

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA**

**DIOGO BRUSTOLIN LUDWIG**

**PROJETO DE MECANISMO TENSIONADOR DE FIBRAS PARA  
MÁQUINA DE ENROLAMENTO FILAMENTAR.**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CORNÉLIO PROCÓPIO  
2014**

**DIOGO BRUSTOLIN LUDWIG**

**PROJETO DE MECANISMO TENSIONADOR DE FIBRAS PARA  
MÁQUINA DE ENROLAMENTO FILAMENTAR.**

Trabalho de conclusão de curso apresentada à  
Coordenação de Mecânica da Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do  
título de Engenheiro Industrial Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Amauri Bravo Fereda

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2014**

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

DIOGO BRUSTOLIN LUDWIG

### **PROJETO DE MECANISMO TENSIONADOR DE FIBRAS PARA MÁQUINA DE ENROLAMENTO FILAMENTAR.**

Trabalho apresentado como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Industrial Mecânico a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio.

---

Prof. Dr. Amauri Bravo Ferneda  
Professor Orientador  
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

---

Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa  
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

---

Prof. Msc. José Aparecido Lopes Júnior  
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

Cornélio Procópio, 11 de fevereiro de 2014

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família e os amigos que estiveram ao meu lado durante toda essa etapa da universidade,

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais Marcos e Maria Clara e aos meus irmãos Daniel e Débora e a toda a minha família que sempre estiveram ao meu lado e me apoiaram nas minhas escolhas desde o começo.

Agradeço ao professor Amauri Bravo Ferneda pela orientação e por ter dedicado parte do seu tempo para o auxílio na elaboração desse trabalho.

Agradeço também aos meus amigos e colegas da UTFPR-CP que sempre estiveram prontos para me ajudar durante todo o período da graduação e também meus amigos da minha cidade natal que sempre estiveram comigo apesar da distancia.

## RESUMO

LUDWIG, Diogo Brustolin. Projeto mecânico (ou sistema) tensionador de fibras para máquina de Filament Winding. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Unidade Cornélio Procópio. Cornélio Procópio, 2014.

Com o passar do tempo e a evolução da tecnologia em áreas como aeronáutica, aeroespacial, automobilística, petroleira, bioengenharia, construção civil, artigos esportivos entre outros, houve uma necessidade de conciliar a utilização de matérias cada vez mais eficientes com uma diminuição do peso dos componentes e estruturas e em algumas áreas o preço dos materiais utilizados, com isso surgiram os materiais compósitos. Para a fabricação desses materiais compósitos existem vários processos de manufatura.

Este trabalho tem como objetivo o projeto de um mecanismo tensionador de fibras para uma máquina de enrolamento filamentar, um dos processos de fabricação de compósitos utilizado para a manufatura de componentes de revolução como tubos e vasos, como parcela para o projeto e construção de uma máquina no laboratório de projetos da UTFPR – campus Cornélio Procópio.

**Palavras-chave: compósito, enrolamento filamentar, tensionador de fibras**

## **ABSTRACT**

LUDWIG, Diogo Brustolin. Mechanical Project (or system) fiber tensioner for the machine of Filament Winding. 2013. Final Graduation Paper (Bachelor in Industrial Mechanical Engineering) –Federal Technology University of Paraná – Campus Cornélio Procópio. Cornélio Procópio, 2014

With the passage of time and technology evolution in fields like aeronautics, aerospace, automobile, oil, bioengineering, construction, sporting goods and others, there is a necessity to use new materials that are more efficient and reduce components and structural weights or reduce price in some aspects , for those reasons composites were invented.

There is a variety of manufacturing process to obtain composites materials, in this paper the objective it is to project a fiber tensioner for a Filament Winding machine, that is one of the processes to manufactory composite materials in revolution format as tubes and vessels, as part of an project and construction of the machine in the project laboratory of UTFPR - Cornélio Procópio Campus.

**Key-words: composite, filament winding, fibers tensioner**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de um processo de <i>Filament Winding</i> - FONTE: CORE-MATERIALS(2013).....	14
Figura 2 - Classificação dos compósitos sintéticos e naturais - FONTE: NETO (2006) .....	16
Figura 3 - Lâminas com diferentes tipos de reforços - FONTE: NETO (2006) .....	17
Figura 4 - Relação entre baixo custo e desempenho estrutural de algumas áreas - FONTE: NETO (2006).....	18
Figura 5 - Relação entre 3 fatores para compósitos utilizados nas áreas biomédicas e construção civil - FONTE: NETO (2006) .....	19
Figura 6 - Comparação entre o comportamento mecânica dos materiais isotrópico e compósitos - FONTE: NETO (2006).....	20
Figura 7 - Esquema do processo de obtenção de fibras de vidro - FONTE: MENDONÇA (2005).....	22
Figura 8 - Forro de PVC - FONTE: THERMOFORRO (2013) .....	24
Figura 9 - Processo de moldagem manual na indústria - FONTE: FASSMER (2013) .....	27
Figura 10 - Esquema de um processo de moldagem por asperção - FONTE: MOLDED FIBER GLASS (2013) .....	27
Figura 11 - Esquema de um processo de manufatura de pré-impregnados. FONTE: NETO (2006).....	29
Figura 12 - Esquema de um processo contínuo de manufatura de pré-impregnados com matriz termorrígida - FONTE: NETO (2006).....	30
Figura 13 - Esquema do processo de autoclave em laboratório - FONE: NETO(2006) .....	31
Figura 14 - Esquema das etapas do processo de compressão - FONTE: NETO (2006).....	32
Figura 15 - Etapas do processo de pultrusão - FONTE: FIBROLUX (2013) .....	33
Figura 16 - Esquema de um processo de injeção de compósitos - FONTE: ENGEPLAS (2013).....	34
Figura 17 - Mandril de uma máquina de <i>Filament Winding</i> - FONTE: VEM (2013)..	37
Figura 18 - Fibras dispostas em prateleiras paralelas - FONTE: DIRECTINDUSTRY (2013).....	38



Figura 19 - Bico dosador estático - FONTE: TENAZPLASTICOS (2013) .....	39
Figura 20 - Sistema tensionador utilizado em indústrias aeroespaciais - FONTE: HELMAN (2014) .....	40
Figura 21 - Tensionador mecânico. FONTE: COILWINDING (2014) .....	41
Figura 22 - Esquema do funcionamento do tensionador mecânico. FONTE: COILWINDING (2014).....	41
Figura 23 - Tensionador magnético. FONTE: COILWINDING (2014) .....	42
Figura 24 - Esquema de um tensionador magnético. FONTE: COILWINDING (2014) .....	43
Figura 25 - Sistema de tensionamento de fitas transportadoras. FONTE: ACERVO PRÓPRIO.....	44
Figura 26 - Rolamentos de esferas blindados. FONTE: CRB (2014) .....	46
Figura 27 - Montagem do carrinho. FONTE: ACERVO PRÓPRIO.....	46
Figura 28 - Aparato tensionador de fibras. FONTE: ACERVO PRÓPRIO .....	47
Figura 29 - Esquema do sistema tensionador - FONTE: ACERVO PRÓPRIO .....	48
Figura 30 - Desenho esquemático da posição da fibra FONTE: ACERVO PRÓPRIO .....	48
Figura 31 - Diagrama das forças aplicadas no carrinho - FONTE: ACERVO PRÓPRIO.....	49

## LISTA DE TABELA

Tabela 1- Tabela com a composição dos principais tipos de fibra de vidro - FONTE: NETO (2005).....	21
Tabela 2- Composição química e aplicações de alguns tipos de aços inox. FONTE: Sinox(2013).....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	13
1.2	OBJETIVO.....	14
1.2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.2	MATERIAIS COMPÓSITOS .....	16
2.2.1	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS .....	17
2.3	COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS .....	20
2.3.1	FIBRAS DE VIDRO .....	20
2.3.2	FIBRAS DE CARBONO E GRAFITE.....	22
2.3.3	FIBRAS CERÂMICAS .....	23
2.4	MATRIZES PARA COMPÓSITOS.....	23
2.4.1	POLÍMEROS .....	23
2.4.1.1	POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS .....	24
2.4.1.2	POLÍMEROS TERMORRÍGIDOS .....	24
2.5	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO .....	25
2.5.1	MOLDAGEM MANUAL ( <i>HAND LAY-UP</i> ) .....	26
2.5.2	MOLDAGEM POR ASPERSÃO ( <i>SPRAY-UP</i> ) .....	27
2.5.3	MOLDAGEM A VÁCUO ( <i>VACUUM BAG</i> ) .....	28
2.5.4	PRÉ-IMPREGNADOS .....	28
2.5.5	MOLDAGEM EM AUTOCLAVE/HIDROCLAVE .....	30
2.5.6	MOLDAGEM POR COMPRESSÃO .....	31
2.3.7	PULTRUSÃO ( <i>PULTRUSION</i> ) .....	33
2.5.8	PROCESSO DE INJEÇÃO PARA MANUFATURA DE COMPÓSITOS ..	33
2.6	EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE <i>FILAMENT WINDING</i> .....	34
3.	ENROLAMENTO FILAMENTAR ( <i>FILAMENT WINDING</i> ) .....	36
3.1	ETAPAS DO PROCESSO.....	36
3.1.1	MANDRIL .....	36
3.1.2	FIBRAS .....	37
3.1.3	RESINA.....	38
3.1.4	SPRAY-UP .....	38

3.1.5 BICO MISTURADOR ESTÁTICO.....	38
4. SISTEMA DE TENSIONAMENTO DE FIBRAS.....	39
4.1 COMPONENTES E MONTAGEM.....	44
4.2 FUNCIONAMENTO.....	47
5. CONCLUSÃO.....	50
6. REFERENCIAS.....	51
Apêndice A - Desenhos técnicos do aparato tensionador.....	53

## 1. INTRODUÇÃO

Os materiais vem sendo usados como uma forma de melhorar a vida do ser humano. Alguns dos materiais mais comuns que podemos citar são: aço, vidro, plástico, borracha, alumínio, entre outros. Esses materiais podem ser classificados como materiais metálicos, materiais poliméricos e materiais cerâmicos. Porém atualmente deve-se incluir a essa classificação um tipo de material que exige uma grande importância tecnológica, os materiais compósitos.

Com a evolução nos estudos dos materiais compósitos muitas conquistas tecnológicas foram possíveis principalmente em aplicações relevantes tanto nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, naval, bioengenharia, entre outras áreas de grande importância e crescimento no contexto atual.

Os materiais compósitos tem por característica básica a combinação de pelo menos dois materiais a nível macroscópico, sendo um a matriz que envolve um ou vários outros materiais chamados de reforço, sem que ocorra uma reação química entre eles, podendo ser identificados fisicamente por uma interface bem definida. Esses materiais compósitos obtidos a partir de reforços contínuos apresentam uma alta resistência a vários tipos de corrosão, um grande desempenho estrutural e também uma de suas principais vantagens é o seu peso que pode chegar a 4 vezes mais leves que ligas metálicas (Neto, 2006).

Em vários casos os compósitos podem apresentar um efeito sinérgico, ou seja, os materiais combinados apresentam propriedades especiais que nenhum deles apresentaria separadamente. Um exemplo são reforços individuais compostos por filamentos muito resistentes, rígidos e leves, se fossem utilizados sem uma matriz que os juntassem, protegessem e estabilizassem geometricamente só poderiam ser utilizados em componentes que fossem submetidos apenas a esforços de tração. Com a união da matriz e do reforço para a obtenção dos compósitos essas propriedades que se encontram em materiais diferentes são encontradas em um único material assim como também há a adição de outras características que nenhum dos componentes tanto da matriz como do reforço apresentavam anteriormente.

Com as diversas áreas de aplicação dos compósitos também surgem vários processos para o fabricação desses materiais dependendo das necessidades

de cada aplicação, dentro desses processos destacamos o processo de enrolamento filamental, que consiste em um processo para a manufatura de componentes de revolução como por exemplo tubos e vasos, onde as fibras depois de tensionadas passam por um banho de resina e são enroladas em um mandril giratório como pode ser visto na figura abaixo.

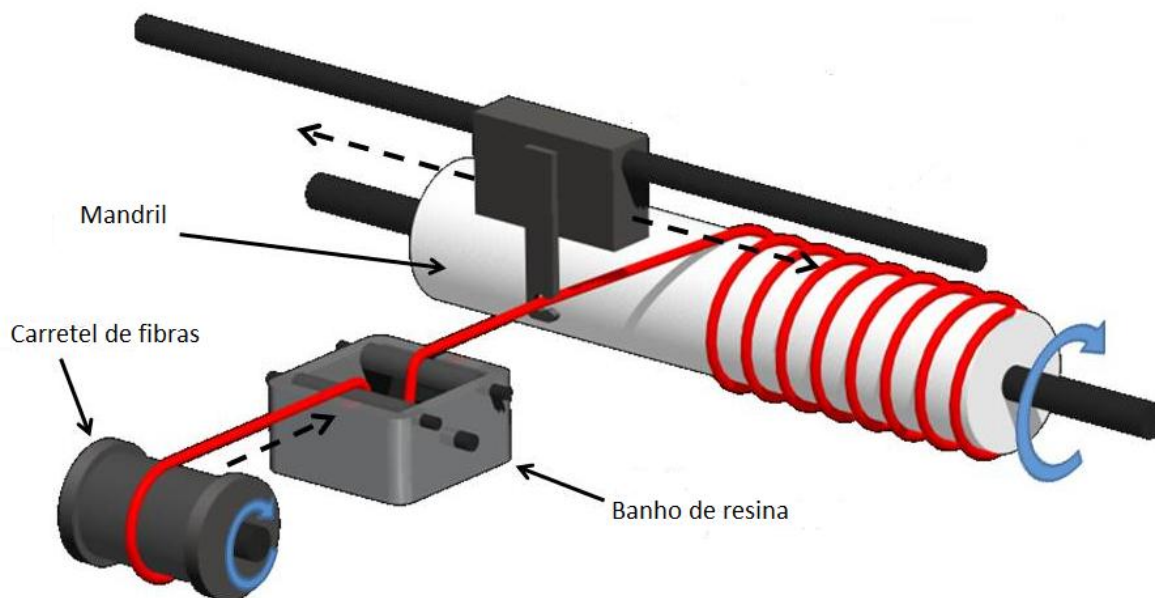


Figura 1 - Esquema de um processo de *Filament Winding* - FONTE: CORE-MATERIALS(2013)

## 1.2 OBJETIVO

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo estudar os processos de manufatura dos materiais compósitos, o equipamento de Enrolamento Filamental (*Filament Winding*) e propor um modelo de mecanismo tensionador de fibras. Dentre todos os processos de manufatura de componentes compósitos o processo de enrolamento filamental vem sendo usado desde os primórdios da indústria de compósitos e tem se mostrado um método eficiente para a manufatura de componentes de revolução ou axissimétricos (Neto, 2006).

Com o estudo do processo poderemos chegar a um modelo de tensionador de fibras que fará parte do equipamento todo e num futuro poderá ser utilizado no laboratório da Universidade.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem como objetivos específicos os itens relacionados abaixo:

- destacar a área de tração das fibras dentro do processo de enrolamento filamental (*Filament Winding*);
- será feito um estudo dos compósitos, seus processos de fabricação, aprofundando no processo de enrolamento filamental;
- por final, projetar um mecanismo tensionador de fibras (que tem como função obter o controle da tração nas fibras e reduzir sua degradação durante o enrolamento). Para isso, executar modelos e desenhos para um aparato proposto onde será abordada a utilização de conceitos e materiais simples para que possa ser executado na Universidade pelos próprios alunos e tenha um custo reduzido.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Em um contexto amplo os compósitos podem ser divididos em naturais e sintéticos. Dentro dos sintéticos considerando as classes relacionadas com as opções de matriz podem-se enumerar uma série de outras classificações que vem dos tipos de arranjos dos reforços, como pode ser visto na figura 2, assim como também apresenta os compósitos relacionados ao corpo humano (compósitos naturais). Os reforços dos compósitos podem ser do tipo fibras ou partículas. Caso o reforço seja do tipo fibra elas podem ser classificadas em multiaxiais, camadas únicas ou lâminas e multicamadas. Para os de camada única há uma classificação em fibras contínuas que em seguida podem ser classificadas em unidirecionais e bidirecionais e fibras curtas que também são divididas em aleatórias e orientadas (Neto, 2006).

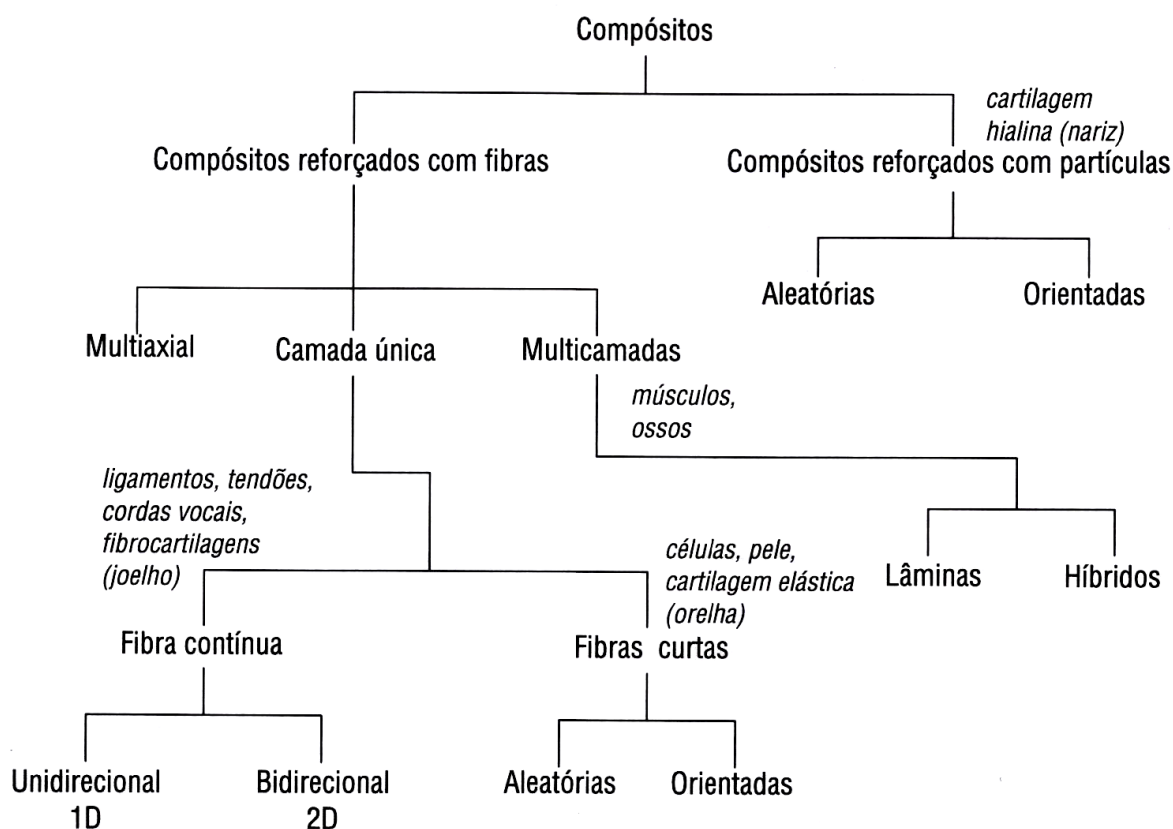


Figura 2 - Classificação dos compósitos sintéticos e naturais - FONTE: NETO (2006)



Já as multicamadas são classificadas em lâminas onde um único tipo de fibra é utilizado na obtenção do compósito e em híbridos onde duas ou mais fibras são utilizadas ou até mesmo onde o compósito é constituído de laminas metálicas intercaladas com laminas de compósitos. A figura 3 apresenta alguns casos particulares de lâminas compósitas.

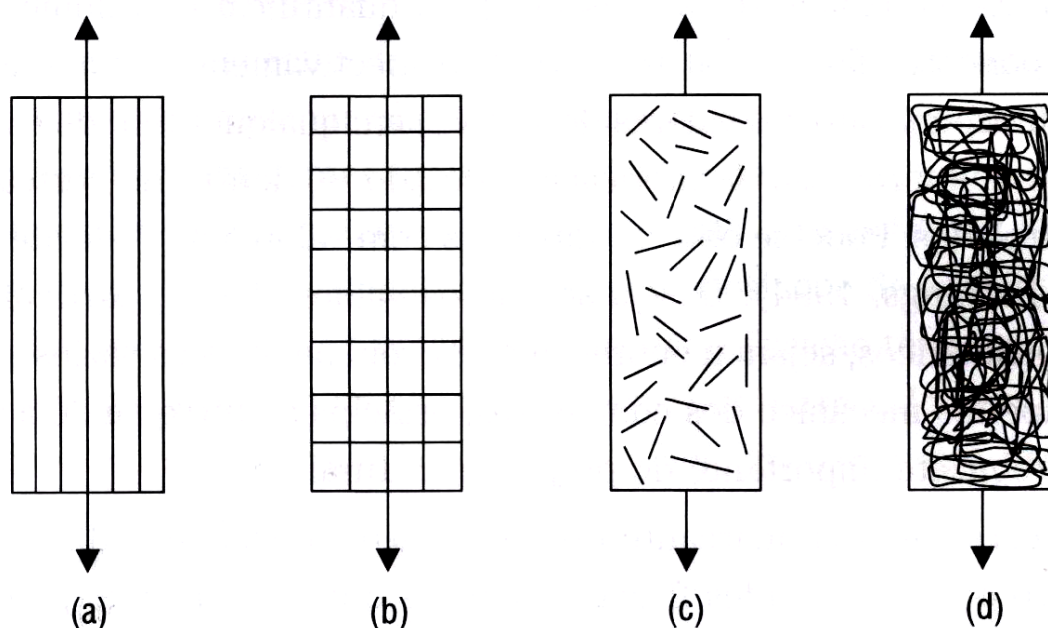


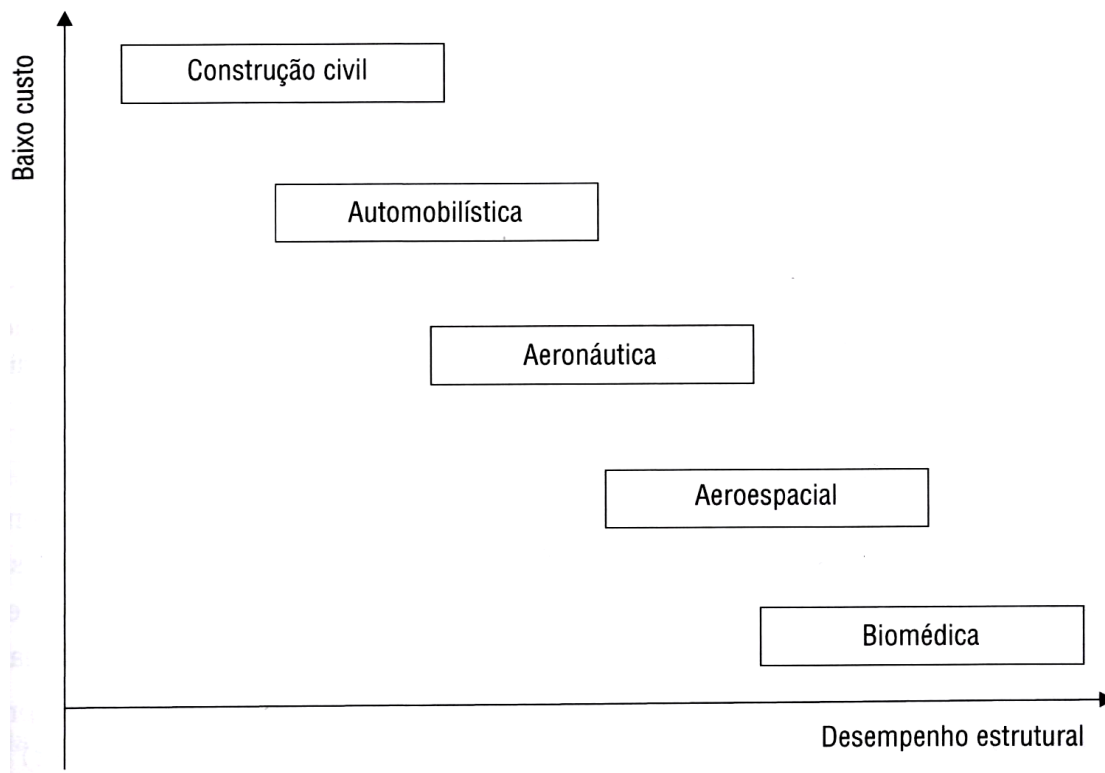
Figura 3 - Lâminas com diferentes tipos de reforços - FONTE: NETO (2006)

Outros fatores que são determinantes no desempenho de um compósito em relação as solicitações que podem ser exigidas são as frações volumétricas de fibras ( $V_f$ ), matriz ( $V_m$ ) e vazios ( $V_v$ ). Esses parâmetros são usados para quantificar os volumes percentuais de cada componente em relação ao volume total de um compósito. Os valores de  $V_f$  e  $V_m$  são determinados pelo processo de fabricação adotado e dentro de certos limites podem ser controlados (Neto, 2006).

### 2.2.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

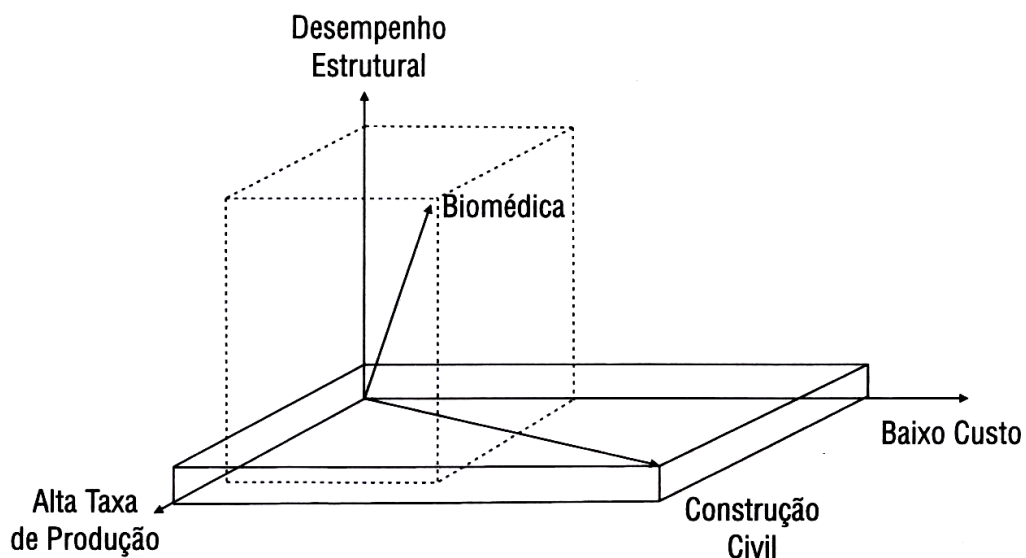
Os materiais compósitos apresentam uma grande diversidade de características entre si, e o seu uso depende de diversos fatores como por exemplo o desempenho estrutural e preço. Pelo fato desses materiais terem uma ampla utilização em diversos setores da indústria, o desempenho estrutural e o baixo custo são fatores que separam os compósitos em diferentes graus de importância como representado na figura 4, nos setores de biomedicina e aeroespacial por exemplo há

uma preocupação maior em relação ao desempenho estrutural do que com o custo do material, já na construção civil e automobilismo o fator de maior importância é o baixo custo, porém nunca deixando de lado o desempenho estrutural (Neto, 2006).



**Figura 4 - Relação entre baixo custo e desempenho estrutural de algumas áreas - FONTE: NETO (2006)**

Outro fator que pode ser adicionado aos anteriores é a cadência de produção, por exemplo nos setores aeronáutico e aeroespacial além das necessidades estruturais citadas acima não são necessários ciclos de produção rápidos e de alto volume como na construção civil. A figura 5 ilustra a comparação entre duas áreas e a importância de cada fator.



**Figura 5 - Relação entre 3 fatores para compósitos utilizados nas áreas biomédicas e construção civil - FONTE: NETO (2006)**

Apesar das características dos compósitos variarem significativamente entre os diversos tipos há alguns aspectos relevantes que são comuns a inúmeros tipos de compósitos como a relação entre tensões e deformações. Diferente dos materiais isotrópicos as aplicações exclusivas de tensões normais podem nos compósitos apresentar além das deformações normais também distorções angulares. A figura 6 mostra a comparação entre o comportamento mecânico de materiais isotrópicos e compósitos.

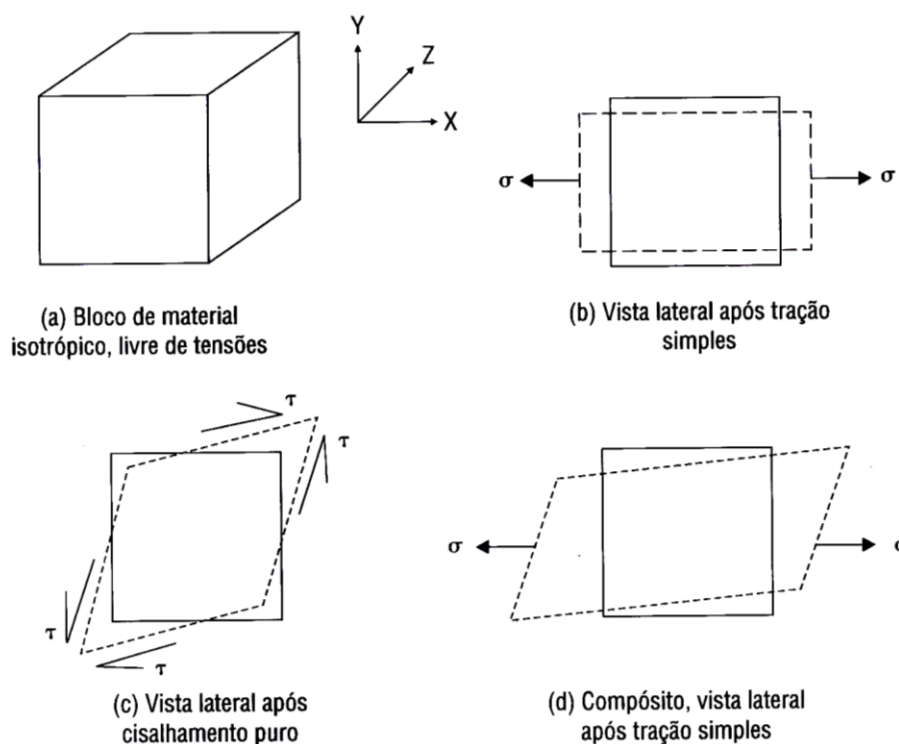


Figura 6 - Comparação entre o comportamento mecânica dos materiais isotrópico e compósitos - FONTE: NETO (2006)

## 2.3 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Para MENDONÇA (2005) a principal razão em se utilizar fibras como reforço é o fato conhecido através de experimentos de que a resistência de um material em forma de fibras é significativamente maior do que o mesmo material em forma de blocos. Um exemplo é o vidro comum utilizado em janelas, os valores de resistência à ruptura são na faixa de 0,7 GPa, já o mesmo vidro em forma de fibras, apresentam uma resistência de 3,5 GPa ou até mesmo podem chegar a resistências de 4,6 GPa dependendo do tipo de fibra.

MENDONÇA (2005) traz que esse fenômeno foi pela primeira vez demonstrado por Griffith em 1920, quando ele mediu a resistência de barras de vidro e observou que a resistência aumentava com a redução da espessura da fibra.

### 2.3.1 FIBRAS DE VIDRO

A fibra de vidro é o tipo de fibra mais utilizado em compósitos com matrizes poliméricas, pois apresenta como principais características o seu baixo

custo, alta resistência a tração e grande inércia química. As desvantagens estão associadas ao baixo módulo de elasticidade, baixa resistência a abrasão e baixa resistência a fadiga. Na tabela 1 podemos ver as composições típicas das fibras de vidro (Neto, 2006).

Constituintes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O
Vidro E	55,2	14,8	7,3	3,3	18,7	–
Vidro C	65	4	5	3	14	8,5
Vidro S	65	25	–	10	–	–

**Tabela 1- Tabela com a composição dos principais tipos de fibra de vidro - FONTE: NETO (2005)**

MENDONÇA (2005) apresenta o processo de fabricação das fibras de vidro, que segue as etapas abaixo:

- a) Os ingredientes como areia, alumínio e bórax são misturados em uma fornalha para a fusão, com temperaturas na ordem de 1250 °C.
- b) O vidro fundido é escoado através de centenas de furos com diâmetros de 1 a 2 mm.
- c) O vidro que escoar por cada furo é puxado até ser reduzido ao diâmetro desejado num processo contínuo.
- d) Os fios são resfriados com spray de água.
- e) Depois do resfriamento os fios são cobertos com uma camada protetora superficial que tem por objetivo melhorar a resistência a abrasão para que os fios sejam manipulados.
- f) Os filamentos são unidos formando *stands*, cada um formado na maioria das vezes por 204 filamentos de fibra de vidro.
- g) Os *stands* são bobinados a uma velocidade de até 3 km/min.

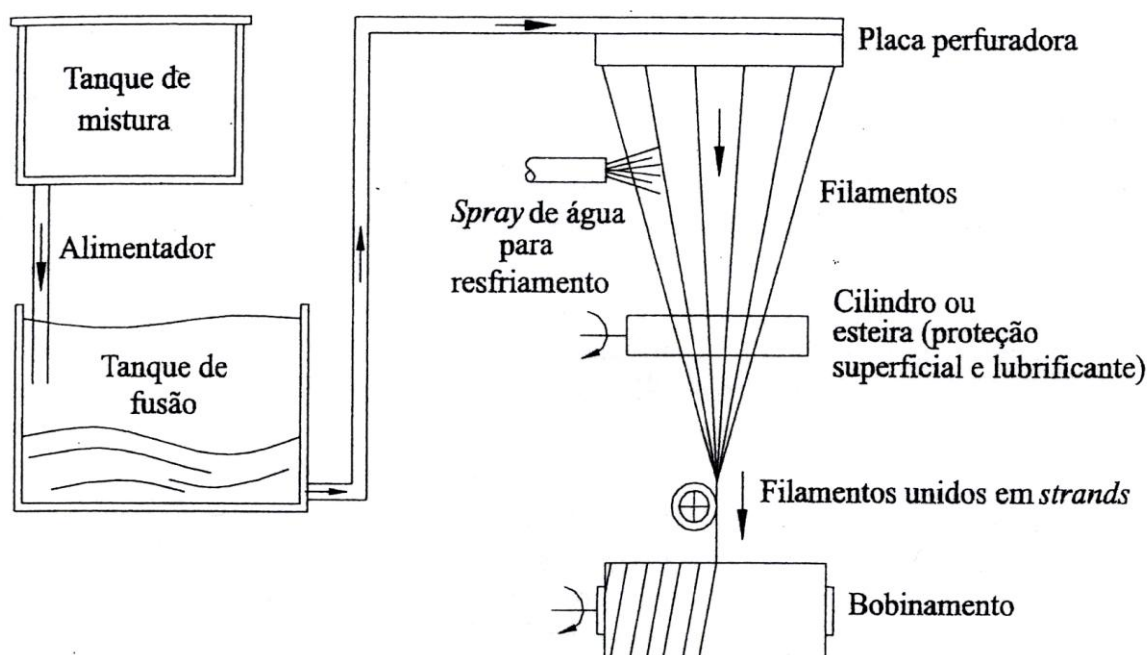


Figura 7 - Esquema do processo de obtenção de fibras de vidro - FONTE: MENDONÇA (2005)

As características das fibras de vidro como por exemplo a resistência e a rigidez aliados ao baixo custo fazem com que elas sejam usadas em muitas áreas diferentes como nas indústrias navais, químicas, militares, aeroespacial, automobilísticas, civil e também esportivas.

### 2.3.2 FIBRAS DE CARBONO E GRAFITE

A nomenclatura fibra de carbono é usada para fibras que possuem entre 80% a 95% de carbono e fibras de grafite para as que possuem mais de 98,8% de carbono. Segundo MENDONÇA (2005) as características que as fibras de carbono apresentam que diferenciam das de vidro são a maior rigidez, maior resistência a altas temperaturas, densidade inferior e um custo maior, por isso são apenas utilizadas em aplicações de alto desempenho como por exemplo na indústria aeroespacial. A produção é feita a partir de filamentos precursores orgânicos. A fibra precursora é esticada por um período de 24 horas a uma temperatura de 230°C, depois carbonizada a 1500°C em uma atmosfera inerte e depois um processo de grafitação a 3000°C.

### **2.3.3 FIBRAS CERÂMICAS**

As fibras cerâmicas são usadas para aplicações que necessitem altas temperaturas na faixa de 1000°C. As fibras podem ser obtidas a partir de dois processos, o de deposição química em fase gasosa onde uma fibra é continuamente alimentada em um forno onde permanece em contato com gases reagentes para que seja formado um revestimento superficial. O outro método de obtenção de fibras cerâmicas é semelhante ao processo de obtenção das fibras de carbono porém são submetidos ao processo de cura e tratamento térmico para que possam se transformar em material cerâmico.

## **2.4 MATRIZES PARA COMPÓSITOS**

As fibras sozinhas não são capazes de suportar tensões multiaxiais, apenas tensões axiais, por isso são necessárias matrizes que aglutinem as fibras e transmitam as tensões. Também são muito importantes para a proteção das fibras contra ataques químicos ou alguns outros danos que as fibras possam sofrer como no manuseio ou o desgaste. Essas matrizes podem ser metálicas, cerâmicas e matrizes de resina plástica, chamadas de polímeros.

### **2.4.1 POLÍMEROS**

Os polímeros são comumente conhecidos como plásticos e são materiais sintéticos geralmente de origens orgânicas. MENDONÇA (2005) apresenta algumas vantagens dos polímeros em relação aos materiais metálicos e outros materiais como por exemplo, facilidade de fabricação, baixo peso e densidade, resistência a ataques químicos, autolubrificação, amortecimento e algumas vantagens estéticas como por exemplo transparência e aparência decorativa. Porém apresentam também algumas desvantagens entre elas podemos citar a baixa resistência, rigidez inferior a dos outros materiais, dureza baixa, expansão térmica superior à dos metais (pode chegar até 10 vezes maior), mais inflamáveis, entre outras desvantagens.

### 2.4.1.1 POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

Os polímeros termoplásticos são aqueles que amolecem ou até mesmo se fundem quando aquecidos. Possuem ligações intramoleculares fortes, mas intermoleculares fracas, quando são aquecidos essas ligações são enfraquecidas o que causa a movimentação das moléculas e portanto a deformação, quando resfriados as forças se restabelecem solidificando-os. Uma das características mais importante dos termoplásticos é que esse polímero são reprocessável. Como exemplo de termoplástico podemos citar: polietileno, náilon, policarboneto, celuloses, acrílicos, *polivinil cloride* (PVC), *polifenilene sulfide* (PPS). (MENDONÇA, 2005)

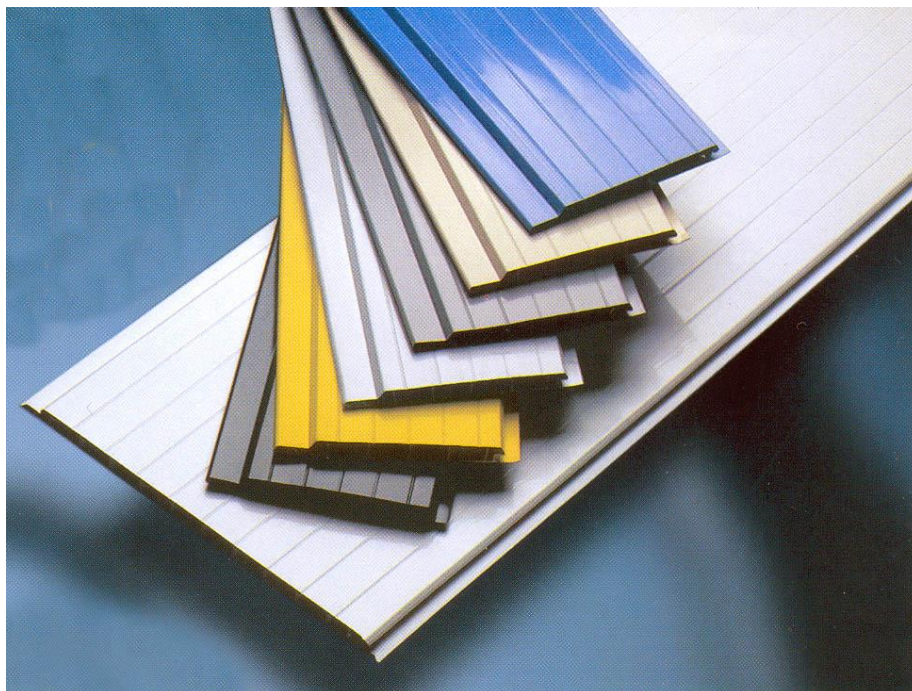


Figura 8 - Forro de PVC - FONTE: THERMOFORRO (2013)

### 2.4.1.2 POLÍMEROS TERMORRÍGIDOS

Diferente dos polímeros termoplásticos, esses termorrígidos uma vez que são endurecidos não podem mais ser fundidos ou amolecidos com o calor, se aquecidos acima de certo limite eles se decompõem. Isso ocorre devido a polimerização desses materiais que ocorre em dois estágios um que resulta numa substância intermediária formada por cadeias lineares ou ramificadas e outro



durante a moldagem quando a polimerização se completa, essa etapa ocorre sobre a ação do calor. Quando a cura está completa o material solidificado não pode mais ser conformado termicamente.

Alguns exemplos de plásticos termorrígidos são o poliéster, epóxi, fenólicos e silicones. Dentre todos os plásticos o epóxi e poliéster são os mais utilizados como matriz para laminados compostos reforçados por fibras. Isso se dá por que além das propriedades mecânicas elevadas também são menos afetados por variações de temperatura. Essas peças feitas de polímeros termorrígidos podem ser produzidos inteiramente à temperatura ambiente sem necessidade de nenhum aquecimento (Neto, 2006).

## **2.5 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO**

Para NETO (2006) o princípio básico do processo de fabricação do compósito é a impregnação do reforço com uma determinada matriz formando no final do processo um componente sólido com geometria definida que já esteja em condições de ser utilizado, sendo mínima a necessidade de desbaste ou usinagem depois do componente finalizado. Os processos de fabricação dos compósitos são chamados de moldagem, isso porque diferente dos materiais metálicos e cerâmicos a manufatura do compósito ocorre ao mesmo tempo em que o componente é submetido a moldagem. Para determinar o processo adequado para cada moldagem é levado em conta principalmente o tipo de matéria-prima, tipo do reforço e da matriz e a geometria do componente requerido. Os processos podem ser manuais ou automáticos e utilizados moldes abertos ou fechados. No caso de molde abertos podem ser utilizados os tipo macho e fêmea e nos fechados aparecem as características tanto dos moldes tipo macho quanto dos moldes tipo fêmea.

Os processos de fabricação utilizando as matrizes poliméricas são os mais comuns pois não envolvem necessariamente a utilização de altas pressões de moldagem, as temperaturas do processo estão abaixo de 300 °C e tem um custo significativamente menor devido a facilidade dos processos de manufatura desses compósitos com matrizes poliméricas. Apesar do baixo custo para a fabricação desses compósitos esses processos corresponde a 50 - 60 % do custo total de um compósito (NETO, 2006) por isso demanda uma maior atenção nas pesquisas para

a industrial já que a um grande interesse em reduzir a parcela que o valor da fabricação representa pro produto final.

As diferenças dos processos de manufatura dos compósitos poliméricos estão nos processos de transformações físico-químicas a que são submetidas as matrizes durante a fase de moldagem. As matrizes poliméricas termorrígidas necessitam passar por um processo físico-químico de cura, enquanto as termoplásticas passam por uma fase onde ocorre o amolecimento e fusão para serem conformadas no interior do molde e em seguida solidificadas.

### **2.5.1 MOLDAGEM MANUAL (*HAND LAY-UP*)**

Esse processo é o mais simples existente para a fabricação do compósito pois não envolve nenhum tipo de investimento com equipamentos nem automatização pelo fato de ser um processo manual. O processo consiste basicamente na disposição e empilhamento do reforço na forma de mantas bidirecionais em orientações predefinidas sobre o molde. O primeiro passo do processo é o tratamento da superfície do molde com a aplicação de uma substância chamada de desmoldante que facilita a retirada do componente do molde depois da cura. Em seguida são sobrepostas camadas de reforço e essas camadas são impregnadas com uma resina pré-formulada com um agente endurecedor. O processo de cura acontece em temperatura ambiente ou em alguns casos dependendo da resina que é utilizada a cura ocorre em estufas.

Esse processo apresenta uma fração volumétrica de reforço menor que 40%. Nesses compósitos, as frações de vazios, como por exemplo bolhas de ar, representam cerca de 15% (NETO, 2006).



Figura 9 - Processo de moldagem manual na indústria - FONTE: FASSMER (2013)

### 2.5.2 MOLDAGEM POR ASPERSÃO (SPRAY-UP)

Processo similar ao de moldagem manual porém o *spray-up* é apenas utilizado na manufatura de compósitos com fibra de vidro, e utiliza um mecanismo que realiza a aspersão de uma mistura de fibras e resina. A quantidade de material aspergido é o que define a espessura final do componente e é também utilizado um rolete para a compactação da composição reforço/matriz. A cura é semelhante a da moldagem manual.

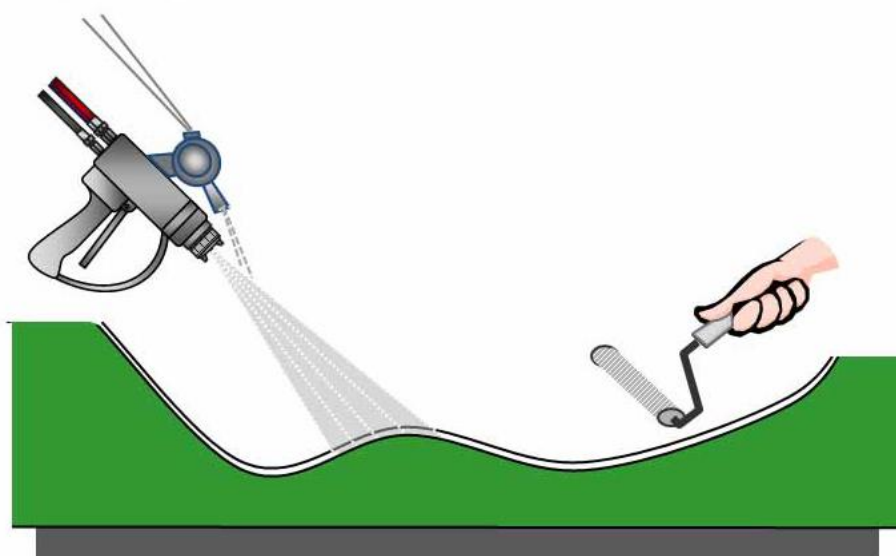


Figura 10 - Esquema de um processo de moldagem por aspersão - FONTE: MOLDED FIBER GLASS (2013)

### **2.5.3 MOLDAGEM A VÁCUO (VACUUM BAG)**

O processo de moldagem a vácuo é um melhoramento dos processos de moldagem manual e de moldagem por aspersão. Através desse processo obtêm-se um componente com maior qualidade pois há uma eficiência maior na retirada do excesso de resina que pode ser adicionada durante o processo de moldagem, também a retirada de voláteis e de bolhas de ar que possam por algum motivo comprometer as propriedades mecânicas do componente. Com a moldagem a vácuo os compósitos apresenta frações volumétrica de fibras com até 50% e frações volumétricas de vazios inferiores a 5% (NETO, 2006).

### **2.5.4 PRÉ-IMPREGNADOS**

Quando os materiais compósitos começaram a ser empregados nas indústrias que exigiam maiores desempenhos e qualidade, como aeronáutica e aeroespacial, os processos manuais de manufatura de compósitos se mostravam insatisfatórios em relação as necessidades de resistência mecânica exigidas. Essa resistência é basicamente função da orientação das fibras e das frações volumétricas das mesmas (NETO, 2006). Com isso surgiu a necessidade do desenvolvimento de novos processos onde pudesse ter um maior controle principalmente das frações volumétricas já que a orientação das fibras não mudaria de um processo para outro. Era necessário um processo para impregnar as fibras de forma homogênea antes de ser colocado no molde. Com isso surgiu um produto semi-manufaturado que tem o nome de pré-impregnado, um produto intermediário, pronto para a moldagem constituído de uma mistura de fibras impregnadas com um determinado polímero.

O processo para obtenção desses pré-impregnados consiste basicamente em uma bobinagem de fibras contínuas em um mandril de formato circular e protegido com um filme desmoldante. O cabo de fibras passa por uma cuba de impregnação e em seguida é bobinado continuamente no mandril, por fim é feito um corte na direção perpendicular as fibras e então se obtém uma lâmina pré-impregnada plana, como pode ser visto na figura 11.

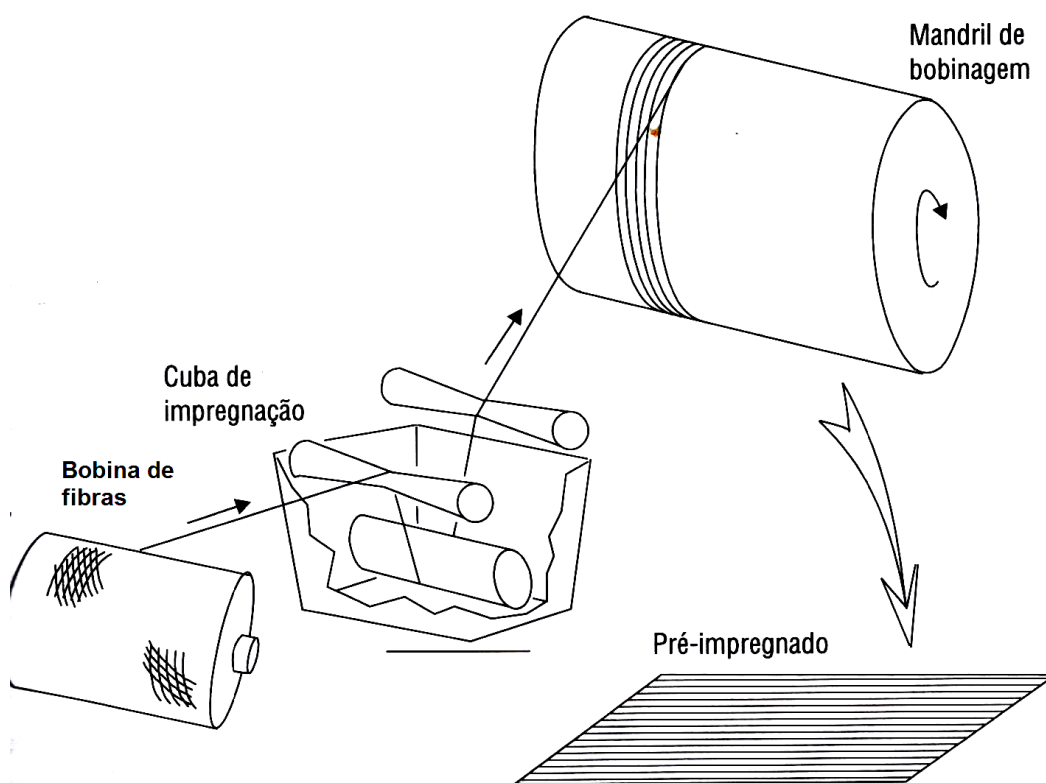


Figura 11 - Esquema de um processo de fabricação de pré-impregnados. FONTE: NETO (2006)

Esse processo quando aplicado na indústria pode sofrer alguns tipos de variações dependendo das matrizes usadas, podem ser matrizes termorrígidas e termoplásticas. A figura 12 apresenta um desses casos para matrizes termorrígidas onde as fibras depois do banho de imersão passam por uma torre de tratamento que nada mais é do que um estufa onde é conferida integridade física para o conjunto reforço/matriz para manuseio sem alterar as condições reológicas da matriz para o processo de moldagem.

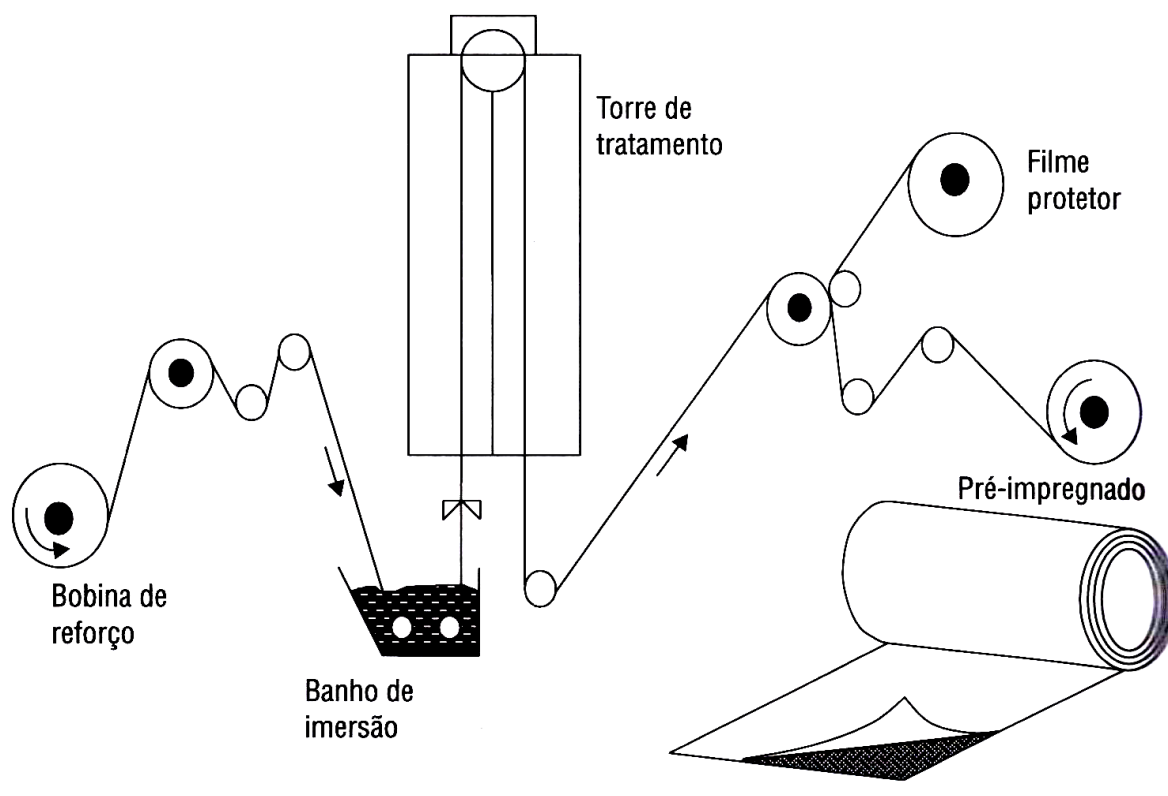


Figura 12 - Esquema de um processo contínuo de fabricação de pré-impregnados com matriz termorrígida - FONTE: NETO (2006)

### 2.5.5 MOLDAGEM EM AUTOCLAVE/HIDROCLAVE

O semi-manufaturado pré-impregnado é através da compactação das laminas transformado em compósito. Essas compactações são feitas em prensas ou então autoclaves e hidroclaves, equipamentos que utilizam um meio gasoso no caso da autoclave e um meio líquido no caso da hidroclave, como meio físico de compactação. A autoclave é basicamente uma estufa pressurizada, onde ocorrem as etapas de cura do pré-impregnado.

O processo tem início com o empilhamento das camadas de pré-impregnados em forma de lâminas sobre o molde, anteriormente revestido de desmoldante e com as orientações das fibras definidas anteriormente pelo projeto do componente. Em seguida são dispostas sobre as camadas de pré-impregnados sucessivas camadas de filmes canalizadores, mantas absorvedoras do excesso de resina, filmes de desmoldantes e um filme polimérico, com a função de isolar todo o ambiente interno da autoclave, formando uma bolsa que permite compactar o conjunto por meio de vácuo.

Em autoclaves industriais a pressurização é realizada por meio de gás inerte (normalmente  $N_2$ ) e a pressão pode atingir cerca de 0,7 MPa (cerca de 7 atm), operando a temperaturas de 350 °C (NETO, 2006).

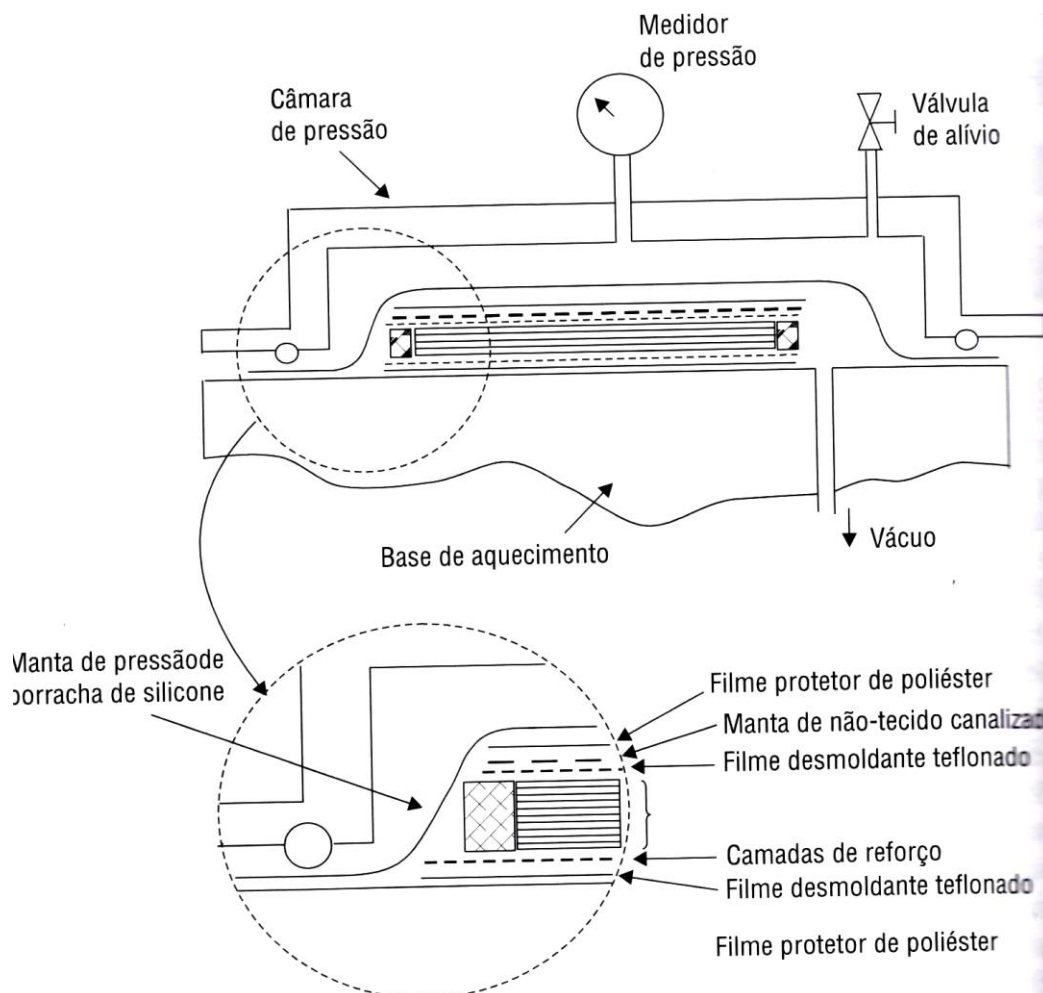


Figura 13 - Esquema do processo de autoclave em laboratório - FONTE: NETO(2006)

Quando se utiliza processo de moldagem em hidroclave para o processamento de compósitos estruturais é utilizado água como meio físico o que fornece pressões para compactação que podem atingir até 7 MPa (~70 atm) e fazendo com que a fração volumétrica de fibras atinja valores equivalentes a 75-80%, conferindo aos compósitos uma resistência ao cisalhamento 25% maior que a obtida em relação aos processos de moldagem em autoclave (NETO, 2006).

### 2.5.6 MOLDAGEM POR COMPRESSÃO

O processo de moldagem por compressão é derivado dos processos de estampagem de chapas metálicas. O processo começa com a colocação do reforço

com a orientação pré-definida dependendo da necessidade do componente final e previamente tratado com produto desmoldante. Em seguida a punção superior é abaixada e há a consolidação do material pela pressão aplicada. A espessura do material obtido com esse processo está relacionada com o número de camadas empilhadas e em seguida são realizados ciclos programados de aquecimento para a cura do compósito.

Esse processo permite ciclos rápidos de produção quando utilizados para matrizes termorrígidas pois permitem ciclos de processamento de 1 a 5 minutos. É necessário um investimento inicial alto devido aos equipamentos necessários no processo e após a moldagem algumas operações secundárias como por exemplo o desbaste devem ser efetuadas. (NETO, 2006).

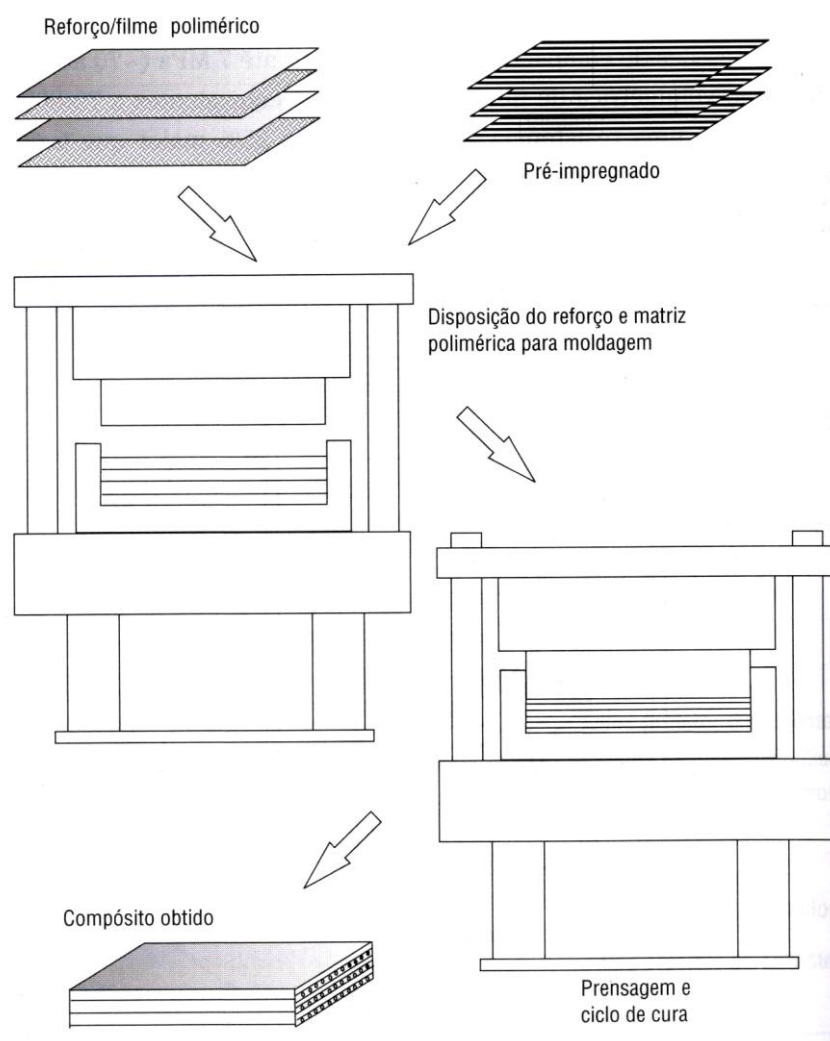


Figura 14 - Esquema das etapas do processo de compressão - FONTE: NETO (2006)



### 2.3.7 PULTRUSÃO (*PULTRUSION*)

É um processo que foi introduzido nas indústrias no início da década de 1950, as principais características desse processo são a cadência de produção, um processo contínuo e também apresentam um elevado grau de automatização.

Utilizado principalmente na fabricação de barras, tubos e perfis retos nas mais diversas geometrias e formas. Os reforços podem ser do tipo de filamentos contínuos, fitas, mantas ou véus de baixa gramatura (NETO, 2006).

Como apresentado na figura 15, o reforço na forma de fibras contínuas é impregnado com resina previamente formulada e com viscosidade ideal para a impregnação em uma cuba, em seguida passa por dentro de um molde aquecido com um controle rígido de temperatura para que não ocorra a cura prematura do compósito, esse molde é o que define a geometria do produto final. Ao sair do molde a peça está pronta.



Figura 15 - Etapas do processo de pultrusão - FONTE: FIBROLUX (2013)

### 2.5.8 PROCESSO DE INJEÇÃO PARA MANUFATURA DE COMPÓSITOS

A moldagem por injeção é um processo que se caracteriza por etapas cíclicas. O polímero é transportado para um molde fechado onde é injetado, em seguida solidificado tomando a forma interna do molde.

A incorporação do reforço ao polímero pode ocorrer de duas maneiras diferentes, a primeira o reforço na forma de fibras é adicionado com polímero antes

do processo de injeção, essas fibras devem ser do tipo curtas. A segunda forma de incorporação do reforço ao polímero é quando a pré-forma é previamente acondicionada no molde e o polímero é injetado posteriormente, após o fechamento do molde (NETO, 2006).

A injetora tem o corpo formado por um componente cilíndrico externo aquecido com uma rosca interna, responsável por transportar o material. Esse material será utilizado no preenchimento do molde com a geometria desejada para o componente. Os parâmetros para o controle são a taxa de fluxo e a temperatura do cilindro.

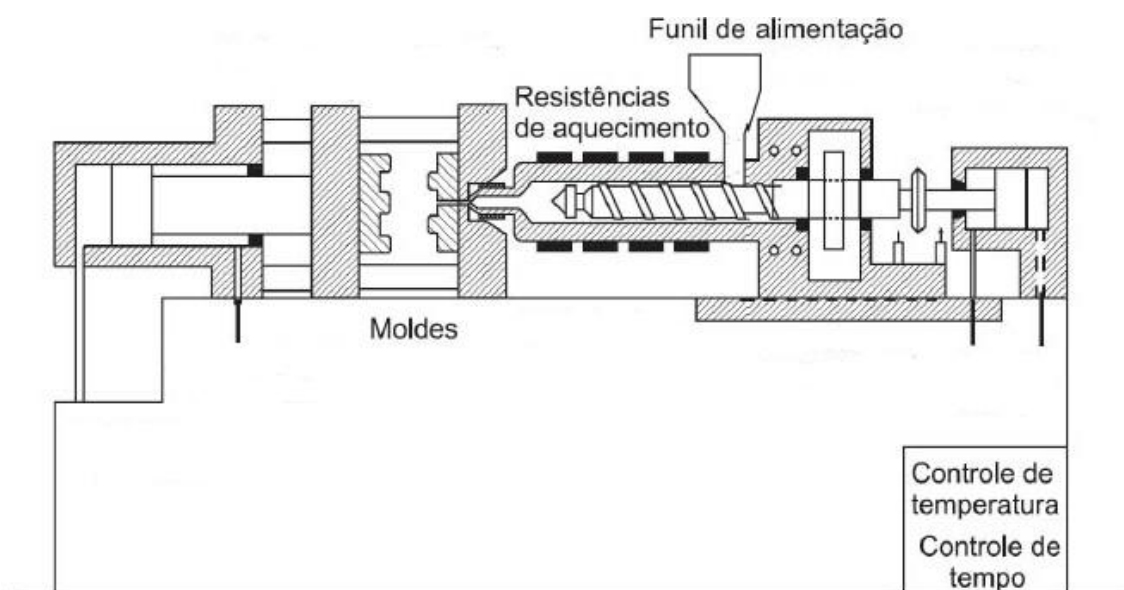
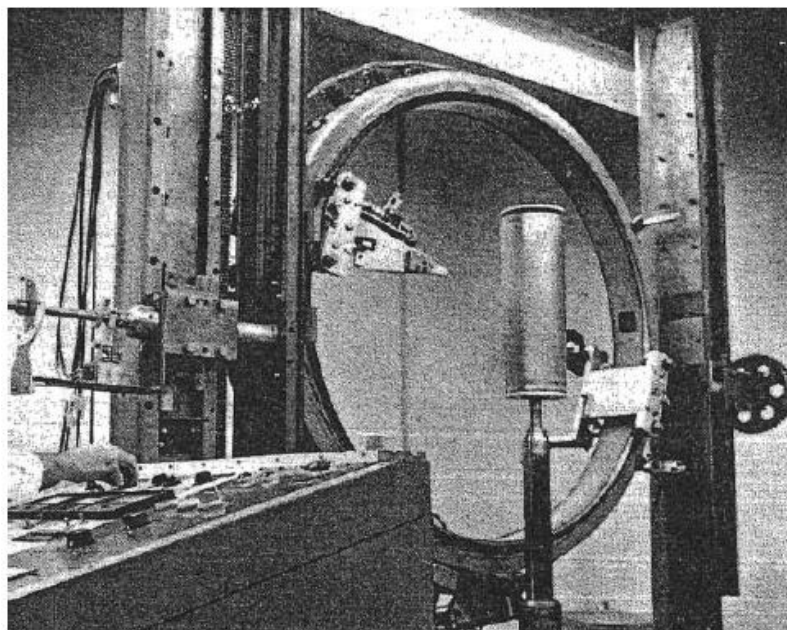


Figura 16 - Esquema de um processo de injeção de compósitos - FONTE: ENGEPLAS (2013)

## 2.6 EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE *FILAMENT WINDING*

No ano de 1964 os autores ROSATO D.V e GROVE C. S, definiram em seu livro "*Filament Winding: its development, manufacture, applications and design*" esse processo como uma técnica que produz componentes de alta resistência e baixo peso.



**Figura 7 - Máquina de *Filament Winding* fabricando um invólucro de bateria - FONTE: ROSATO e GROVE (1964).**

Esse sistema teve início registrado a partir da patente de alguns instrumentos aplicados ao processo por LOHEST (1957) e em seguida outros sistemas começaram a serem desenvolvidos possibilitando a laminação pelo sistema de *Filament Winding*. Teve sua primeira máquina patenteada por BAXTER JR. (1965). As primeiras máquinas eram manuais e realizavam tarefas simples usando apenas 2 eixos (rotação do eixo e movimento longitudinal).

Com o passar das décadas e o desenvolvimento da tecnologia muitas melhorias foram feitas e o processo se tornou automatizado com computadores cada vez mais rápidos fazendo o controle do processo possibilitando maiores velocidades na produção e maiores precisões dos componentes manufaturados.

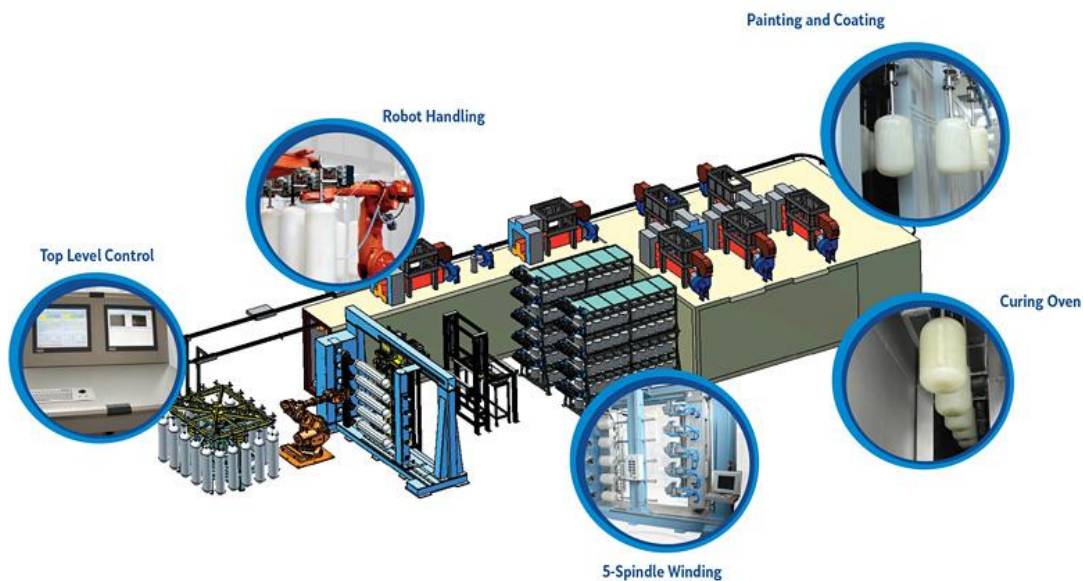


Figura 8 - Linha automatizada do processo de *Filament Winding* - FONTE: MIKROSAM (2013)

### 3. ENROLAMENTO FILAMENTAR (FILAMENT WINDING)

O processo de enrolamento filamental é utilizado quando se deseja obter produtos como tubos, canos, reservatórios de água, tanques de tratamento de esgoto, entre outros componentes de revolução de vários tamanhos diferentes através dos materiais compósitos.

#### 3.1 ETAPAS DO PROCESSO

##### 3.1.1 MANDRIL

O mandril é o componente onde as fibras depois de banhadas em resina são enroladas, o que dá a forma ao componente, podendo ser de vários tamanhos e formas, dependendo apenas das dimensões desejadas para o componente.



**Figura 17 - Mandril de uma máquina de Filament Winding - FONTE: VEM (2013)**

Para que a peça bobinada seja desmoldada com facilidade do equipamento, o mandril possui um eixo que se estende por toda profundidade do mesmo conectado a uma alavanca que quando acionada diminui o perímetro do mandril, fazendo com que a fibra enrolada e pré curada seja facilmente retirada do molde sem sofrer nenhum tipo de dano e siga para a próxima etapa do processo.

### **3.1.2 FIBRAS**

As fibras são dispostas em rolos e em prateleiras ficando uma ao lado da outra. Com isso ao serem desenroladas permanecem paralelamente uma em relação a outra para que possam ser enroladas no mandril evitando empilhamento das fibras. Normalmente são utilizadas fibras de vidro.



Figura 18 - Fibras dispostas em prateleiras paralelas - FONTE: DIRECTINDUSTRY (2013)

### 3.1.3 RESINA

A resina é adicionada ao processo na etapa do molhador, juntamente com os aditivos necessários para cada tipo de componente. Tem a função de impregnar a fibra e no fim do processo promover a cura do material. Na produção de tanques de esgoto por exemplo são usadas duas resinas, uma no início para proporcionar uma barreira química ao material que vai ficar em contato direto com o esgoto e a outra para o restante da fabricação que não necessita da resistência química.

### 3.1.4 SPRAY-UP

No processo de enrolamento filamentar existe um momento em que é utilizado um processo semelhante ao de *spray-up*. Tiras de fibras são borrifadas no mandril onde estão sendo enroladas as fibras impregnadas. Essa etapa tem a finalidade de fechar os espaços que possam existir entre as fibras já enroladas e as camadas de fibras que existem.

### 3.1.5 BICO MISTURADOR ESTÁTICO

Esse componente é um tubo cilíndrico estreito por onde passam os elementos de mistura. É responsável pela mistura da resina com o catalisador e os aditivos. A mistura é feita quando os líquidos passam por uma espiral dentro desse

bico e em seguida são forçados pela saída estreita até o ponto de aplicação. Fornece assim uma aplicação homogênea e uma mistura completamente encapsulante e resinas com o mínimo de desperdício e acabamento perfeito.



Figura 19 - Bico dosador estático - FONTE: TENAZPLASTICOS (2013)

#### 4. SISTEMA DE TENSIONAMENTO DE FIBRAS

O tensionamento das fibras tem um papel importante no processo de enrolamento filamental. O sistema que aplica a tensão deve ter a capacidade de manter tensão constante no carretel e nas outras partes do equipamento durante todo o processo.

As mudanças de direções que ocorrem durante o enrolamento podem causar perdas de tensão e com isso as fibras podem apresentar rugas, enfraquecimento e até mesmo rompimentos além de que fibras soltas fazem com que o componente enrolado apresente algumas falhas.

A capacidade do sistema manter a tensão constante durante todo o processo é a característica mais importante para a garantia da repetibilidade da qualidade dos componentes fabricados pelo equipamento (TCR Composites, 2007).

Um exemplo de tensionador para o processo de enrolamento filamental pode ser visto na figura 20. São tensionadores utilizados em indústrias de compósitos para componentes aeroespaciais. Esses sistemas são de alta precisão pois precisam garantir o tensionamento em altas velocidades de enrolamento e um apurado controle.



**Figura 20 - Sistema tensionador utilizado em indústrias aeroespaciais - FONTE: HELMAN (2014)**

Existem alguns outros processos que utilizam métodos de enrolamento e conseqüentemente mecanismos de tensionamento como por exemplo o bobinamento de motores elétricos.

Tais mecanismos podem ser construídos utilizando conceitos unicamente mecânicos como sistemas de polias, molas, pesos e as combinações de dois ou mais desses mecanismos.

Esses sistemas puramente mecânicos podem apresentar vantagens como pouco complexidade, maior facilidade na montagem e custos reduzidos. Porém por outro lado também podem apresentar desvantagens como um tamanho elevado que para certas aplicações tornam esses modelos inviáveis ou um controle não tão preciso da tensão.

A figura 21 apresenta um exemplo de tensionador puramente mecânico que utiliza uma combinação de polias e molas para o controle da tensão.





Figura 21 - Tensionador mecânico. FONTE: COILWINDING (2014)

Para entender o funcionamento do tensionador, a figura 22 mostra um esquema de um modelo que apresenta cada um dos componentes presentes no equipamento e o percurso do fio, passando por uma combinação de polias que garante o tensionamento.

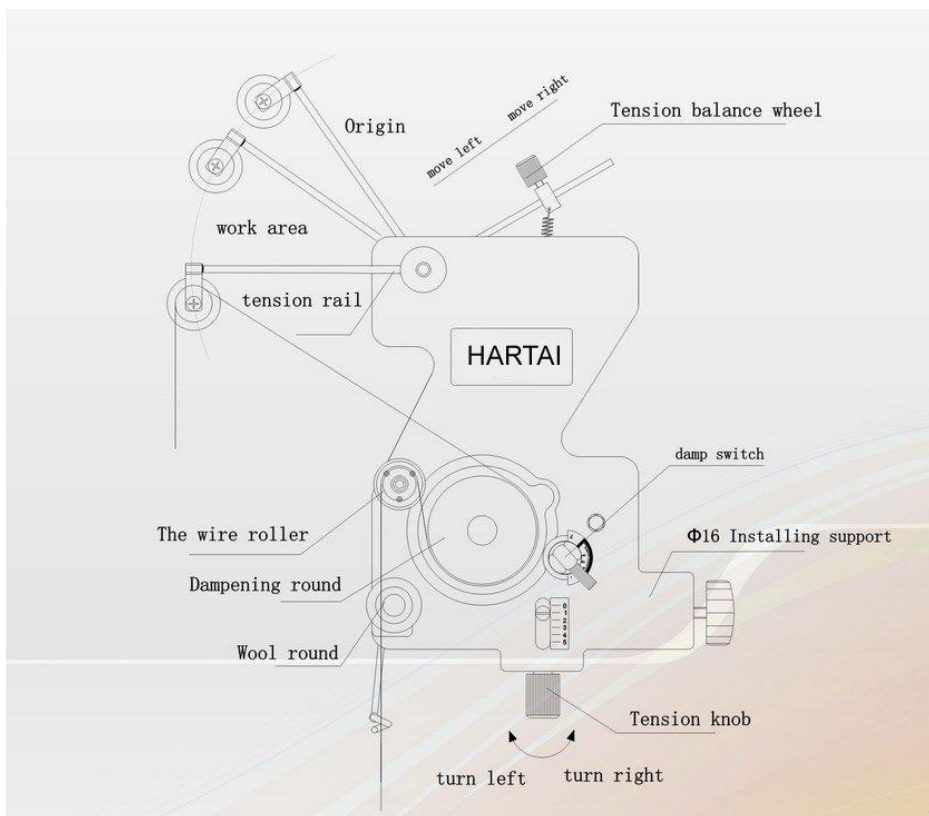


Figura 22 - Esquema do funcionamento do tensionador mecânico. FONTE: COILWINDING (2014)

Outros tipos de tensionadores são os que utilizam sistemas e componentes eletrônicos e magnéticos combinados com os elementos mecânicos citados acima. Esse sistema possibilita um controle automático e mais preciso das tensões aplicadas as fibras. Porém podem apresentar custos elevados além de certas complexidade.

Um exemplo desses tensionadores pode ser visto na figura 23, semelhante ao funcionamento dos mecânicos através de polias e molas porém apresentam uma bobina magnética fazendo o controle da tensão diferente dos mecânicos onde o controle é feito através de uma mola.



**Figura 23 - Tensionador magnético. FONTE: COILWINDING (2014)**

O esquema da figura 24 mostra o posicionamento das polias do componente e o caminho que o fio percorre semelhante ao dos puramente mecânicos.

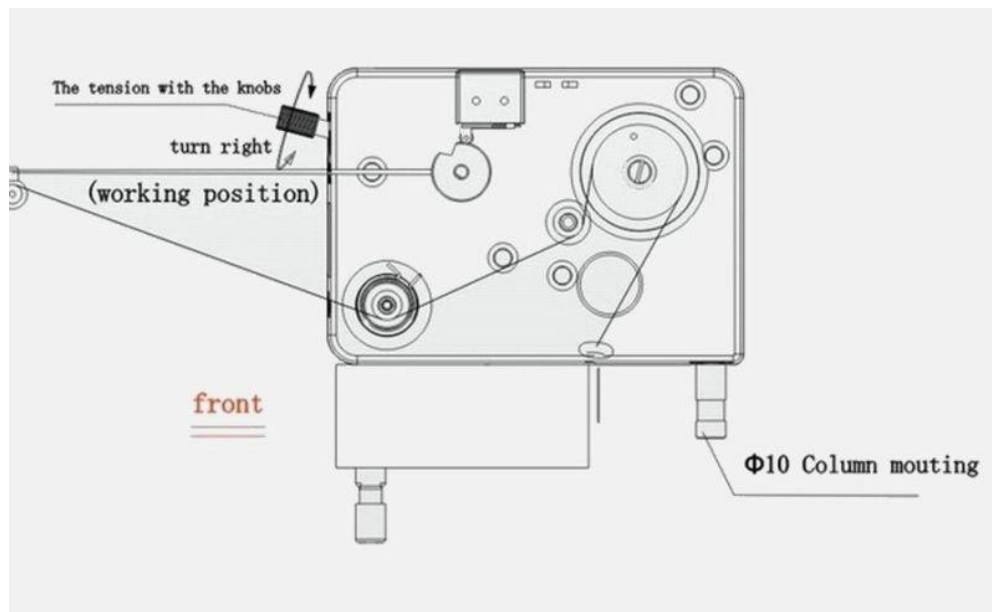


Figura 24 - Esquema de um tensionador magnético. FONTE: COILWINDING (2014)

Como todos os modelos de tensionadores apresentados anteriormente já existem e são utilizados em níveis industriais optou-se por desenvolver um sistema diferenciado para o equipamento de enrolamento filamentar abordado nesse trabalho.

O mecanismo segue a idéia de um tensionador utilizado para fitas transportadora de grãos como mostrado na figura 25 e pode atender as necessidades da máquina de enrolamento filamentar.

Esse sistema utiliza um carrinho com um rolo ligado a um peso, o equilíbrio da força aplicada pelo peso com o deslocamento do carrinho garantem a tensão na fita durante todo o tempo em que a fita esta funcionando. Assim também pode seguir o mesmo princípio e manter a tensão na fibra durante o enrolamento.



Figura 25 - Sistema de tensionamento de fitas transportadoras. FONTE: ACERVO PRÓPRIO

#### 4.1 COMPONENTES E MONTAGEM

Para a fabricação da estrutura do mecanismo optou-se pelo uso do aço inoxidável, no caso o AISI 304 pois esse tipo de material não apresenta oxidação o que acrescentaria elementos indesejáveis no processo. Esse material também é resistente a corrosão que garante independência de manutenção quanto a efeitos corrosivos. Além de não necessitarem de acabamento final e apresentarem uma boa combinação de resistência mecânica e ductilidade.

O inox AISI 304 é o aço comercialmente mais utilizado nas indústrias químicas, farmacêuticas, de petróleo, têxtil, peças de tubulações entre outras diversas aplicações (SINOX, 2014).

Para toda a estrutura podem ser utilizadas as mesmas barras, porém cortadas com comprimentos diferentes para formarem a estrutura e o carrinho como podem ser vistos nas figuras 27 e 28.

Para a união das barras da estrutura utiliza-se solda, preferencialmente TIG com gás argônio, pois penetra melhor no material e necessita de pouco ou nenhum acabamento pós solda (ESAB, 2014).

Outro componente do sistema são os rolos por onde vão passar as fibras, podem ser também feitos com o mesmo aço inox AISI 304, são dois rolos posicionados um abaixo do sistema no carrinho e o segundo acima do sistema como representado na figura 28.

Para o cálculo das tensões exercidas pelo eixo dos rolos usam-se as equações básicas como a equação 1 que define a tensão a que o eixo está submetido. (Hibeller, 2004)

$$\sigma_{adm} = \frac{M \cdot c}{I_x} \quad \text{Equação 1}$$

Onde M é o momento fletor máximo sofrido pelo eixo,  $c = r$  indica a flexão máxima e o I é o momento de inércia representado pela equação 2 (Hibeller, 2004).

$$I_x = \frac{1}{4} \pi \cdot r^4 \quad \text{Equação 2}$$

A tensão admissível deve ser menor que a tensão de escoamento do aço inoxidável 304 que tem o valor de 240 MPa (Carbinox, 2014).

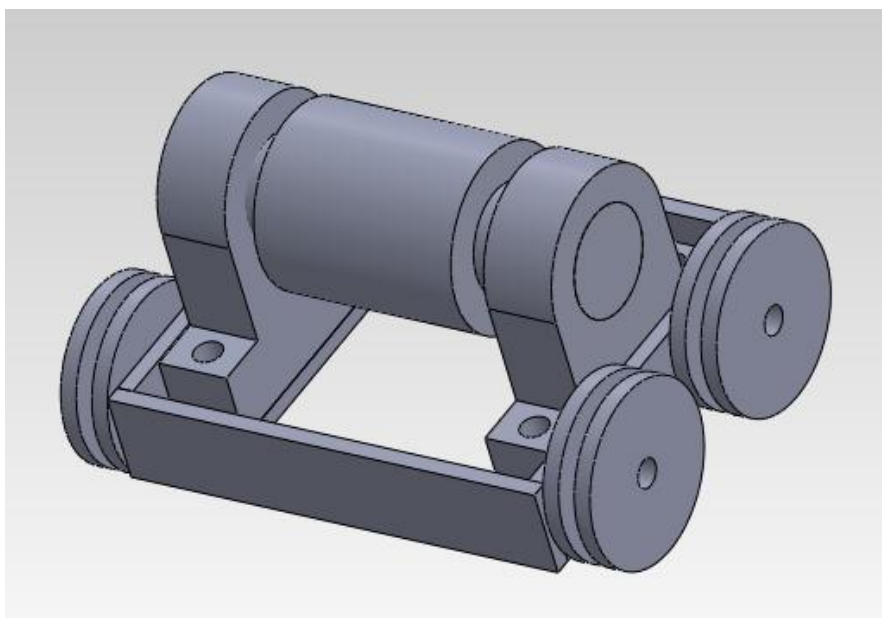
Os rolos são posicionados em mancais de rolamentos. Os rolamentos podem ser de esferas. Esses rolamentos são os mais comuns pois são eficazes, necessitam pouca manutenção e tem designe simples. São indicados para aplicações com altas velocidades e pequenas cargas. (SKF, 2014).

Devido a possível presença de partículas de fibras ou resina na máquina podem ser utilizados rolamentos blindados que protegem as pistas internas contra contaminação podendo ser do tipo ZZ blindados com aço inox como na figura 26 ou DDU que são blindados com borracha, indicados para locais com presença de água. Esses rolamentos blindados já possuem lubrificação necessária para toda a vida útil do componente.



**Figura 26 - Rolamentos de esferas blindados. FONTE: CRB (2014)**

Na figura 27 pode ser visto a estrutura montada do carrinho, onde estão localizados os mancais, rolamentos e rolos citados acima. Essa estrutura vai estar ligada ao peso e será responsável pelo tensionamento como mostrado na figura 29. Para esse peso pode ser utilizado um bloco de cimento com dimensões que atendam as necessidades de tensionamento.



**Figura 27 - Montagem do carrinho. FONTE: ACERVO PRÓPRIO**

Na continuação da montagem o carrinho é posicionado na estrutura do aparato tensionador na parte inferior com as rodas colocadas encaixadas nos perfis. Chega-se então a montagem mostrada na figura 28.

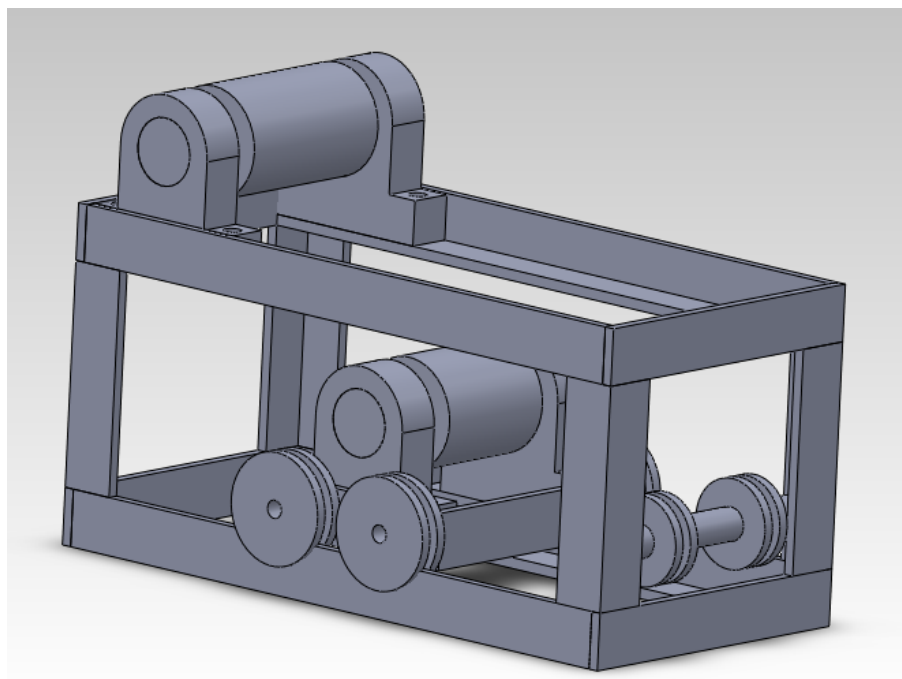


Figura 28 - Aparato tensionador de fibras. FONTE: ACERVO PRÓPRIO

## 4.2 FUNCIONAMENTO

O sistema de tensionamento tem assim como a montagem um funcionamento simples que possibilita uma fácil implantação em um equipamento de enrolamento filamentar. Pode ser utilizado no laboratório da universidade sem a necessidade de componentes complexos o que acrescentaria para o sistema um custo elevado.

Todo o sistema é posicionado inclinado formando um ângulo  $\theta$  com o plano horizontal. Combinado com a força no sentido contrário aplicada pelo peso manterá todo o sistema em equilíbrio.

O funcionamento pode ser observado através do desenho esquemático da figura 29.

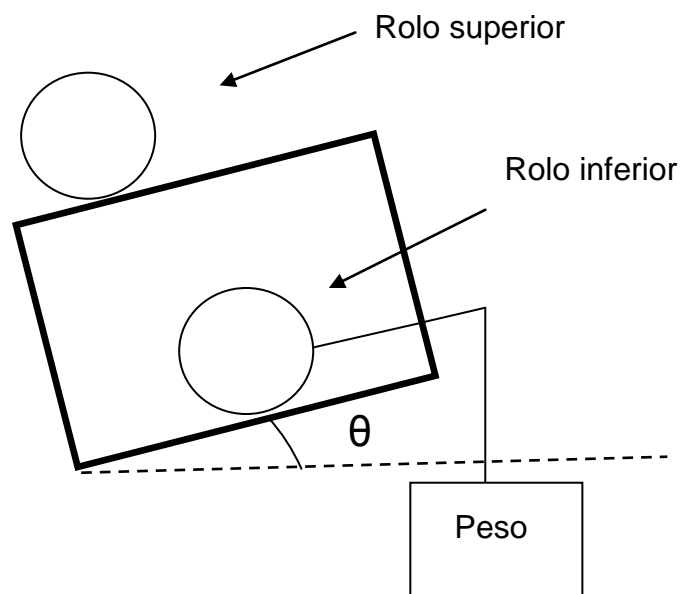


Figura 29 - Esquema do sistema tensionador - FONTE: ACERVO PRÓPRIO

A fibra passa por baixo do rolo localizado na parte inferior do sistema posicionado no carrinho onde está preso o peso. Em seguida passa por cima do rolo superior. O deslocamento do carrinho com o rolo inferior em sentido contrário da força aplicada pelo peso garante a tensão na fibra. Essa tensão pode variar de acordo com a inclinação do sistema e com o peso utilizado. Quanto maior for essa inclinação, maior deverá ser o peso aumentando assim a tensão aplicada a fibra.

Na figura 30 é apresentado o posicionamento da fibra dispostas entre os rolos.

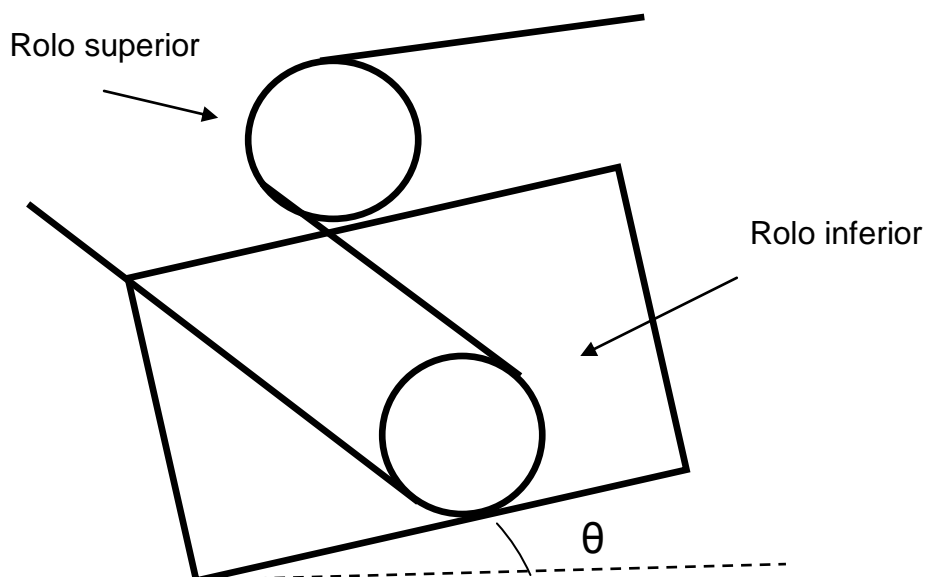


Figura 30 - Desenho esquemático da posição da fibra FONTE: ACERVO PRÓPRIO



O sistema todo parte de um princípio físico básico de equilíbrio de forças onde a força resultante do sistema durante todo o processo é igual a zero como indicado na equação 3. O valor da soma das componentes nos planos x e y é igual a zero (equação 4). A figura 31 mostra as forças aplicadas no rolo inferior.

$$\Sigma F = 0 \quad \text{Equação 3}$$

$$F_x + F_y = 0 \quad \text{Equação 4}$$

A força F1 é causada pelo peso sobre a ação da gravidade e atua no sentido de puxar o carrinho para o lado direito. A força F2 é causada pela inclinação do sistema também sobre o efeito da gravidade que tende a deslocar o carrinho para a esquerda. Quando essas forças possuem o mesmo valor o sistema entra em equilíbrio mantendo a fibra tensionada.

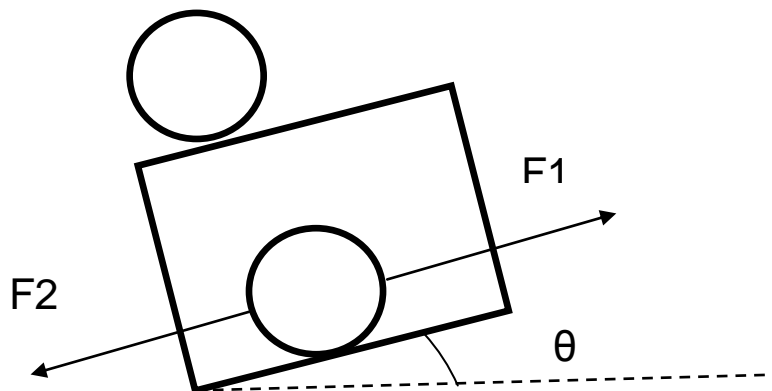


Figura 31 - Diagrama das forças aplicadas no carrinho -  
FONTE: ACERVO PRÓPRIO

Para as diferentes necessidades dos componentes fabricados através do processo de enrolamento filamentar a tensão necessária durante toda a manufatura varia. Com isso se torna necessário o aumento ou a diminuição do ângulo  $\theta$  e do peso. A faixa de variação do ângulo deverá ser definida depois de estabelecida a tensão na fibra. Com isso depois de alguns testes pode-se chegar aos valores do ângulo e do peso necessários para o processo.

## 5. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foram abordados os assuntos referentes aos materiais compósitos, desde as definições desses materiais, composições, processos de fabricação, até o projeto do aparato tensionador de fibras para um equipamento de enrolamento filamental que juntamente com os projetos de outros componentes integrarão a proposta de construção de uma máquina desse processo. Equipamento este que num futuro próximo, com a utilização destes projetos de componentes pode ser construído e utilizado no laboratório da Universidade para o estudo e pesquisas a respeito dos materiais compósitos.

Também puderam ser conhecidos e estudado alguns métodos de tensionamento já existentes utilizados para o enrolamento filamental mas também para outros processos que utilizam o enrolamento como o bobinamento de motores elétricos.

Para o aparato foram utilizados princípios físicos simples como o de equilíbrio de forças que possibilitam a construção sem que agreguem custos elevados ao componente.

Foram escolhidos os materiais utilizados no sistema tomando como base os conhecimentos a cerca dos materiais metálicos como características e aplicações, dando prioridade para o aço inox devido as suas vantagens e as possíveis adversidades que podem ser apresentadas no ambiente onde ocorrerá o processo.

Para o projeto do tensionador a idéia básica utilizada foi a de um equipamento já existente usado com a finalidade de tensionar fitas transportadoras de grãos. Porém para a atual proposta foi elaborado e projetado um mecanismo específico para um equipamento de fabricação de compósitos por enrolamento filamental de maneira que o mesmo virá a ser parte integrante da construção de uma máquina deste processo citado.

É importante evidenciar ainda que para o desenvolvimento deste projeto foi possível notar a necessidade do conhecimento adquirido durante o curso de Engenharia Mecânica onde foram necessários conhecimentos acerca de materiais, mecânica dos sólidos, processos de fabricação, soldagem desenhos, CAD e projeto de produtos.

## 6. REFERENCIAS

ANCEL. Tecnologia em Compósitos. **Processos de Fabricação**, Rio Claro, SP, jul. 2013. Disponível em: <<http://www.ancel.com.br/fabricacao.php?id=fabricacao>>. Acesso em: 15 out. 2013.

BRASIL, Skf. **Caixas de Mancais SDAF**, set. 2014. Disponível em: <<http://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/bearing-housings/spilt-pillow-blocks-sdaf-series-inch-dimensions/index.html>>. Acesso em: 10 jan. 2014.

BRASIL, Skf. **Rolamento de esferas**, set. 2014. Disponível em: <<http://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/ball-bearings/index.html>>. Acesso em: 10 jan. 2014.

CARBINOX, **Catalogo de produtos**, 2014. Disponível em: <<http://www.carbinox.com.br/produtos.asp?rg1=&categoria=1&linha=3&caracteristica=9>> Acessado em: 16 fev. 2014.

COILWINDING, **Tensioners**, 2014. Disponível em: <<http://www.coil-winding-tensioners.com/>> Acessado em: 16 fev. 2014.

ESAB, **Processos de soldagem**, 2013. Disponível em: <[http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/processos\\_soldagem/](http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/processos_soldagem/)> Acessado em: 18 jan. 2014

HELMAN, **Composite Machinery**, 2014. Disponível em: <<http://www.helmantensioners.com/our-products/tensioner-systems/tensioner-systems.html>> Acessado em: 19 fev. 2014

HIBBELER, R. C. **Resistencia dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004. xi, 670 p.

LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006. 313 p.

MENDONÇA, P. T. R., **Materiais Compostos e estruturas sanduíche: projeto e análise**, UFSC - Editora Manole Ltda., Barueri, 2005. 656p.

MIKROSAM, **Control, automation, robotics**. 2013. Disponível em: <<http://www.mikrosam.com/new/cases/en/20/>> Acesso em: 19 fev. 2014.

ROSATO D.V e GROVE C. S. **FILAMENT WINDING: its development, manufacture, applications, and design**. 1. Ed. New York: John Wiley, 1964. 360 p.

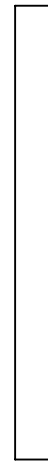
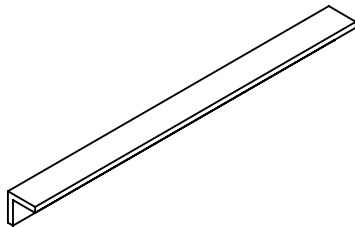
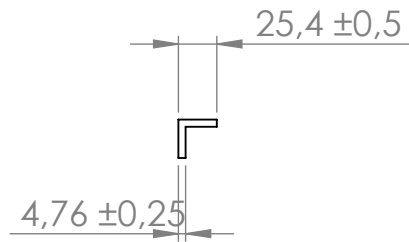
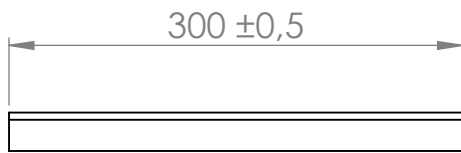
SINOXTEC, comércio de válvulas e conexões, **Catálogo de perfis de aço inox**, Concórdia, SC, janeiro 2014. Disponível em: <[http://www.sinox.com.br/arquivos\\_catalogo/textos/1283432641\\_Tabela\\_perfis\\_aco\\_inox.pdf](http://www.sinox.com.br/arquivos_catalogo/textos/1283432641_Tabela_perfis_aco_inox.pdf)> Acesso em: 15 jan. 2014

TCR, Composites. **Prepeg Winding Delivery Systems**, Ogden, Utha, EUA, 2007. Disponível em: < [http://www.tcrcomposites.com/pdfs/winding\\_delivery\\_ppt.pdf](http://www.tcrcomposites.com/pdfs/winding_delivery_ppt.pdf)>. Acesso em: 19 fev 2014.

TENAZ. Produtos Plásticos. **Bico Misturador Estático**, São Paulo, SP, dez 2013. Disponível em: <[http://tenazplasticos.com.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=91&Itemid=221](http://tenazplasticos.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=91&Itemid=221)>. Acesso em: 20 dez. 2013.

THERMO FORRO. **Forro de PVC**, Guarulhos, SP, fev 2013. Disponível em: < <http://thermoforrodepvc.com.br/services.html> >. Acesso em: 20 dez. 2013.

**Apêndice A - Desenhos técnicos do aparato tensionador**



SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
ACABAM. SUPERFÍCIE:  
TOLERÂNCIAS:  
LINEAR:  
ANGULAR:

ACABAMENTO:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

DES.	NOME	ASSINATURA	DATA		
	Diogo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF					
QUALID					
				MATERIAL:	
				Aço inox AISI 304	
				PESO:	

TÍTULO:

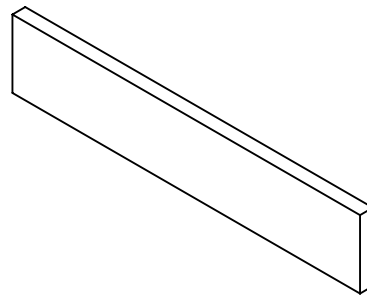
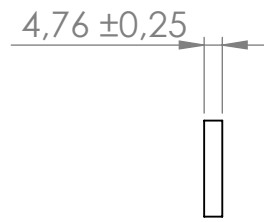
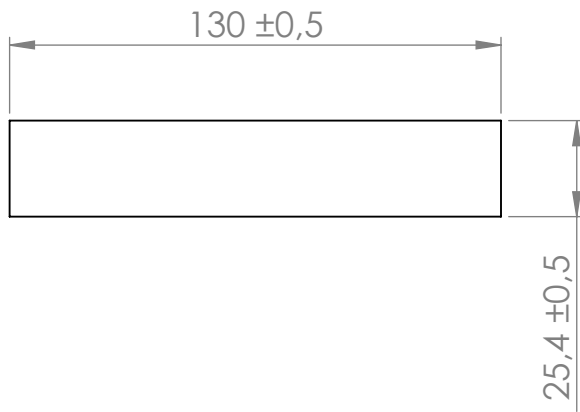
Barra Lateral

DES. Nº

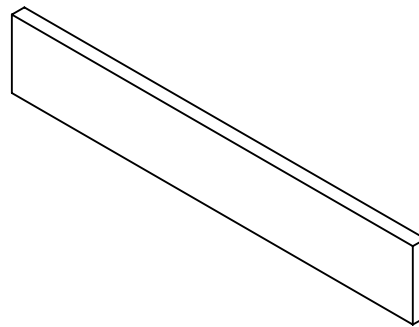
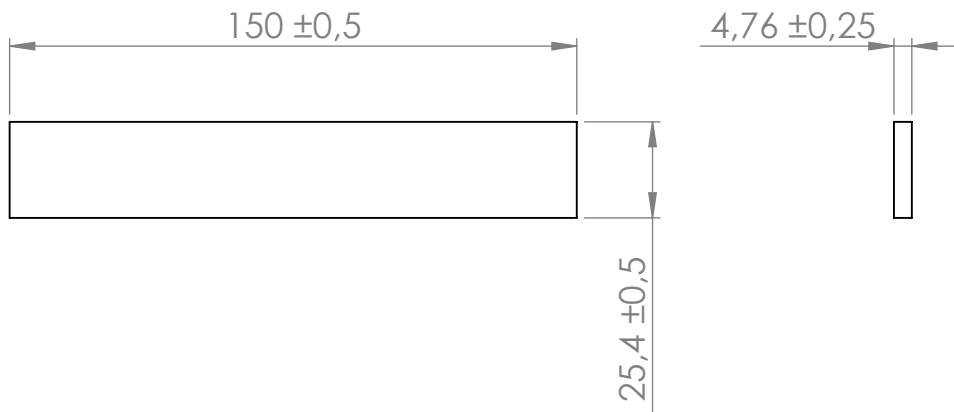
A4

ESCALA: 1:5

FOLHA 1 DE 13



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:				ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DES. Diogo				ASSINATURA		DATA		TÍTULO:  <b>Frontal Carrinho</b>			
VERIF.								DES. Nº			
APROV.											
MANUF								A4			
QUALID											
						MATERIAL: <b>Aço inox AISI 304</b>		ESCALA: 1:2			
						PESO:		FOLHA 2 DE 13			



SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
ACABAM. SUPERFÍCIE:  
TOLERÂNCIAS:  
LINEAR:  
ANGULAR:

ACABAMENTO:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.	Díogo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF					
QUALID					
				MATERIAL:	
				Aço inox AISI 304	
				PESO:	

TÍTULO:

Frontal Estrutura

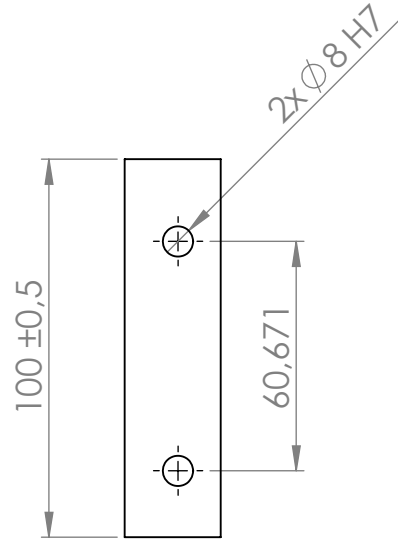
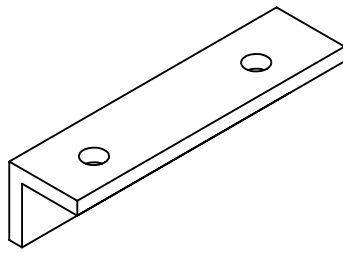
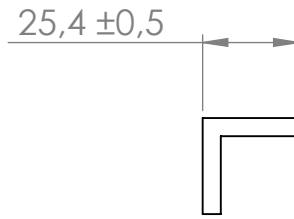
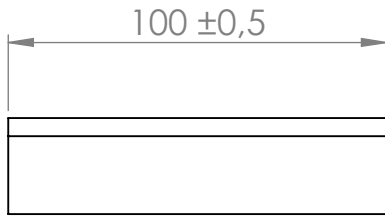
DES. Nº

A4

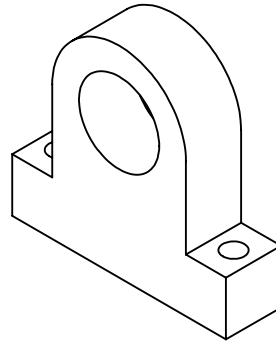
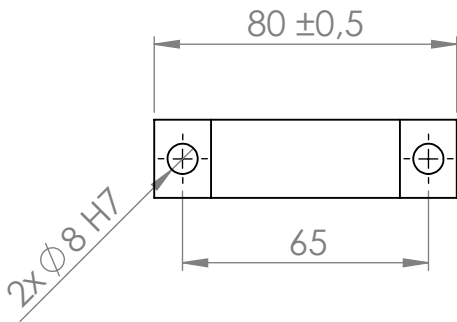
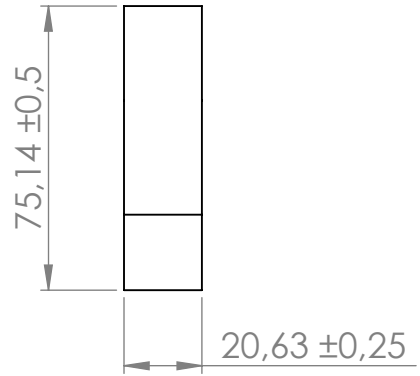
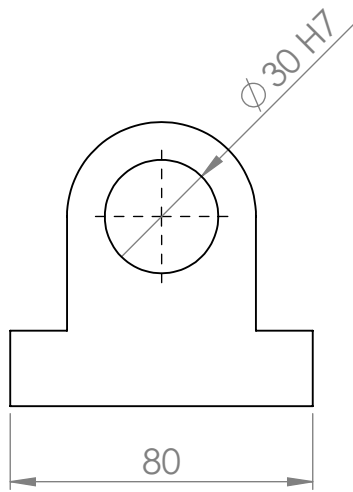
ESCALA: 1:2

FOLHA 3 DE 13





SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:				ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DES. Diogo				ASSINATURA		DATA		TÍTULO:  <h1>Lateral Carrinho</h1>			
VERIF.								DES. Nº			
APROV.								MATERIAL: <b>Aço inox AISI 304</b>			
MANUF								PESO:			
QUALID								ESCALA: 1:2			
								FOLHA 4 DE 13			
								A4			



SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
ACABAM. SUPERFÍCIE:  
TOLERÂNCIAS:  
LINEAR:  
ANGULAR:

ACABAMENTO:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.	Diogo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF					
QUALID					
				MATERIAL:	
				Aço inox AISI 304	
				PESO:	

TÍTULO:

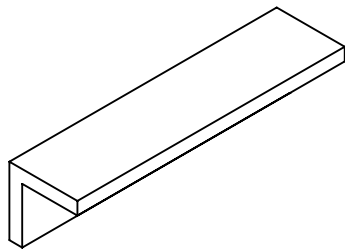
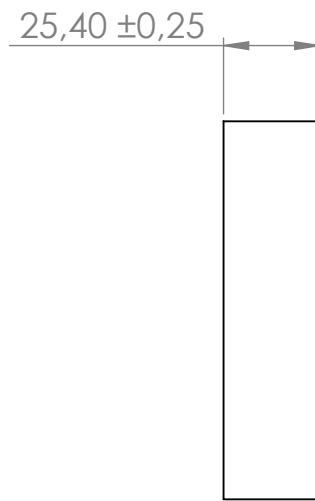
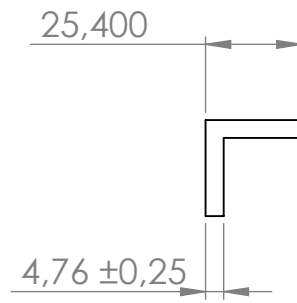
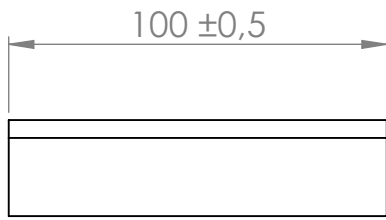
Mancal

DES. Nº

A4

ESCALA: 1:2

FOLHA 5 DE 13



SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
ACABAM. SUPERFÍCIE:  
TOLERÂNCIAS:  
LINEAR:  
ANGULAR:

ACABAMENTO:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.	Diogo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF					
QUALID					
				MATERIAL:	
				Aço inox AISI 304	
				PESO:	

TÍTULO:

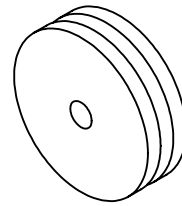
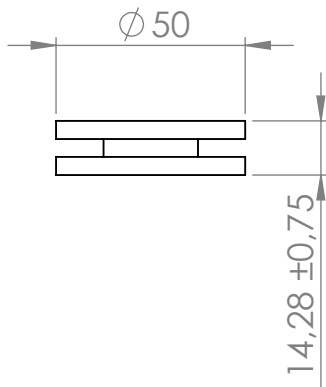
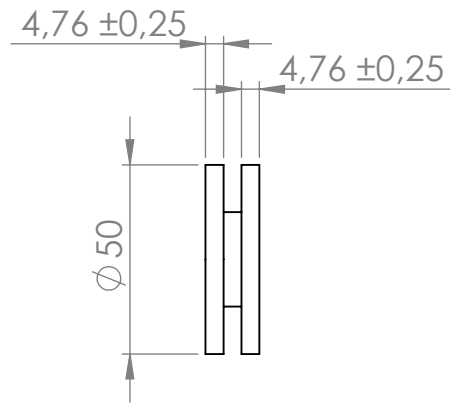
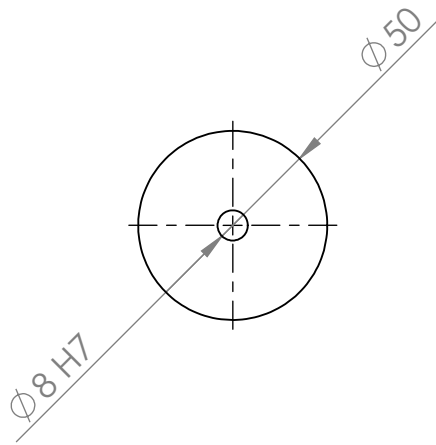
Barra Menor

DES. Nº

A4

ESCALA: 1:2

FOLHA 6 DE 13



SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
ACABAM. SUPERFÍCIE:  
TOLERÂNCIAS:  
LINEAR:  
ANGULAR:

ACABAMENTO:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.	Diogo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF					
QUALID					
				MATERIAL:	
				Aço inox AISI 304	
				PESO:	

TÍTULO:

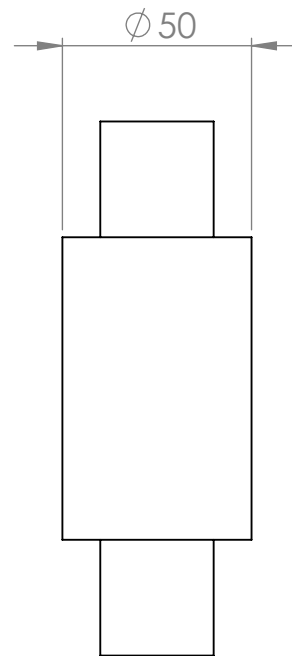
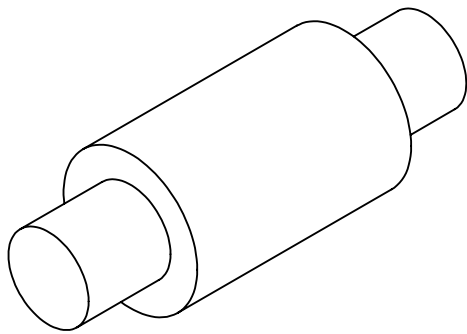
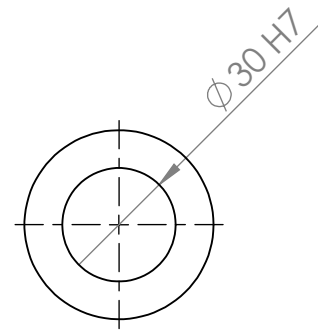
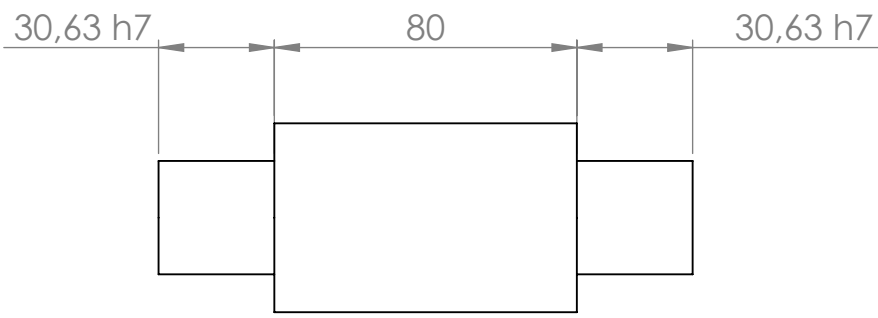
Roda

DES. Nº

A4

ESCALA: 1:2

FOLHA 7 DE 13



SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
ACABAM. SUPERFÍCIE:  
TOLERÂNCIAS:  
LINEAR:  
ANGULAR:

ACABAMENTO:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.	Diogo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF					
QUALID					
				MATERIAL:	
				Aço inox AISI 304	
				PESO:	

TÍTULO:

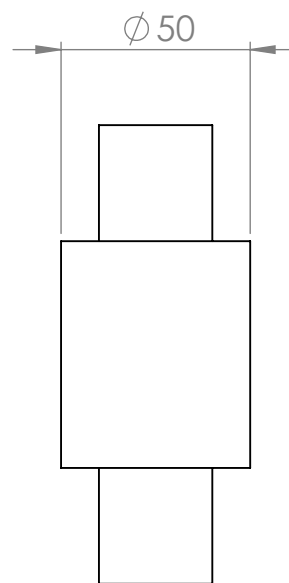
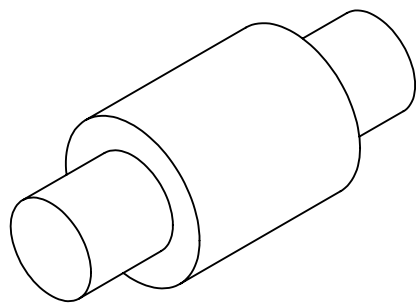
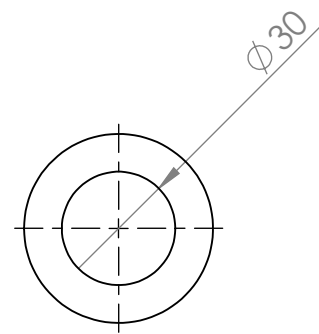
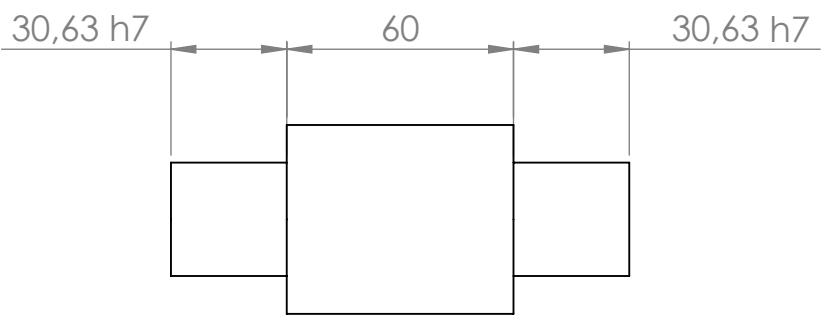
Rolo Superior

DES. Nº

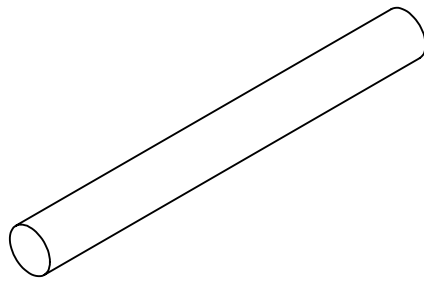
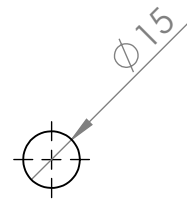
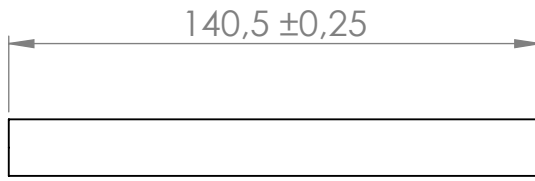
A4

ESCALA: 1:2

FOLHA 8 DE 13



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
DES. Diogo						<h1>Rolo inferior</h1>			
VERIF.									
APROV.									
MANUF.									
QUALID.				MATERIAL:		DES. Nº		A4	
				Aço inox AISI 304					
				PESO:		ESCALA: 1:2		FOLHA 9 DE 13	



SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
ACABAM. SUPERFÍCIE:  
TOLERÂNCIAS:  
LINEAR:  
ANGULAR:

ACABAMENTO:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.	Diogo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF					
QUALID					
				MATERIAL:	
				Aço inox AISI 304	
				PESO:	

TÍTULO:

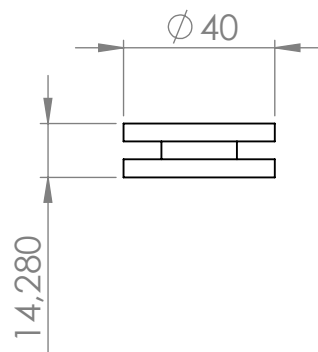
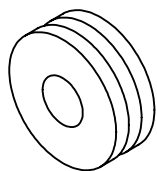
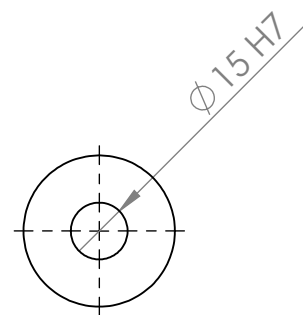
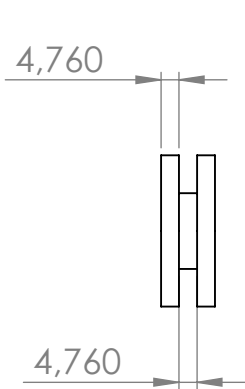
Eixo roldanas

DES. Nº

A4

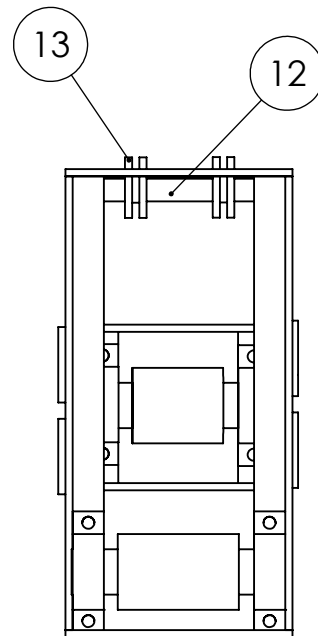
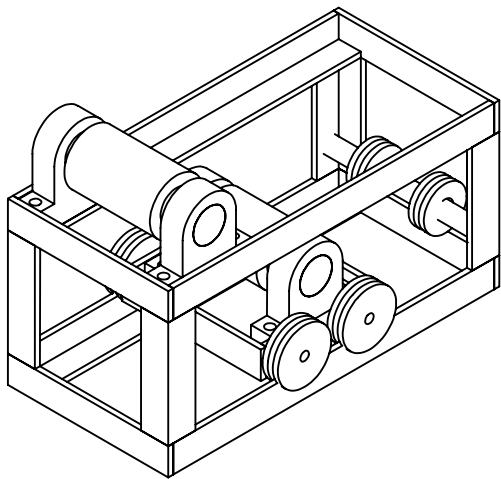
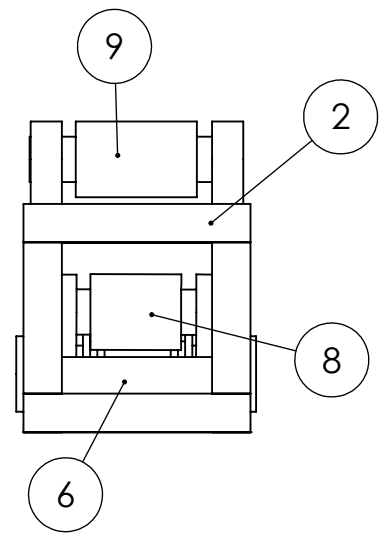
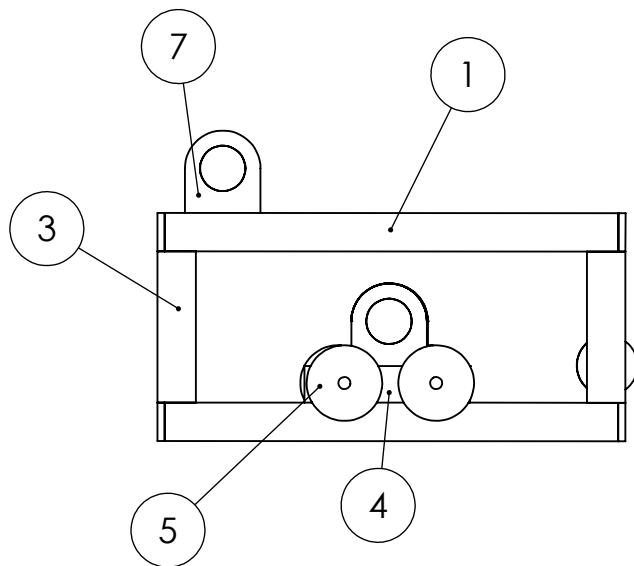
ESCALA: 1:2

FOLHA 10 DE 13



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
DES. Diogo						<h1>Roldanas</h1>			
VERIF.									
APROV.									
MANUF									
QUALID				MATERIAL:		DES. Nº		A4	
				Aço inox AISI 304					
				PESO:		ESCALA: 1:5		FOLHA 11 DE 13	





SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
ACABAM. SUPERFÍCIE:  
TOLERÂNCIAS:  
LINEAR:  
ANGULAR:

ACABAMENTO:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.	Diogo				
VERIF.					
APROV.					
MANUF					
QUALID					
				MATERIAL:	
				Aço inox AISI 304	
				PESO:	

TÍTULO:

# Tensionador

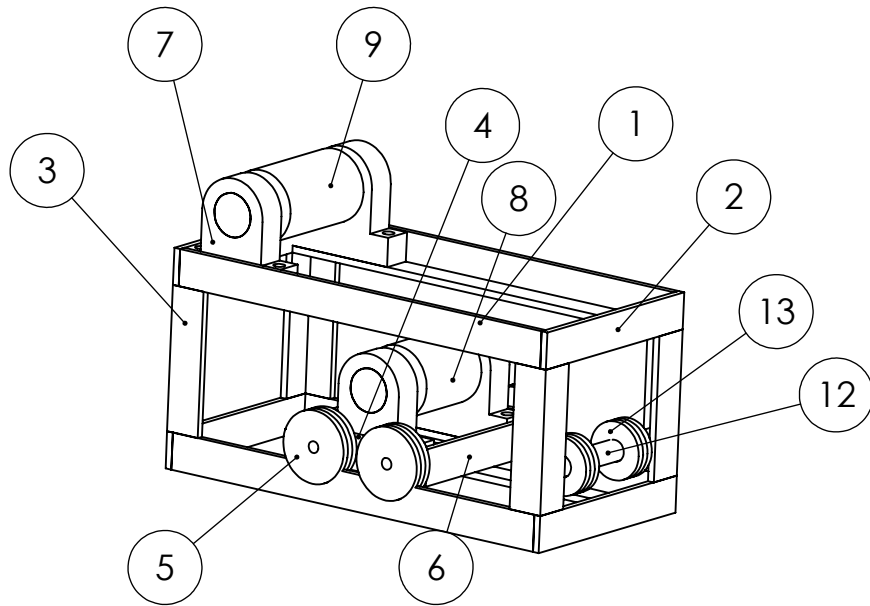
DES. Nº

A4

ESCALA: 1:5

FOLHA 12 DE 13

Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QDT.
1	Barra Lateral	Estrutura	4
2	Frontal	Estrutura	4
3	Menor	Estrutura	4
4	Lateral carrinho	Carrinho	2
5	Roda	Carrinho	4
6	Frontal carrinho	Carrinho	2
7	Mancal	Posicionar os rolos	4
8	Rolo	Eixo direcionador de fibras	1
9	Rolo maior	Eixo direcionador de fibras	1
10	Parafuso fenda M8	Fixação do mancal	12
11	Porca M8	Fixação do mancal	12
12	Eixo roldanas	Eixo para as roldanas	1
13	Roldana	Direcionar o peso	2



SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
ACABAM. SUPERFÍCIE:  
TOLERÂNCIAS:  
LINEAR:  
ANGULAR:

ACABAMENTO:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES.					
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUALID.					
				MATERIAL:	
				PESO:	

TÍTULO:

# Lista de peças

DES. Nº

A4

ESCALA: 1:5

FOLHA 13 DE 13