos peróxidos, as resinas permanecem líquidas durante alguns minutos (10, 15, 30 ou mais minutos) até o início da solidificação. O tempo transcorrido entre a adição dos ativadores e o início da polimerização é conhecido como tempo de gel. A cura tem início imediatamente após o tempo de gel, sendo acompanhada de grande liberação de calor. A reação de cura é irreversível, isto é, uma vez solidificadas, as resinas termofixas não retornam ao estado líquido. As fibras de vidro são incorporadas na resina enquanto ela ainda permanece líquida, imediatamente após a adição dos ativadores da cura e antes dela completar o tempo de gel. O material resultante dessa combinação de fibra e resina é conhecido como compósito (CARVALHO, 2012).

As resinas são fornecidas e processadas no estado líquido. Quando ativadas com catalisadores e aceleradores, elas se transformam em sólido rígido, infusível e insolúvel. A cura das resinas pode ser feita na temperatura ambiente e sem pressão, o que permite o uso de processos de fabricação com moldes abertos. A flexibilidade de processamento, associada à

excepcional resistência à ambientes agressivos, explicam o enorme sucesso das resinas poliéster e viniléster em aplicações industriais (MOREIRA W. et al. 2009).

Segundo Carvalho (2012) as resinas poliéster e viniléster têm importância fundamental no desempenho dos equipamentos usados em ambientes agressivos. A vida funcional e a máxima temperatura de uso dos equipamentos dependem em grande parte da resina. Carvalho (2012) explica os diversos tipos de resinas poliéster e vinil éster, conforme descrito abaixo:

- a) Poliéster isoftálico e tereftálico – Essas resinas têm bom desempenho em ambientes ácidos, mas não devem ser usadas em ambientes alcalinos. Alguns poliésteres dessa categoria têm excelente desempenho em presença de solventes, e apresentam o menor custo;
- b) Poliéster bisfenólico – Apresenta o máximo de resistência à ambientes oxidantes, alcalinos ou ácidos. Essa resina combina baixa absorção de água com alta temperatura de distorção térmica (HDT) e por isso é muito usada em ambientes aquosos e sob altas temperaturas, estas são as resinas mais caras atualmente;
- c) Viniléster – são notáveis por combinar alto alongamento de ruptura com alta temperatura de termo-distorção (HDT). E tem bom desempenho em ambientes ácidos, oxidantes e alcalinos, o custo desta resina está entre a isoftálica e a viniléste.

A cura dos poliésteres insaturados acontece quando as insaturações de suas moléculas se interligam. Essa interligação é irreversível e não pode ser revertida ao estado original. Os poliésteres insaturados são, portanto, termofixos. O mesmo não acontece com os poliésteres saturados, que podem ser fundidos e reprocessados e são, por isso, termoplásticos (MOREIRA W. et al. 2009).

As resinas poliéster e as viniléster também são diluídas em estireno. O estireno também é insaturado e participa na reação de cura, formando pontes de interligação entre as insaturações da resina. Essa interligação libera energia e a cura é acompanhada de aumento de temperatura. Nos poliésteres de alta reatividade, feitos com grande proporção de bi-ácidos insaturados, a densidade de duplas ligações é grande e a cura libera muito calor. As resinas de alta reatividade são boas para aplicações em ambientes agressivos, porque têm altas temperaturas de transição vítrea ( $T_g$ ) e baixa permeabilidade. Porém, elas têm baixo alongamento de ruptura, o que exige cuidado no manuseio das estruturas feitas com elas (CARVALHO, 2012).

A energia necessária para abrir as insaturações e iniciar a cura pode ser suprida por elevação da temperatura, por radiação UV, ou por radicais livres liberados pela combinação de catalisadores com aceleradores. Os radicais livres abrem as duplas ligações e iniciam a reação em cadeia em que cada insaturação aberta gera outro radical livre, que abre outra dupla ligação e assim sucessivamente. A reação em cadeia faz a interligação das moléculas. O avanço da cura

imobiliza as moléculas e dificulta esse processo. Eventualmente o grau de interligação fica muito alto e as moléculas ficam praticamente imobilizadas. Quando isso ocorre, a resina "vitrifica" e a cura deixa de avançar. Esse evento define a temperatura de transição vítrea para a resina curada na temperatura ambiente. Essa temperatura é representada por  $T_{ga}$ , onde o subscrito "a" indica que a temperatura de transição vítrea foi obtida fazendo a cura na temperatura ambiente (CARVALHO, 2012).

Para prosseguir com a interligação, a resina deve ser "desvitrificada" por aquecimento acima do  $T_{ga}$ . Esse aquecimento é conhecido como pós-cura. A pós-cura eleva o patamar de interligação para outra temperatura de transição vítrea, conhecida como  $T_{gp}$ , onde o subscrito "p" indica pós-cura. Esse processo pode ser repetido até uma temperatura acima da qual a interligação não avança mais. Quando isso acontece a resina atinge sua cura ou interligação plena. Na interligação plena, a resina alcança sua máxima temperatura de transição vítrea. A máxima temperatura de transição vítrea é reportada pelo fabricante simplesmente como o " $T_g$  da resina" (CARVALHO, 2012).

Carvalho (2012) explica que o pós-cura deve ser feito em equipamentos usados em ambientes muito agressivos. Os fabricantes de resina informam a máxima temperatura de transição vítrea, o  $T_g$ , de seus produtos. Nas aplicações práticas, quando a cura é feita apenas na temperatura ambiente, o  $T_{ga}$  pode ser muito baixo e a vida funcional dos compósitos pode ser muito curta. A interligação plena das resinas só é obtida fazendo pós-cura. O pós-cura é essencial para aumentar a vida funcional dos compósitos em contato com ambientes muito agressivos.

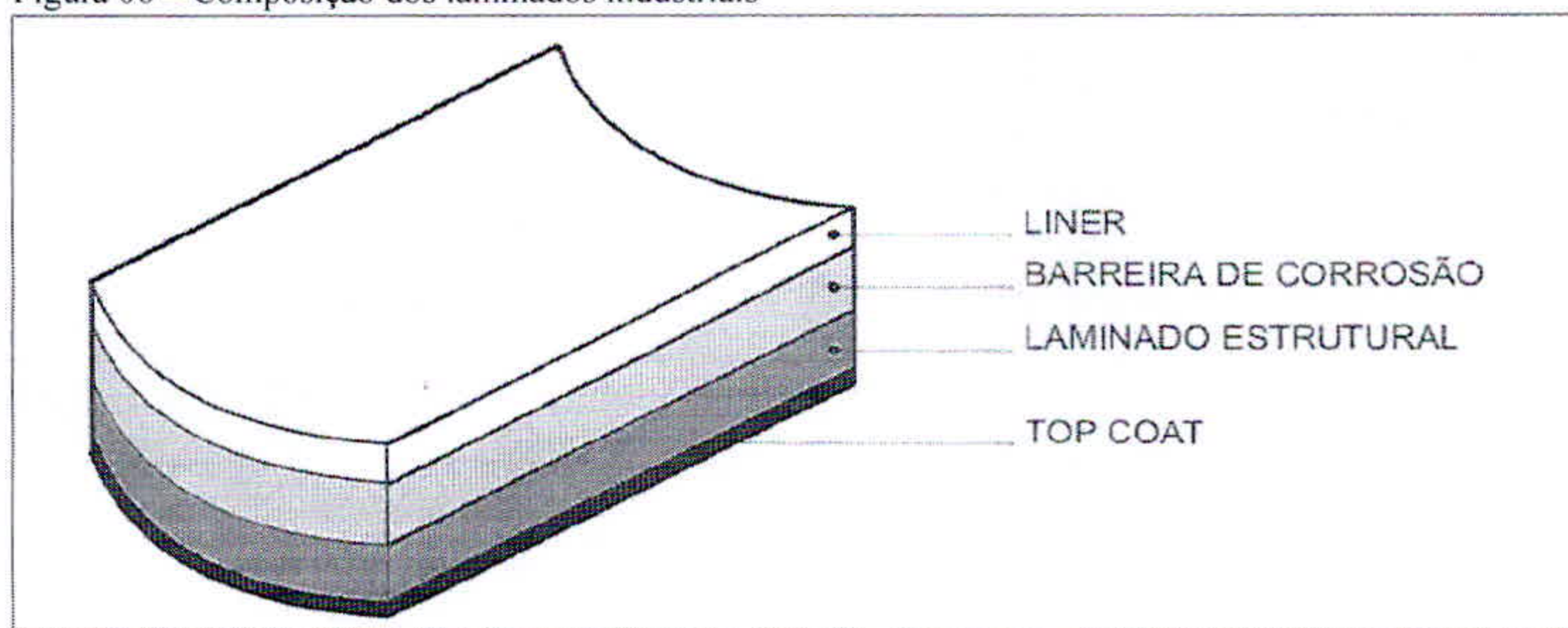
## 2.2 Processos

Os processos de fabricação e à arquitetura dos laminados usados para fazer equipamentos industriais variam, dependendo do processo de fabricação, bem como suas propriedades mecânicas. Os laminados podem ser feitos com fibras de vidro picadas, tecidas ou contínuas, e as espessuras são determinadas para resistir os esforços atuantes no equipamento (ZURSTRASSEN E. et al., 2009).

### 2.2.1 Laminados comerciais

A Figura 6 mostra a construção padrão da parede dos equipamentos usados em aplicações industriais, evidenciando as posições e as espessuras relativas dos laminados do liner, da barreira de corrosão, da estrutura e do topcoat (CARVALHO, 2012).

Figura 06 – Composição dos laminados industriais



Fonte: (CARVALHO, 2012)

Corte transversal da parede de equipamentos de compósitos usados em ambientes agressivos. O liner tem mais de 90% de resina e tem função de retardar a penetração dos produtos químicos. A barreira de corrosão tem 70% de resina e é responsável pela vida funcional do equipamento. Os equipamentos podem trabalhar sem liner, mas não podem trabalhar sem barreira de corrosão. O laminado estrutural geralmente é feito com fibras unidirecionais e a infiltração de produtos químicos podem comprometer a estrutura rapidamente. O laminado estrutural não deve ter contato com produtos químicos agressivos. O topcoat serve de proteção contra raios solares e respingos externos (CARVALHO, 2012).

#### 2.2.1.1 Liner

Independente do processo de fabricação, os equipamentos de compósito devem ser providos de um laminado interno, rico em resina, conhecido como liner. O liner retarda a penetração dos produtos químicos e impede que as fibras de vidro tenham contato direto com o ambiente agressivo. O liner é feito impregnando véus de superfície com resina devidamente ativada para curar na temperatura ambiente (CARVALHO, 2012).

Segundo Carvalho (2012), os véus de superfície são utilizados pelas seguintes razões:

- a) Asseguram a uniformidade de espessura (mínimo 0,25mm) do liner;
- b) Aumentam a resistência do liner à abrasão e ao impacto;
- c) Permitem a laminação imediata da barreira de corrosão, sem esperar pelo tempo de toque.

Das três razões acima, a possibilidade de fazer a laminação sem esperar pelo tempo de toque é a mais importante. Essa espera é necessária para liner feitos com gelcoat, para evitar que as fibras de vidro penetrem na resina sem véu. A penetração das fibras no gelcoat líquido antes de curar prejudica o acabamento superficial e isso é um grande problema. Por isso a laminação deve ser interrompida para o gelcoat curar até o tempo de toque antes de retomar a laminação. O véu impede a penetração das fibras na resina do liner e a laminação pode seguir sem esperar pelo tempo de toque. Mesmo sabendo que as fibras do véu facilitam a penetração dos produtos químicos, ou seja, o ideal seria um liner feito apenas com resina, praticamente todos os liners de equipamentos industriais são feitos com véu de superfície, pelas vantagens já apresentadas (CARVALHO, 2012).

Carvalho (2012) explica que a lâmina do liner deve ser feita com mais de 90% de resina e não deve ser considerada parte estrutural do equipamento.

#### 2.2.1.2 Barreira de corrosão

A barreira de corrosão é feita com fibras de vidro picadas impregnadas pela mesma resina usada no liner. A barreira de corrosão dos equipamentos industriais deve ter pelo menos 2,0 mm de espessura e é feita com 70% de resina e 30% de fibras de vidro picadas por peso. Sua grande espessura serve para isolar e proteger o laminado estrutural contra a ação do meio agressivo. A espessura da barreira de corrosão determina a vida funcional (intervalo entre paradas para manutenção) dos equipamentos. Em ambientes extremamente agressivos, como cloro ou dióxido de cloro, ou extremamente penetrantes, como ácido clorídrico, a espessura da barreira de corrosão deve ser maior que os 2,0 mm mínimos citados acima (CARVALHO, 2012).

De acordo com Carvalho (2012) a espessura mínima de 2,0 mm, a barreira de corrosão deve ter pelo menos 900 gramas de fibras picadas por metro quadrado. As fibras picadas podem ser laminadas manualmente, com mantas, ou a pistola com rovings.

### 2.2.1.3 Laminado Estrutural

O laminado estrutural pode ser feito com fibras de vidro picadas, tecidas ou contínuas, dependendo do processo de fabricação. Sua espessura é determinada para resistir os esforços atuantes no equipamento.

Os laminados estruturais são construídos para ter altas propriedades mecânicas (altos módulos de elasticidade) e não para ter baixa permeabilidade. Essa estratégia supõe que a resistência do equipamento ao ataque dos produtos químicos, a vida funcional, seja atribuída unicamente à barreira de corrosão. Assim, a vida funcional dos equipamentos é definida como o tempo que os produtos químicos levam para atravessar a barreira de corrosão e atingir o laminado estrutural. Essa definição supõe que os produtos químicos penetrem e destruam com rapidez o laminado estrutural. Muitas vezes isso não acontece, pois, o laminado estrutural tem baixa permeabilidade e retardam a penetração dos produtos químicos, assim como a barreira de corrosão (CARVALHO, 2012).

### 2.2.1.4 TopCoat

O topcoat é uma fina lâmina de resina pura, sem fibras, com 0,3 mm de espessura, que é aplicada na superfície externa dos equipamentos. Os topcoats protegem os equipamentos contra atmosferas agressivas e contra intemperismo. Geralmente eles são feitos com resina parafinada e sem véu de superfície. A aplicação da resina pode ser feita com pistola ou com rolo (CARVALHO, 2012).

De acordo com Carvalho (2012) a ausência do topcoat facilita o ataque do ambiente externo. Em alguns casos extremos, como em atmosferas ricas em cloro, ou onde a incidência solar for muito intensa, esse ataque pode remover a resina da superfície externa e deixar as fibras expostas.

### 2.2.2 Laminação com pistola (spray-up)

A laminação com pistola é feita com máquinas laminadoras especiais que cortam as fibras de roving contínuo e as atiram no molde simultaneamente com a resina. As fibras picadas são assentadas no molde e as bolhas de ar eliminadas usando roletes metálicos, rolos ou pincéis (ZURSTRASSEN E. et al., 2009).

Figura 07 – Laminação manual com pistola (spray-up)



Fonte: (O AUTOR)

Segundo Carvalho (2012), o laminado é fabricado da seguinte forma:

- a) Antes de iniciar a laminação a superfície do molde deve ser coberta com desmoldante. Os desmoldantes mais usados são soluções de álcool polivinílico, cera e filmes de poliéster;
- b) O liner é aplicado sobre o desmoldante. O véu de superfície não pode ser aplicado com pistola e deve ser laminado manualmente, com resina devidamente catalisada e acelerada;
- c) Os catalisadores e os aceleradores devem ser usados em suas formas mais concentradas, para evitar excesso de plastificantes. Os agentes tixotrópicos insolúveis na resina devem ser evitados. O fabricante deve esmerar na laminação do liner, espalhando a resina no molde antes de aplicar o véu;
- d) Os liners que trabalham em ambientes muito agressivos podem trincar e perder sua função protetora. Nesses casos eles devem ser protegidos com uma lâmina de fibras picadas ou de fibras tecidas aplicadas no molde antes deles. Essa tecnologia é conhecida como split-liner, que nada mais é que mais uma barreira de corrosão feita antes do liner;
- e) A barreira de corrosão pode ser aplicada em seguida e sem esperar pela cura ou tempo de toque da resina do liner. A laminação é feita com pistola capaz de cortar as fibras de vidro e as atirar no molde simultaneamente com a resina ativada para curar na temperatura ambiente. O material aplicado é assentado com roletes e pincéis, enquanto a resina ainda está líquida. A barreira de corrosão tem espessura mínima de 2,0 mm, o que pode ser obtido aplicando 900 gramas de fibras picadas por metro quadrado.
- f) O laminado estrutural é feito como a barreira de corrosão. A roletagem deve ser feita imediatamente após a aplicação pela pistola, lâmina por lâmina, até ser atingida a espessura desejada. Cada passagem da pistola acrescenta em média 1,5mm por demão; Espessuras muito grandes devem ser construídas em estágios, para permitir a dissipação do calor. Não é aconselhável laminar mais que 6 mm de espessura por vez. A laminação deve



ser feita esperando pelo esfriamento dos primeiros 6 mm, antes de prosseguir com a aplicação de outras lâminas.

- g) O topcoat é feito com resina contendo parafina. A parafina serve para impedir inibição da cura da resina exposta ao ar e é necessária para evitar degradação prematura causada pela ação das intempéries. Quando o ambiente externo é muito agressivo alguns fabricantes aplicam o topcoat manualmente usando véu de superfície. Depois da aplicação do topcoat, o equipamento permanece no molde até completar a cura.

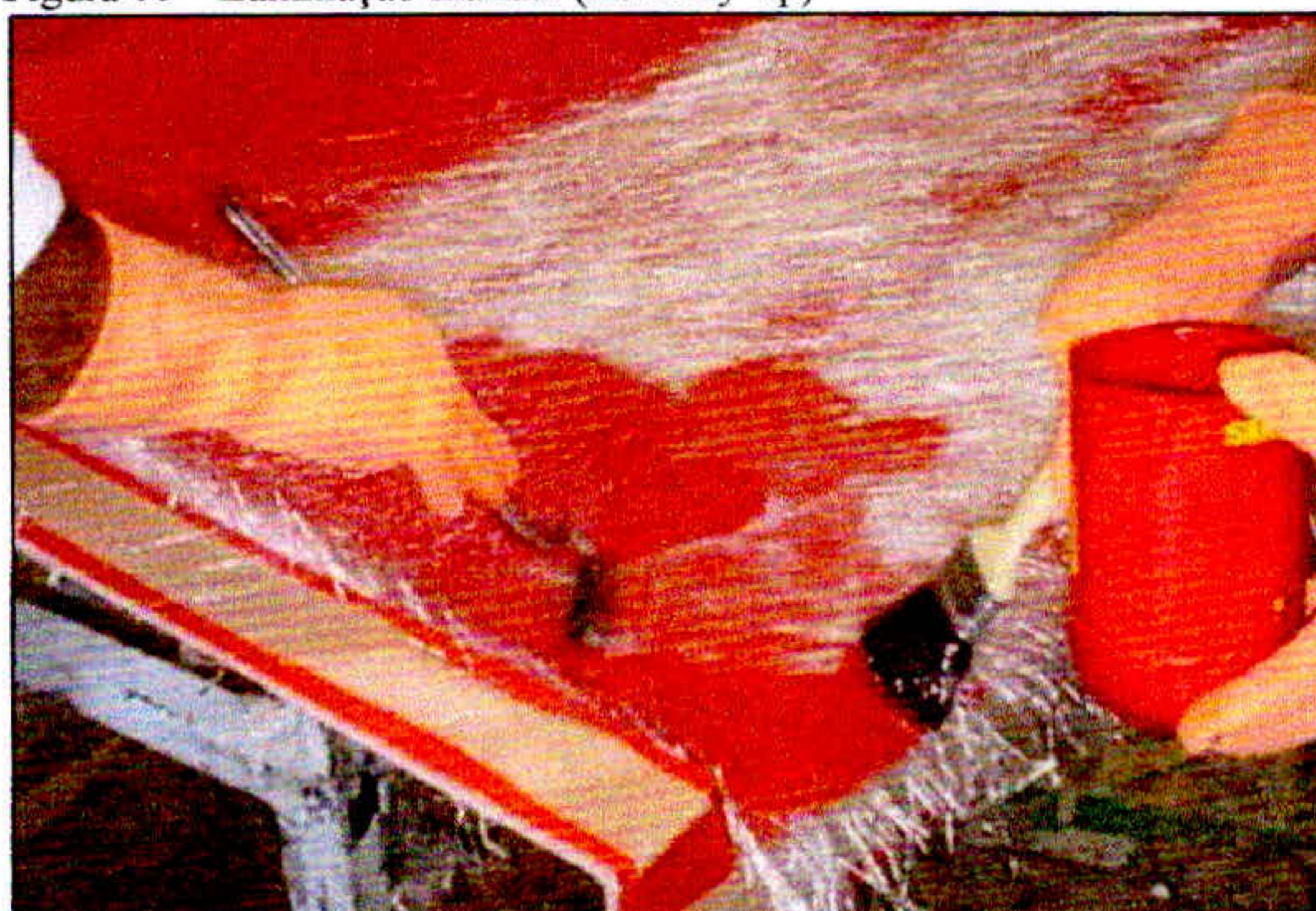
Terminada a cura, o laminado é desmoldado e preparado para receber as conexões ou ser unido a outras peças. A preparação é feita com ferramentas pneumáticas de lixamento e de corte. A montagem das conexões e as uniões com outras peças são feitas manualmente usando tiras de mantas e de tecidos. A montagem das conexões é descrita nas normas e especificações de equipamentos, como a ASME RTP-I.

A Figura 7 mostra o processo de laminação onde as fibras de vidro são alimentadas na pistola como mechas contínuas de roving, que são cortadas no picotador da laminadora e aplicada simultaneamente com a resina, devidamente preparada, é bombeada de tambores. O processo de laminação manual à pistola aplica apenas fibras picadas. Os tecidos de vidro, se usados, devem ser laminados manualmente.

### 2.2.3 Laminação manual (hand lay-up)

No processo de laminação manual, a resina, o véu, as mantas e os tecidos são aplicados manualmente. A resina, é claro, deve ser previamente ativada para curar na temperatura ambiente ou aplicada com laminadoras, com o picador desligado. A manta e o tecido são colocados no molde, um de cada vez. A roletagem do laminado deve ser feita com a resina no estado líquido.

Figura 08 – Laminação manual (hand lay-up)



Fonte: (O AUTOR)

A resina pode ser aplicada com rolos de pintor, pincéis ou com as laminadoras e, permanece líquida durante algum tempo (20 a 30 minutos) após a ativação, este tempo é conhecido como tempo de gel. Nesse intervalo, o laminador faz a compactação das lâminas e a remoção das bolhas de ar, utilizando rolos metálicos (esmeros) ou pincéis. O laminado é construído aplicando várias lâminas, uma de cada vez, todas impregnadas pela resina e devidamente compactadas. Depois de algum tempo a resina cura e a peça pode ser desmoldada.

O desmoldante e o liner são aplicados para a laminação com pistola. A barreira de corrosão é feita com pelo menos duas lâminas de manta M450, totalizando  $900 \text{ g/m}^2$  de fibras picadas, exatamente como na laminação a pistola. O laminado estrutural pode ser feito exclusivamente com mantas M450 ou intercalando lâminas de mantas M450 e de tecidos T600 ou T800 (CARVALHO, 2012).

Segundo Carvalho (2012) a laminação deve ser feita com pares de lâminas TM, onde T representa o tecido e M a manta. Considerando que a espessura padrão da manta M450 é 1,05 mm por lâmina, e a do tecido é 0,85 mm por lâmina, a espessura do par TM é  $1,05 + 0,85 = 1,90 \text{ mm}$ . A Figura 8 mostra a construção e a espessura padrão de laminados feitos por laminação manual. Observe que a última lâmina estrutural é feita com manta. O topcoat pode ser feito com ou sem véu de superfície.

O processo de laminação manual é usado para fazer peças especiais (conexões, flanges), tampas e fundos de tanques.

Figura 09 – Padrão de espessuras dos laminados feitos com laminação manual

Liner	Barreira de corrosão	Laminado estrutural	Topcoat (mm)	Espessura total (mm)
V	M + M	TM	0,3	4,70
V	M + M	TM + TM	0,3	6,60
V	M + M	TM + TM + TM	0,3	8,50
V	M + M	TM + TM + TM + TM	0,3	10,40
V	M + M	TM + TM + TM + TM + TM	0,3	12,30
V	M + M	TM + TM + TM + TM + TM + TM	0,3	14,20
—	—	—	—	—
—	—	—	—	—
V	M + M	$n \times TM$	0,3	$n \times 1,90 + 2,80$

Fonte: (CARVALHO, 2012)

#### 2.2.4 Enrolamento helicoidal (filament winding)

O processo conhecido como enrolamento helicoidal, ou filament winding, é mais sofisticado que a construção manual ou com pistola. A laminação é feita enrolando fibras UD em moldes cilíndricos ou cônicos conhecidos como mandris. Ao contrário das estruturas feitas manualmente ou com pistola, que praticamente não têm limitação geométrica, as feitas por enrolamento devem ter geometria adequada para receber as fibras de vidro UD (LIMA, 2009).

A laminação por enrolamento é usada principalmente para construir estruturas cilíndricas como tubos, dutos ou costados de tanques. A tampa, o fundo e as conexões de tanques são feitos separadamente, manualmente ou com pistola, para posterior montagem no costado cilíndrico, que é laminado por enrolamento (LIMA, 2009).

O liner é laminado sobre o mandril previamente tratado com desmoldante. Primeiro é aplicada a resina. O véu de superfície é colocado em seguida, para a resina líquida penetrar no véu de baixo para cima e remover o ar. O véu de superfície pode ser aplicado com a mão ou por enrolamento (CARVALHO, 2012).

A barreira de corrosão é feita laminando pelo menos  $900 \text{ g/m}^2$  de fibras picadas sobre o liner. Essas  $900 \text{ g/m}^2$  dão a espessura mínima (2,0 mm) que é necessária para a barreira de corrosão. As fibras picadas podem ser aplicadas manualmente com mantas, como normalmente é feito, ou com pistola. A barreira de corrosão deve ser roletada com esmero para remover as oclusões de ar (CARVALHO, 2012).

O enrolamento é usado apenas na construção do laminado estrutural, que é feito com fibras UD. As fibras UD são impregnadas com resina e enroladas sobre o mandril, descrevendo nele uma hélice de passo controlável. As estruturas feitas por enrolamento helicoidal geralmente têm geometria cônica ou cilíndrica, enquanto as feitas por laminação manual ou

com pistola não têm limitação geométrica (CARVALHO, 2012).

Os custos variáveis das estruturas enroladas são menores que os das estruturas de igual geometria feitas por outros processos. Isso acontece porque os equipamentos feitos por enrolamento têm menor espessura e usam menos mão-de-obra para a laminação. Por outro lado, os custos fixos podem ser mais elevados devido ao maior investimento em máquinas e equipamentos (LIMA, 2009).

O topcoat externo, a desmoldagem e a montagem, devem ser feitas como nos processos manual ou à pistola.

A figura 10 mostra o enrolamento das lâminas estruturais. As fibras UD passam por uma banheira onde são impregnadas com resina líquida devidamente catalisada e acelerada. Depois de impregnadas as fibras UD passam em um pente onde são agrupadas em faixa de largura adequada. Essa faixa segue para o cabeçote de alimentação e é finalmente enrolada no mandril giratório. O conjunto formado pela banheira, pente e cabeçote é acoplado a um carro que executa movimento no eixo paralelo ao eixo do mandril, indo e vindo, espessurando o laminado estrutural. A combinação da rotação do mandril com a translação do carro faz com que as fibras UD descrevam uma hélice de passo constante sobre o mandril (LIMA, 2009).

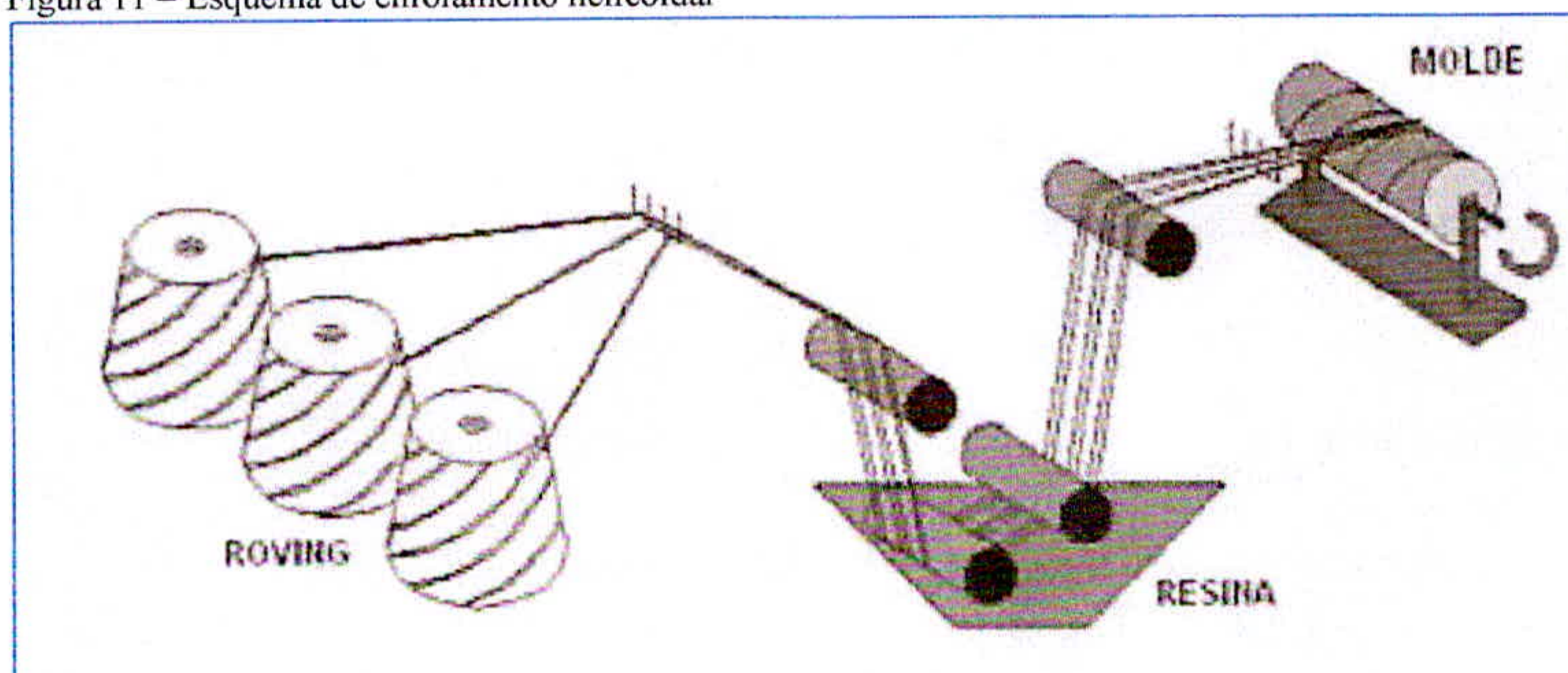
Figura 10 – Enrolamento helicoidal (Filament Winding)



Fonte: (LIMA, 2009)

A foto mostra a aplicação da primeira lâmina helicoidal de fibras UD sobre a barreira de corrosão. A barreira de corrosão deve ser umedecida com resina para melhor aderir às lâminas UD.

Figura 11 – Esquema de enrolamento helicoidal



Fonte: (CARVALHO, 2012)

A Figura 10 mostra o carro com a banheira e o cabeçote correndo paralelo ao eixo do mandril. A velocidade do cabeçote é controlada. O mandril gira com velocidade também controlada. O passo a hélice é definido como a distância percorrida pelo carro no mesmo tempo em que o mandril completa uma rotação. O ângulo de enrolamento das fibras UD e a largura da faixa são conhecidos. O ângulo de enrolamento é medido tomando como referência o eixo longitudinal "x" do mandril (CARVALHO, 2012).

### 2.2.5 Enrolamento circunferencial (hoop winding)

O enrolamento circunferencial é mais simples que o helicoidal e não exige combinações complexas de engrenagens para acionar o mandril, movimentar o carro e descrever as hélices de ângulos  $\pm \Theta$  do enrolamento helicoidal. O problema com o enrolamento circunferencial é que a largura da faixa de fibras UD deve ser ajustada para cada diâmetro a fim de manter fixo o ângulo de enrolamento. Essa limitação torna a largura da faixa proibitivamente grande para grandes diâmetros (LIMA, 2009).

De acordo com Carvalho (2012), a largura da faixa "w" é descrita pela Equação abaixo:

$$w = \pi r \phi \cos \theta \quad \text{Equação 1}$$

Por exemplo, para fazer o enrolamento circunferencial com  $\Theta = 70^\circ$  em um mandril com 2 metros de diâmetro a largura de faixa w deve ser:

$$w = \pi \times 200 \times \cos 70^\circ = 214 \text{ cm}$$

Assim, os cilindros de grandes diâmetros devem ser enrolados com máquinas helicoidais ou pelo processo hoop-chop.

Figura 12 – Esquema de enrolamento circunferencial



Fonte: (O AUTOR)

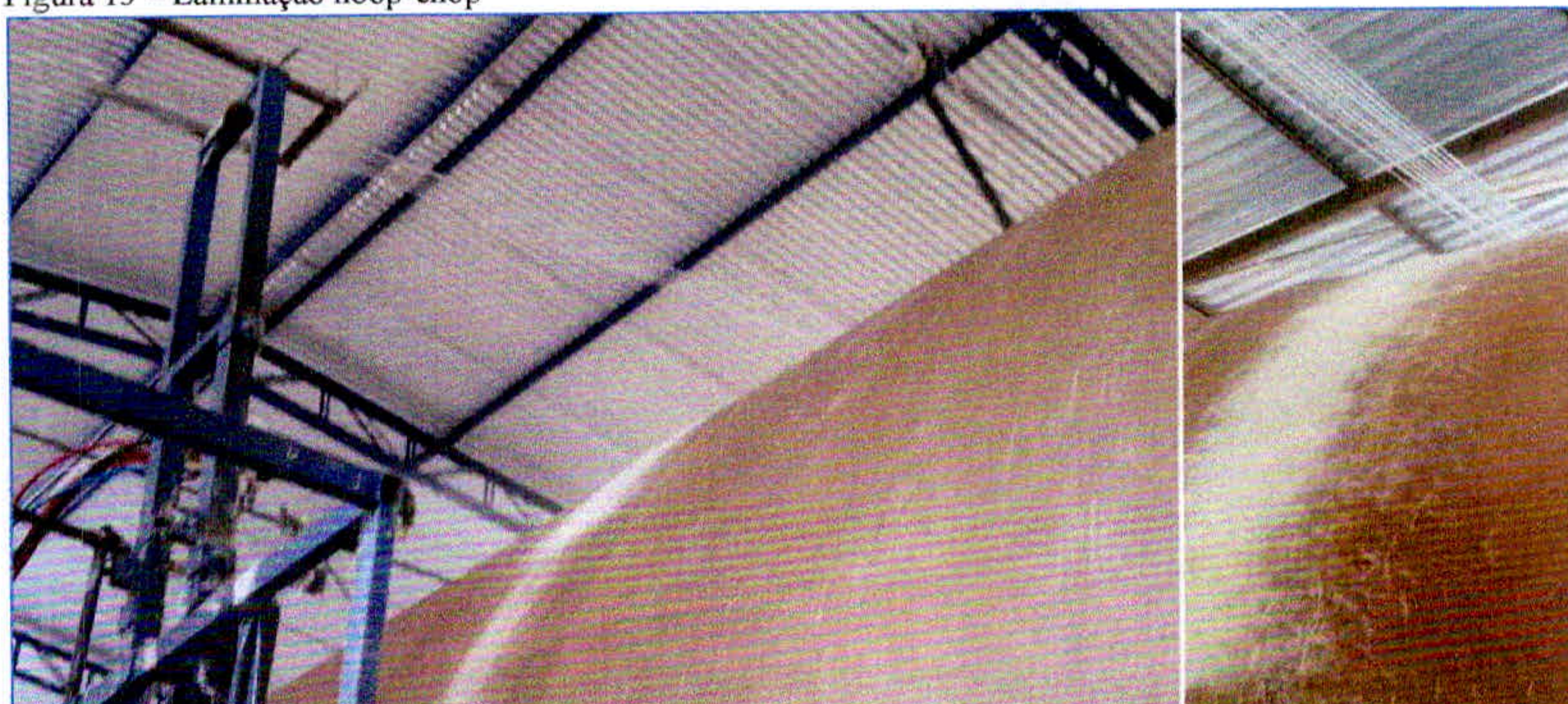
No processo de enrolamento circunferencial o mandril pode atingir a espessura especificada com apenas uma única passagem do carrinho. Para manter o ângulo de enrolamento, a largura da faixa deve variar com o diâmetro do mandril.

#### 2.2.6 Laminação hoop-chop

Os laminados com as fibras UD enroladas em ângulos próximos de  $90^\circ$  têm pouca resistência na direção axial e podem romper ou trincar durante o manuseio ou em uso. Para evitar isso, o fabricante pode incluir fibras picadas no laminado estrutural. O teor de fibras picadas deve ser estabelecido para dar ao cilindro a resistência axial desejada (LIMA, 2009).

O processo de laminação que combina fibras picadas e fibras UD é conhecido em inglês como "hoop-chop". Neste processo as fibras UD (contínuas) contribuem na resistência circunferencial do laminado, enquanto as fibras picadas resistem principalmente aos esforços axiais. O processo "hoop-chop" é muito usado para produzir tubos e tanques verticais ou horizontais de grandes diâmetros (CARVALHO, 2012).

Figura 13 – Laminação hoop-chop



Fonte: (O AUTOR)

### 2.3 Áreas de aplicação dos materiais compósitos

Os compósitos são utilizados nas mais diversas áreas como, construção civil, transportes, geração de energia eólica, náutica, aeroespacial e etc. Eles dão forma a mais de 40.000 produtos, catalogados, em todo mundo (LIMA, 2009).

#### 2.3.1 Construção Civil

A Figura 14 mostra perfis estruturais, feitos através do processo de pultrusão, sendo utilizados em estruturas onde normalmente se utilizam perfis metálicos.

Figura 14 – Estrutura para coberturas



Fonte: (LIMA, 2009)

Os perfis pultrudados não apresentam problemas como corrosão e também ficam mais leves que os perfis metálicos (ANDRADE S. et al., 2009).

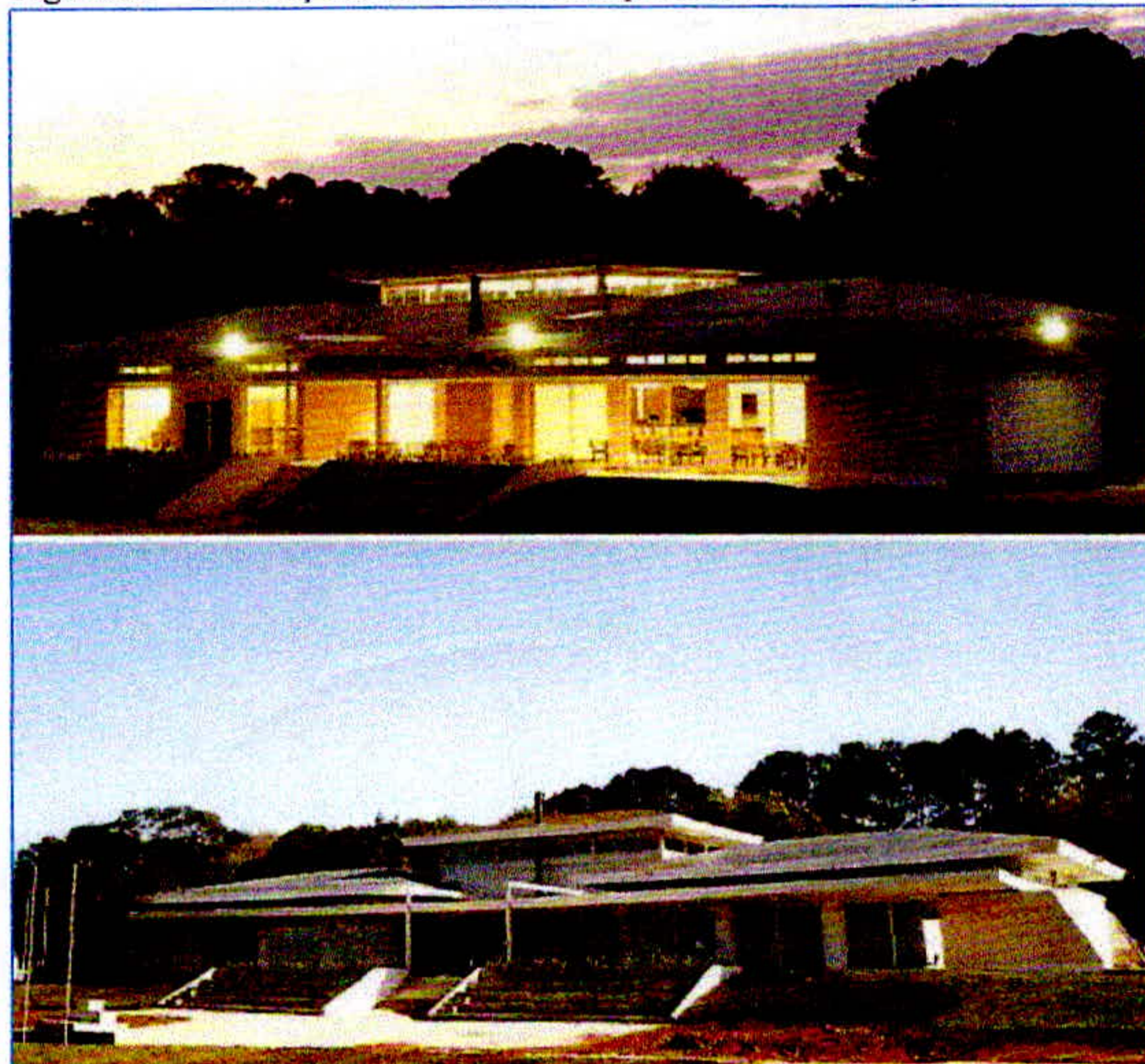
Figura 15 – Casas feitas através do processo de laminação contínua



Fonte: (LIMA, 2009)



Figura 16 – Edificações feitas através do processo de laminação contínua



Fonte: (LIMA, 2009)

### 2.3.2 Transportes

A Figura 17 mostra um micro-ônibus com peças feitas de compósitos, cuja a frente e a traseira foram fabricados pelo processo de laminação à pistola (spray-up) e o teto pelo processo vacuum bag. A Marcopolo atingiu a venda de 8.517 tetos no ano de 2009 (LIMA, 2009).

Figura 17 – Teto, frente e traseira fabricados com compósitos



Fonte: (LIMA, 2009)

Figura 18 – Capô e para-choque fabricado através do processo de RTM light



Fonte: (LIMA, 2009)

Figura 19 – Tanque para transporte de produtos perigosos



Fonte: (LIMA, 2009)

### 2.3.3 Náutico

A Figura 20 mostra um dos estaleiros da Intermarine, líder nacional em embarcações de luxo, fundada em 1973, já produziu e comercializou mais de 5.000 unidades. As lanchas são de 38 a 76 pés, e possuem peças fabricadas por laminação manual (hand lay-up) e infusão (LIMA, 2009).

Figura 20 – Lanchas com peças feitas com compósitos



Fonte: (LIMA, 2009)

Figura 21 – Jet ski com peças fabricadas por SMC e BMC



Fonte: (LIMA, 2009)

#### 2.3.4 Energia eólica

A Figura 22 mostra algumas turbinas eólicas para geração de energia. Várias peças das turbinas são fabricadas com compósitos, como as pás, naceles e protetores dos geradores (LIMA, 2009).

Figura 22 – Turbinas Eólicas



Fonte: (LIMA, 2009)

## 2.4 Propriedades mecânica dos laminados

Carvalho (2012) explica que para entender as propriedades mecânicas dos laminados, primeiro é necessário conhecer as propriedades das lâminas padrão, que têm teores de fibras bem definidos. As propriedades das lâminas padrão são determinadas por modelos matemáticos aplicáveis ou medidas em laboratório e são usadas para determinar as propriedades dos laminados padrão que por sua vez são usados para construir equipamentos padrão.

As laminadoras possuem regulagem para determinar o teor de resina e fibras aplicados, e é de extrema importância mantê-las calibradas para obter laminados conforme os padrões estabelecidos.

É impossível conhecer o teor real de resina antes da construção do equipamento, o mesmo só pode ser verificado após a fabricação do equipamento, realizando o teste de teor de cinzas.

### 2.4.1 Propriedades mecânicas das lâminas

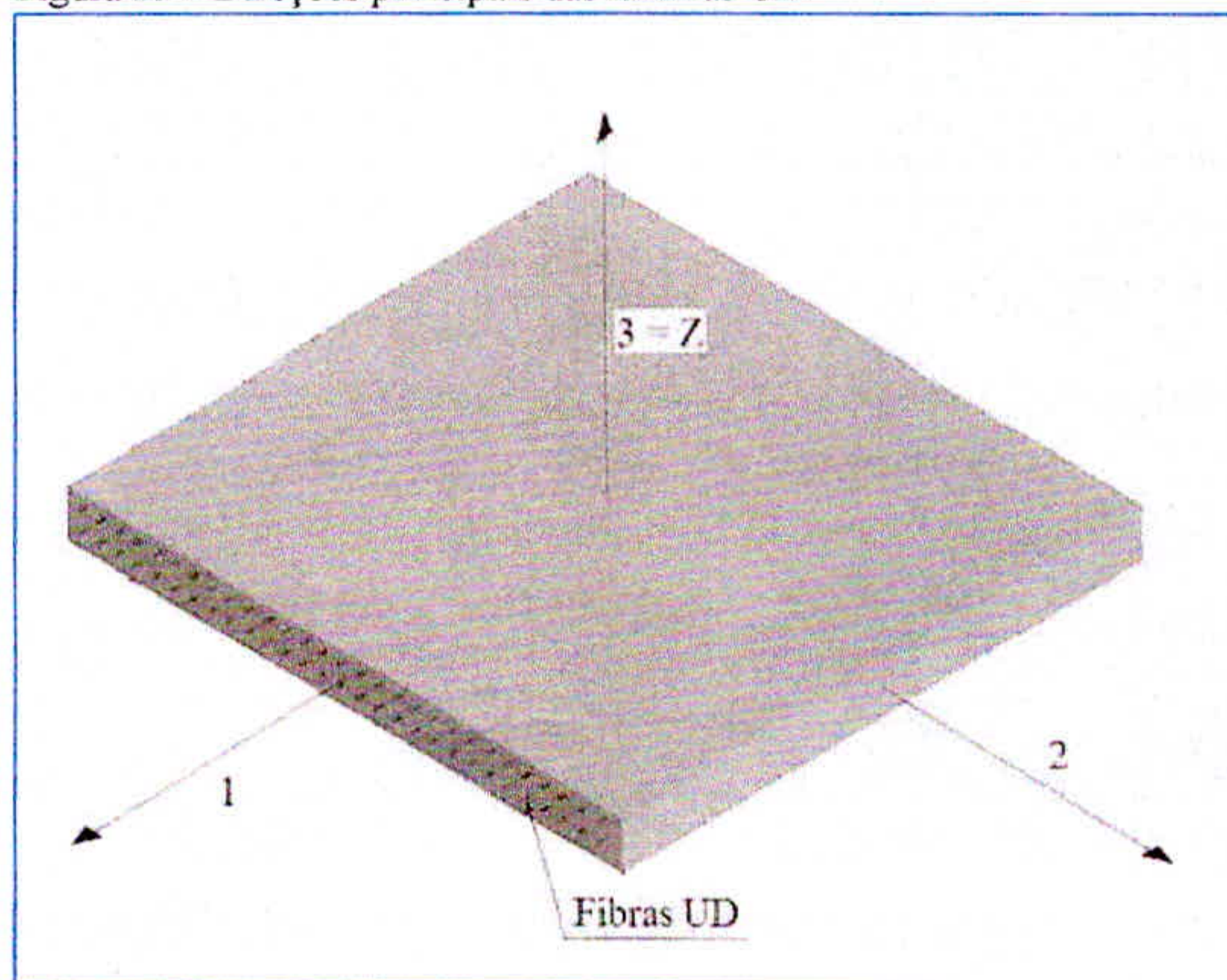
De acordo com Carvalho (2012) as quatro lâminas padrão de uso comercial são:

- a) Lamina com 30% de fibras picadas
- b) Lâmina com 600 g/m<sup>2</sup> ou 800 g/m<sup>2</sup> de fibras tecidas
- c) Lâmina com 70% de fibras contínuas unidirecionais
- d) Lâmina com 80% de areia.

Do ponto de vista macroscópico, as lâminas são homogêneas e têm as mesmas propriedades em qualquer ponto. Porém, essas propriedades podem variar com a direção. As lâminas feitas com fibras picadas ou com areia são isotrópicas e têm propriedades iguais em todas as direções. As feitas com fibras tecidas ou unidirecionais (UD) têm propriedades diferentes em direções distintas e por isso são chamadas de anisotrópicas. Portanto, as lâminas comerciais podem ser isotrópicas ou anisotrópicas, dependendo do arranjo das fibras (CARVALHO, 2012).

A Figura 23 mostra as direções principais 1,2 e 3 das lâminas UD, sendo que a direção 3 são ignoradas. A direção 1 é coincidente com as fibras e a direção 2 é perpendicular às fibras.

Figura 23 – Direções principais das laminas UD



Fonte: (CARVALHO, 2012)

Os arranjos de fibras tecidas e de fibras UD exibem um caso especial de anisotropia, conhecido como ortotropia. As lâminas ortotrópicas têm dois planos ortogonais de simetria. A interseção desses planos com a superfície média das lâminas define dois eixos, também ortogonais, chamados de direções principais (CARVALHO, 2012).

O eixo 1 das lâminas UD coincide com a direção das fibras e o eixo 2 é perpendicular a elas. Para as fibras tecidas, as direções 1 e 2 ficam respectivamente ao longo do urdume (comprimento do rolo) e da trama (largura do rolo). As lâminas de areia e de fibras picadas são isotrópicas e para elas não existem direções preferenciais, isto é, qualquer direção pode ser considerada principal (CARVALHO, 2012).

Já as lâminas UD são anisotrópicas e possuem propriedades diferentes nas duas direções ortogonais "x" e "y" a partir de suas propriedades nas direções principais 1 e 2.

A Figura 24 mostra as propriedades das quatro lâminas padrão citadas acima. Os laminados comerciais são feitos combinando essas lâminas. A combinação destas laminas formam os laminados comerciais que serão analisados a seguir.

Figura 24 – Propriedades mecânicas das lâminas padrão

	Tipo de lâmina				
	M450	Fibras tecidas		Fibras UD	Areia
		T600	T800		
Teor de vidro por peso	0,30	0,45	0,54	0,70	0,80
Teor de vidro por volume	0,17	0,27	0,35	0,52	0,70
Espessura (mm)	1,05	0,85	0,85	varia	varia
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,43	1,58	1,69	1,93	2,11
$E_1$ (kg/cm <sup>2</sup> )	70000	165000	180000	400000	60000
$E_2$ (kg/cm <sup>2</sup> )	70000	95000	160000	100000	60000
$\nu_{12}$	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
$\nu_{21}$	0,30	0,17	0,27	0,08	0,30
$G_{12}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	27000	35000	35000	35000	23000
$\alpha_1$ (1/°C)	$25 \times 10^{-6}$	$18 \times 10^{-6}$	$17 \times 10^{-6}$	$7,5 \times 10^{-6}$	$13 \times 10^{-6}$
$\alpha_2$ (1/°C)	$25 \times 10^{-6}$	$40 \times 10^{-6}$	$21 \times 10^{-6}$	$45 \times 10^{-6}$	$13 \times 10^{-6}$

Fonte: (CARVALHO, 2012)

Os laminados comerciais são feitos combinando essas lâminas. A resposta estrutural dos laminados depende das propriedades destas lâminas que entram em sua construção.

Carvalho (2012) explica que as propriedades mecânicas das lâminas são estimadas a partir das propriedades das fibras e das resinas. Os cálculos são feitos usando fórmulas de micromecânica que levam em conta o arranjo e o teor volumétrico das fibras. Os resultados obtidos são muito precisos e dispensam ensaios de laboratório.

As quatro laminas padrão podem ser combinadas de várias maneiras, possibilitando a criação de um número enorme de laminados diferentes, cada um com propriedades diferentes.

A Figura 25 apresenta as principais combinações utilizadas.

Figura 25 – Combinações de lâminas padrão

Processo	Lâminas usadas
Laminação manual	Fibras picadas Fibras tecidas
Laminação com pistola	Fibras picadas
Laminação hoop – chop	Fibras picadas Fibras UD Areia
Enrolamento helicoidal	Fibras UD Areia

Fonte: (CARVALHO, 2012)

## 2.4.2 Laminados padrão de fibras picadas

Figura 26 – Propriedades mecânicas das lâminas picadas

$E_x$	$70.000\text{kg/cm}^2$
$E_y$	$70.000\text{kg/cm}^2$
$G_{xy}$	$27.000\text{kg/cm}^2$
$\nu_{yx}$	0,30
$\nu_{xy}$	0,30
$\alpha_x$	$25,0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
$\alpha_y$	$25,0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

Fonte: (CARVALHO, 2012)

## 2.4.3 Laminados padrão combinando M450 e T600

Figura 27 – Propriedades mecânicas dos laminados com M450 e T600

$E_x$	$81.100\text{kg/cm}^2$
$E_y$	$112.500\text{kg/cm}^2$
$G_{xy}$	$30.500\text{kg/cm}^2$
$\nu_{yx}$	0,30
$\nu_{xy}$	0,22
$\alpha_x$	$30 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
$\alpha_y$	$22 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

Fonte: (CARVALHO, 2012)



## 2.4.4 Laminados padrão combinando M450 e T800

Figura 28 – Propriedades mecânicas dos laminados com M450 e T800

$E_x$	$110.200\text{kg/cm}^2$
$E_y$	$119.200\text{kg/cm}^2$
$G_{xy}$	$30.500\text{kg/cm}^2$
$\nu_{yx}$	0,30
$\nu_{xy}$	0,30
$\alpha_x$	$23 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
$\alpha_y$	$21 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

Fonte: (CARVALHO, 2012)

## 2.4.5 Laminados hoop-chop sem areia

Figura 29 – Propriedades mecânicas dos laminados hoop-chop sem areia

$E_x$	$110.200\text{kg/cm}^2$
$E_y$	$267.600\text{kg/cm}^2$
$G_{xy}$	$40.700\text{kg/cm}^2$
$\nu_{yx}$	0,30
$\nu_{xy}$	0,12
$\alpha_x^*$	$33 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
$\alpha_y^*$	$12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

Fonte: (CARVALHO, 2012)

2.4.6 Laminados padrão helicoidal com  $\Theta 55^\circ$ Figura 30 – Propriedades mecânicas dos laminados helicoidal com  $\Theta 55^\circ$ 

$E_x$	93.100kg/cm <sup>2</sup>
$E_y$	165.200kg/cm <sup>2</sup>
$G_{xy}$	101.000kg/cm <sup>2</sup>
$\nu_{yx}$	0,73
$\nu_{xy}$	0,41
$\alpha_x$	33x10 <sup>-6</sup> /°C
$\alpha_y$	33x10 <sup>-6</sup> /°C

Fonte: (CARVALHO, 2012)

2.4.7 Laminados padrão helicoidal com  $\Theta 70^\circ$ Figura 31 – Propriedades mecânicas dos laminados helicoidal com  $\Theta 70^\circ$ 

$E_x$	92.800kg/cm <sup>2</sup>
$E_y$	298.200kg/cm <sup>2</sup>
$G_{xy}$	66.000kg/cm <sup>2</sup>
$\nu_{yx}$	0,59
$\nu_{xy}$	0,18
$\alpha_x$	35x10 <sup>-6</sup> /°C
$\alpha_y$	35x10 <sup>-6</sup> /°C

Fonte: (CARVALHO, 2012)

### 3 CONCLUSÃO

Após o desenvolvimento deste trabalho concluí a importância dos materiais compósitos para engenharia. Com estes materiais é possível desenvolver vários tipos de projetos ligados a áreas de construção civil, transportes, geração de energia, náutico e principalmente para área industrial, onde o material é amplamente aplicado.

Conhecer melhor a composições dos laminados, suas propriedades mecânicas, como eles são processados, realmente não é tarefa fácil, porém é de suma importância para trabalhar com estes materiais.

Ficou comprovado, através das tabelas de propriedades mecânicas de cada laminado, extraídas do livro “Compósitos para uso Industrial” que o tipo ou orientação das fibras de vidro alteram as propriedades do material, podendo o laminado ter propriedades isotrópicas ou anisotrópicas. Devido esta característica dos laminados, é de extrema importância a avaliação prévia das solicitações de cada projeto, por exemplo, o caso onde a solicitação circunferencial for alta e a solicitação axial for nula, no caso um tanque submetido a carga hidrostática com fundo chato completamente apoiado, devemos optar por laminados com fibras UD e enrolamento circunferencial, pois o módulo de elasticidade na direção circunferencial é alto e na direção axial deve suportar apenas o manuseio do equipamento, isto se deve ao ângulo de enrolamento ser praticamente  $90^\circ$ , uma espécie de mola.

Pude concluir que os processo de fabricação apresentados neste trabalho são aplicados mais à fabricação de tanques e tubos, para aplicações industriais, porém existem vários outros processos para fabricação de peças fabricadas em compósitos, mais sofisticados, que propiciam laminados com resistência superior, geram menos resíduos e o acabamento é extremamente melhor.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE S. et al. **Compósitos I: Materiais, Processos, Aplicações, Desempenho e Tendências**. 1 ed. São Paulo: ABMACO, 2009.

CARVALHO A. **Compósitos 5: Mercado**. 1 ed. São Paulo: ABMACO, 2009.

CARVALHO A. **Compósitos para uso industrial**. 1 ed. São Paulo: ALMACO, 2012.

LIMA G. **Compósitos 2: Tecnologia de processos**. 1 ed. São Paulo: ABMACO, 2009.

LIMA G. **Compósitos 3: Mercado**. 1 ed. São Paulo: ABMACO, 2009