

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS- GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**DIEGO MORAIS JUNQUEIRA**

**TUBO PARA PRÓTESE DE MEMBRO INFERIOR**  
**UTILIZANDO ESTRUTURA DE TRAVESSAS RÍGIDAS**

Itajubá, 2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS- GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**DIEGO MORAIS JUNQUEIRA**

**TUBO PARA PRÓTESE DE MEMBRO INFERIOR**  
**UTILIZANDO ESTRUTURA DE TRAVESSAS RÍGIDAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

**Orientador:** Antonio Carlos Ancelotti Junior

**Coorientador:** Márcio Eduardo Silveira

Itajubá, 2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS- GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**DIEGO MORAIS JUNQUEIRA**

**TUBO PARA PRÓTESE DE MEMBRO INFERIOR**  
**UTILIZANDO ESTRUTURA DE TRAVESSAS RÍGIDAS**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 16 de fevereiro de 2017, conferindo ao autor o título de *Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica*.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Claudio Pardini

Prof. Dr. Sebastião Simões da C. Júnior

Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Junior

Itajubá, 2018

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a Deus por tudo que me proporcionou até hoje. Aos meus pais João Carlos Junqueira e Rosinéia Moraes Junqueira pelos ensinamentos, amor e dedicação.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me guiou e concedeu persistência e sabedoria para continuar, coragem para acreditar, força para não desistir e proteção para me amparar nos dias difíceis.

Agradeço aos meus pais, João Carlos Junqueira e Rosinéia Morais Junqueira, e ao meu irmão, Mateus Morais Junqueira, pelo apoio, amor e força para seguir em frente.

À minha noiva, Eveline Lara Oliveira Reis pelo carinho, amor, compreensão e paciência, por sempre estar ao meu lado, me incentivando e amparando da melhor forma.

Ao meu Orientador, Dr. Antonio Carlos Ancelotti Junior pela amizade, dedicação a arte de ensinar, experiência transmitida e dedicação a este trabalho.

Ao meu Coorientador, Dr. Márcio Eduardo Silveira pela amizade e por dar suporte fundamental a este trabalho.

Aos amigos do NTC, pelo companheirismo e ajuda nas horas difíceis.

Aos funcionários da UNIFEI, pela ajuda e suporte para a realização deste trabalho.

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro.

À Altair Hyperworks, pela licença universitária do programa computacional de elementos finitos.

“Você faz suas escolhas e suas escolhas fazem você.”

**Willian Shakespeare**

## RESUMO

As próteses para amputações de membros inferiores objetivam dar ao usuário condições para que tenha uma vida normal, ou seja, possam voltar a caminhar e realizar tarefas do cotidiano. Os tubos protéticos geralmente são estruturas tubulares sem juntas ou partes móveis. Em amputações de membros inferiores substitui o papel dos ossos tíbia e fíbula como estrutura de suporte e transferência de carga durante a caminhada ou corrida. Comumente, os tubos protéticos são fabricados utilizando materiais metálicos como aços inox, alumínio e titânio. A massa destes tubos geralmente é elevada em comparação com os tubos fabricados em compósito de matriz polimérica reforçado com fibra de carbono. Sendo assim, este trabalho tem como principal objetivo projetar, fabricar e analisar a viabilidade de um novo conceito de tubo, fabricado em material compósito, que faz uso de estrutura de travessas rígidas e camada interna de suporte estrutural. Para a validação dos tubos propostos por este trabalho, foi utilizada a norma NBR ISO 10328 que especifica os ensaios e condições de carga que a estrutura deveria suportar. Para o projeto inicial, foi utilizado software de elementos finitos para os cálculos estruturais e validação do tubo. Após a simulação numérica, foi realizado a fabricação dos tubos através de enrolamento manual da fibra de carbono na camada interna de polímero ABS e a moldagem por infusão de resina assistida à vácuo. Após a fabricação dos corpos de prova, ensaios mecânicos de torção, compressão e impacto foram realizados de acordo com a norma para a comprovação das estruturas propostas por este trabalho. Assim, os resultados obtidos por ensaios mecânicos foram comparados com os de simulação numérica para a obtenção das correlações de valores, onde mostraram que as correlações entre a simulação numérica e os ensaios mecânicos ficaram entre 93,3% a 98,5%. Além disso, todas as configurações de tubos de travessas rígidas com camada interna propostas por este trabalho obtiveram resultados superiores aos exigidos pela norma. Sendo assim, o objetivo de se obter um novo conceito de tubo para próteses de membros inferiores foi alcançado.

**PALAVRAS CHAVES:** Tubo protético, Prótese Transtibial, Estrutura de Travessas Rígidas, Elementos Finitos

## ABSTRACT

The prostheses for lower limbs amputations aim to give the conditions for the person to have a normal life, i.e., they can walk again and perform daily tasks. Prosthetic tubes are generally tubular structures without joints or moving parts. In lower limb amputations replace the tibia and fibula bones as support structure and load transfer during walking or running. Commonly, prosthetic tubes are manufactured using metal materials such as stainless steel, aluminum and titanium. The mass of these tubes is generally high compared to tubes made of carbon fiber reinforced polymer matrix (CFRP) composite. Therefore, this work has the objective of design, manufacturing and analyzing the feasibility of a new tube concept, made of composite material, which makes use of lattice structure and internal layer. Until the present moment, lower limb prosthesis tubes using lattice structure and internal layer have never been studied and / or tested to date. For the validation of the tubes proposed by this work, was used the standard ISO 10328: 2002 that specifies the tests and load conditions that the structure should support. For first design, finite element software was used for structural calculations and tube validation. After the numerical simulation, the tubes were fabricated by manual winding of the carbon fiber in the internal layer of ABS polymer and vacuum assisted resin infusion molding (VARTM). After the test specimens were manufactured, mechanical torsion, compression and impact tests were performed according to the standard for the verification of the structures proposed by this work. Thus, the results obtained by mechanical tests were compared with numerical simulation to obtain the correlation of values, where they showed that the correlation between the numerical simulation and the mechanical tests was between 93.3% to 98.5%. In addition, all configurations of lattice tubes proposed by this work have obtained superior results than those required by the standard. Thus, the objective of obtaining a new concept of tube for lower limb prostheses was reached.

**KEYWORDS:** Pylon, Transtibial Prosthetics, Grid Stiffened Structure, Finite Elements

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xvi</b>
<b>LISTA DE SIMBOLOS.....</b>	<b>xviii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1 Objetivos .....	21
1.2 Justificativas .....	21
1.3 Estrutura do trabalho .....	22
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>23</b>
2.1 Materiais Compósitos.....	23
2.2 Próteses biomecânicas.....	27
2.3 Próteses transtibiais .....	31
2.4 Tubo protético .....	32
2.5 Estruturas de travessas rígidas.....	35
2.6 Requisitos de projeto.....	43
2.7 Simulação numérica pelo método dos elementos finitos .....	44
<b>3. MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>46</b>
3.1 Materiais.....	48
3.2 Projeto dos tubos de travessas rígidas e camada interna.....	51
3.2.1 Seleção das configurações das estruturas de travessas rígidas .....	52
3.2.2 Cálculos analíticos das estruturas de travessas rígidas .....	53
3.2.3 Projeto das estruturas de travessas rígidas e camada interna.....	54
3.2.4 Modelagem das estruturas.....	56
3.3 Processos de fabricação.....	61
3.3.1 Fabricação da camada interna.....	62
3.3.2 Enrolamento da fibra contínua de carbono .....	64
3.3.3 Processamento das estruturas via VARTM .....	65
3.4 Ensaio estáticos.....	68
3.4.1 Projeto e fabricação dos dispositivos de ensaio.....	68
3.4.2 Ensaio de torção .....	70

3.4.3	Ensaio de compressão dos tubos de travessas rígidas.....	71
3.4.4	Ensaio de compressão da estrutura parcial (transtibial).....	73
3.5	Caracterização do volume de fibras .....	75
3.6	Ensaio de impacto .....	77
3.7	Microscopia.....	79
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>80</b>
4.1	Análise estrutural pelo método dos elementos finitos.....	80
4.1.1	Análise de torção.....	80
4.1.2	Análise de compressão.....	85
4.2	Ensaio estáticos.....	89
4.2.1	Ensaio de torção .....	90
4.2.2	Ensaio de compressão .....	92
4.3	Análises das falhas e correlação dos resultados numéricos e experimentais .....	97
4.4	Análise de impacto .....	101
4.5	Análise da estrutura parcial .....	103
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>106</b>
5.1	Conclusões .....	106
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	108
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>109</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Disposição dos tipos de reforço. Fonte: (KAW, 2006).....	24
Figura 2.2 - Vários tipos de compósitos poliméricos em aplicações corporais. Fonte: Adaptado de (RAMAKRISHNA <i>et al.</i> , 2001).....	25
Figura 2.3 - Molde e a perna protética de Cápua, respectivamente. Fonte: (BLIQUEZ, 1983).....	28
Figura 2.4 - Perna protética proposta por Ambroise Paré e Le Petit Lorrain. Fonte: (BENHAMOU, 1994).....	28
Figura 2.5 – Desenho da prótese de Van L. Phillips fabricada em material compósito. Fonte: (PHILLIPS, 1983).....	29
Figura 2.6 – Próteses de corrida: (A) Cheetah, (B) flex-sprint, (C) flex-run, (D) sprinter e (E) C-sprint. Fonte: (NOLAN, 2008) .....	30
Figura 2.7 - Prótese modular para amputações de membros inferiores: a) Tubo protético, b) Suporte, c) Pé protético. Fonte: Autor.....	31
Figura 2.8 – Estrutura de travessas rígidas. Fonte: Adaptado de (SORRENTINO <i>et al.</i> , 2016).....	36
Figura 2.9 – (a) Proton M e (b) sua estrutura de travessas rígidas. Fonte: (VASILIEV; BARYNIN; RASIN, 2001).....	37
Figura 2.10 - a) Modelagem numérica da fuselagem e b) fabricação da fuselagem. Fonte: Adaptado de (VASILIEV; RAZIN, 2006).....	38
Figura 2.11- Parâmetros geométricos de estrutura de travessas rígidas. Fonte: Adaptado de (VASILIEV; RAZIN, 2006) .....	39
Figura 2.12 - a) Enrolamento da fibra de carbono impregnada, b) posicionamento das camadas de <i>prepreg</i> , c) aplicação do filme plástico, d) aplicação do vácuo, e) estrutura finalizada e f) teste experimental da estrutura. Fonte: Adaptado de (SORRENTINO <i>et al.</i> , 2016).....	42
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas do desenvolvimento do trabalho. Fonte: Autor .....	47

Figura 3.2 - a) CF26, b) CF30 e c) CF40. Fonte: Autor .....	54
Figura 3.3 - Camada interna da estrutura CF26. Fonte: Autor .....	55
Figura 3.4 - Orientação dos compósitos das travessas rígidas helicoidais e circulares. Fonte: Autor .....	57
Figura 3.5 – Criação das camadas do laminado para as travessas rígidas helicoidais (azul) e circulares (vermelho). Fonte: Autor .....	58
Figura 3.6 - Detalhe da modelagem em elementos finitos do tubo protético para a estrutura CF26. Fonte: Autor .....	59
Figura 3.7 – Elemento rígido (Azul), força de compressão (Amarelo), força de torção (Verde) e as restrições (Vermelho) aplicadas na CF26. Fonte: Autor .....	59
Figura 3.8 – Processo de impressão 3D. Fonte: Adaptado de (CANTRELL <i>et al.</i> , 2017) .....	62
Figura 3.9 – Impressão da camada interna da CF26. Fonte: Autor .....	63
Figura 3.10 – Enrolamento manual do filamento contínuo de fibra de carbono na CF40. Fonte: Autor .....	65
Figura 3.11 – Processo VARTM. Fonte: Adaptado de (ZHU, 2010) .....	65
Figura 3.12 – Estrutura posicionada sobre a bolsa de vácuo e envolta em tecido desmoldante. Fonte: Autor .....	66
Figura 3.13 – Posicionamento dos registros e dos Spiradutos. Fonte: Autor .....	67
Figura 3.14 – Fechamento da bolsa de vácuo. Fonte: Autor .....	67
Figura 3.15 - Estrutura na estufa para realizar a cura. Fonte: Autor .....	68
Figura 3.16 - Suportes para ensaios estáticos. Fonte: Autor .....	69
Figura 3.17 - Dispositivos de ensaio de compressão e torção. Fonte: Autor .....	70
Figura 3.18 – Montagem dos suportes e do tubo de travessas rígidas para o ensaio de torção. Fonte: Autor .....	71

Figura 3.19 - Montagem dos suportes de ensaio e do tubo de travessas rígidas na máquina de ensaio universal para o ensaio de compressão. Fonte: Autor.....	73
Figura 3.20 – Posição de ensaio frontal. Fonte: Autor .....	74
Figura 3.21 - Posição de ensaio calcanhar. Fonte: Autor .....	74
Figura 3.22 – Ciclo térmico utilizado para a degradação da resina. Fonte: Autor .....	76
Figura 3.23 – Máquina para ensaio de impacto. Fonte: Autor.....	77
Figura 3.24 – Posicionamento par o ensaio de impacto a) Tubo de travessas rígidas, b) Camada interna e c) Tudo de fibra de carbono/resina epóxi. Fonte: Autor.....	78
Figura 3.25 - Estereomicroscópio <i>Feldmann Wild Leitz SMZ 7.5</i> . Fonte: Autor .....	79
Figura 4.1 – Resultados de torção para estruturas de travessas rígidas sem camada interna. Fonte: Autor .....	81
Figura 4.2 - Resultados de torção para estrutura de travessas rígidas com camada interna. Fonte: Autor .....	82
Figura 4.3 – Carga máxima em torção para as estruturas CF26, CF30 e CF40, respectivamente. Fonte: Autor .....	83
Figura 4.4 – Análise de Falha em carga máxima de torção para as estruturas CF26, CF30 e CF40, respectivamente. Fonte: Autor .....	84
Figura 4.5 - Resultados de compressão para estruturas de travessas rígidas sem camada interna. Fonte: Autor .....	85
Figura 4.6 – Resultados de compressão para estrutura de travessas rígidas com camada interna. Fonte: Autor .....	86
Figura 4.7- Carga máxima em torção para as estruturas CF26, CF30 e CF40, respectivamente. Fonte: Autor .....	87
Figura 4.8 - Análise de Falha em carga máxima de compressão para as estruturas CF26, CF30 e CF40, respectivamente. Fonte: Autor .....	88
Figura 4.9 – Curva dos corpos de prova ensaiados em torção para a estrutura CF26. Fonte: Autor .....	90

Figura 4.10 - Curva dos corpos de prova ensaiados em torção para a estrutura CF30. Fonte: Autor .....	91
Figura 4.11 - Curva dos corpos de prova ensaiados em torção para a estrutura CF40. Fonte: Autor .....	91
Figura 4.12 - Curva dos corpos de prova do ensaio de comprovação para a estrutura CF26. Fonte: Autor .....	93
Figura 4.13 - Curva dos corpos de prova do ensaio de comprovação para a estrutura CF30. Fonte: Autor .....	93
Figura 4.14 - Curva dos corpos de prova do ensaio de comprovação para a estrutura CF40. Fonte: Autor .....	94
Figura 4.15 - Curva dos corpos de prova do ensaio de falha para a estrutura CF26. Fonte: Autor .....	95
Figura 4.16 - Curva dos corpos de prova do ensaio de falha para a estrutura CF30. Fonte: Autor .....	95
Figura 4.17 - Curva dos corpos de prova do ensaio de falha para a estrutura CF40. Fonte: Autor .....	96
Figura 4.18 – Análise da falha no Tubo 3 da estrutura CF26. Fonte: Autor .....	96
Figura 4.19 – Análise da falha característica da estrutura CF30 por microscopia óptica. Fonte: Autor .....	99
Figura 4.20 - Análise da falha característica da estrutura CF40 por microscopia óptica. Fonte: Autor .....	99
Figura 4.21 – Falha característica a) CF26, b) CF30 e c) CF40. Fonte: Autor.....	100
Figura 4.22 – Modo de falha das estruturas CF26, CF30 e CF40 obtidos por simulação numérica. Fonte: Autor .....	100
Figura 4.23 – Ensaio de impacto a) CF26, b) CF30, c) CF40, d) Camada interna e e) Tubo CFRP. Fonte: Autor .....	102

- Figura 4.24 – Ensaio estático de comprovação da estrutura parcial. Fonte: Autor ..... 103
- Figura 4.25 - Ensaio estático de ruptura da estrutura parcial. Fonte: Autor ..... 104
- Figura 4.26 - Falha dos tubos no pé e calcanhar, respectivamente. Fonte: Autor ..... 105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas de materiais orgânicos / membros corporais. Fonte: (LEDERMAN <i>et al.</i> , 2015).....	26
Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas típicas de materiais compósitos e polímeros. Fonte: (LEDERMAN <i>et al.</i> , 2015).....	26
Tabela 2.3 – Casos de otimização estrutural. Fonte: Autor .....	40
Tabela 3.1 - Dados do Aço Carbono SAE 1020. Fonte: Adaptado de (JUNQUEIRA; SILVEIRA; ANCELOTTI JUNIOR, 2018) .....	48
Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do ABS pelo processo de impressão 3D. Fonte: (CANTRELL <i>et al.</i> , 2017).....	48
Tabela 3.3 - Dados físicos e técnicos da fibra de carbono fornecidos pelo fabricante .....	49
Tabela 3.4 - Dados físicos e técnicos do sistema de resina fornecidos pelo fabricante....	49
Tabela 3.5 - Propriedades do compósito de fibra de carbono T300/resina epóxi LY556/HT972. Fonte: Adaptado de (MADHAVI <i>et al.</i> , 2009) .....	50
Tabela 3.6 – Materiais utilizados para o processo de infusão. Fonte: Autor.....	51
Tabela 3.7 - Condições de carga para o nível A100 da norma. Fonte: Adaptado de NBR ISO 10328:2002 .....	51
Tabela 3.8 - Seleção dos tipos de estruturas de travessas rígidas em função do ângulo $\varphi$ . Fonte: Autor .....	52
Tabela 3.9 - Definição dos valores das variáveis independentes de projeto. Fonte: Autor.....	53
Tabela 3.10 - Parâmetros de impressão 3D. Fonte: Adaptado de (CANTRELL <i>et al.</i> , 2017).....	63
Tabela 3.11 - Condições de carregamento para estrutura transtibial. Fonte: Adaptado de NBR ISO 10328:2002.....	75
Tabela 4.1- Valores, em torção, da margem de segurança para as estruturas de travessas rígidas sem cama interna. Fonte: Autor .....	81

Tabela 4.2 - Valores, em torção, da margem de segurança para as estruturas de travessas rígidas com camada interna. Fonte: Autor ..... 82

Tabela 4.3 - Valores, em compressão, da margem de segurança para as estruturas de travessas rígidas sem cama interna. Fonte: Autor..... 85

Tabela 4.4 – Valores, em compressão, da margem de segurança para as estruturas de travessas rígidas com camada interna. Fonte: Autor ..... 86

Tabela 4.5 - Correlação entre os resultados de compressão com os seus respectivos volumes de fibra. Fonte: Autor ..... 97

Tabela 4.6 - Eficiência em resistência a compressão dos tubos de travessas rígidas propostos por este trabalho. Fonte: Autor..... 98

Tabela 4.7 – Correlação entre os resultados experimentais e numéricos. Fonte: Autor. 101

Tabela 4.8 - Resultado de absorção de energia de impacto. Fonte: Autor..... 102

## LISTA DE SIMBOLOS

$D$  - Diâmetro do tubo de travessas rígidas

$L$  - Comprimento do tubo de travessas rígidas

$h$  - Espessura das travessas rígidas

$\varphi$  - Ângulo das travessas helicoidais em relação ao eixo axial da estrutura

$\delta_h$  - Largura das travessas helicoidais

$\delta_c$  - Largura das travessas circulares

$\alpha_h$  - Distância entre as travessas helicoidais

$\alpha_c$  - Distância entre as travessas circulares

$\rho_h$  - Massa específica das travessas helicoidais

$\rho_h$  - Massa específica das travessas helicoidais

$\bar{h}$  - Espessura média das travessas rígidas

$\bar{\delta}_h$  - Largura média das travessas helicoidais

$\bar{\delta}_c$  - Largura média das travessas circulares

$k$  - Fator de flambagem

$\bar{\rho}$  - Massa específica média das travessas rígidas

$P$  - Fator de carregamento

$M$  - Massa da estrutura

$\sigma_h$  - Tensão de ruptura das travessas helicoidais

$\sigma_c$  - Tensão de ruptura das travessas circulares

$E_h$  - Módulo de elasticidade das travessas helicoidais

$E_c$  - Módulo de elasticidade das travessas circulares

## 1. INTRODUÇÃO

As próteses para amputações de membros inferiores objetivam dar ao usuário condições para que tenha uma vida normal, ou seja, possam voltar a caminhar e realizar tarefas do cotidiano (SHASMIN *et al.*, 2007). Geralmente, as próteses para amputações de membros inferiores são constituídas de alguns componentes estruturais como o pé protético, o tubo protético e o suporte para o tubo protético.

Os tubos protéticos (do inglês *Pylon*) geralmente são estruturas tubulares sem juntas ou partes móveis (MARTINS, 2015). Em amputações de membros inferiores, quando conectado a um conjunto soquete/pé, substitui o papel dos ossos tíbia e fíbula como estrutura de suporte e transferência de carga durante a caminhada ou corrida.

Comumente, os tubos protéticos são fabricados utilizando materiais metálicos como aços inox, alumínio e titânio (SHASMIN *et al.*, 2007). A massa destes tubos geralmente é elevada em comparação com os tubos fabricados em compósito de matriz polimérica reforçado com fibra de carbono (CFRP, do inglês, *Carbon Fiber Reinforced Polymer*).

O conceito de material compósito está vinculado à combinação de dois tipos de materiais dissimilares para formar um novo material composto com propriedades mecânicas melhores que os de origem possuem separadamente (STRONG, 2008). Normalmente, o material compósito é formado por uma fase polimérica chamada de matriz e por uma fase de reforço geralmente constituída por fibras (KAW, 2006). Essa combinação geralmente acarreta em um material compósito com propriedades superiores aos materiais tradicionalmente, dentre as quais está a elevada rigidez, baixo peso, resistência à corrosão e resistência à fadiga (JONES, 1999).

Para a fabricação de tubos protéticos em materiais compósitos, podem ser adotados diversos processos que devem se adequar a complexidade geométrica, espessura, comprimento e custo (MARTINS, 2015). Alguns processos atualmente utilizados para a manufatura de tubos protéticos são: Enrolamento filamental, pultrusão, uso do pré-impregnados com moldagem por *bladder* e moldagem por infusão de resina assistida à vácuo (VARTM).

No presente trabalho, o processo de manufatura utilizado para a confecção do tubo protético de travessas rígidas foi de moldagem por infusão de resina assistida à vácuo (VARTM). Neste processo, as camadas de fibras (laminado) são posicionadas

contra um molde e envoltas em um filme plástico cujo objetivo é o de compactar as lâminas e ao mesmo tempo servir de contramolde flexível (MIL-HDBK-17, 2002). Para a aplicação do vácuo, utiliza-se uma bomba de vácuo conectada a uma saída para a resina. Assim, com o auxílio do vácuo, realiza-se a infusão de resina através do laminado ocasionando a impregnação das fibras.

O tubo protético objeto de estudo no presente trabalho é caracterizado por sua alta resistência mecânica associado ao seu baixo peso. Mesmo em comparação com o seguimento de tubos em materiais compósitos com reforço de fibra de carbono, o seu peso é bem menor e suas propriedades mecânicas possuem equidade de valores. Sua diferença em relação aos tubos protéticos tradicionais está em possuir travessas rígidas helicoidais e circulares servindo como reforço estrutural. A interseção entre as travessas rígidas helicoidais e circulares, que são conhecidas como nós, formam triângulos que garantem estabilidade, rigidez e alívio de massa para a estrutura. Além disso, o tubo protético possui uma camada interna de suporte estrutural fabricada em polímero.

O projeto do tubo protético utilizando estrutura de travessas rígidas foi realizado em software CAD (*Computer Aided Design*) e sua análise estrutural feita por programa computacional de elementos finitos da *Altair Hyperworks®*. As análises por elementos finitos são largamente utilizadas para obtenção de soluções aproximadas para modelagem e validação de problemas de engenharia (SILVEIRA; FANCELLO, 2015)

Os requisitos de projeto do tubo protético como os carregamentos estáticos que o tubo deveria suportar foram regidos pela norma NBR ISO 10328:2002, ou seja, esses requisitos foram utilizados como condições de contorno para a análise por elementos finitos e assim a validação numérica e experimental do tubo protético de travessas rígidas.

Na etapa de desenvolvimento do projeto, foram realizadas simulações numéricas com três configurações distintas de tubos de travessas rígidas realizando-se uma comparação entre elas a fim de se determinar a melhor configuração. A partir da validação numérica realizou-se a fabricação, via processo VARTM, das três configurações de tubos protéticos. Após a fabricação, foram-se realizados ensaios mecânicos de compressão e torção para sua validação experimental e comparação com os dados obtidos por simulação numérica.

## 1.1 Objetivos

Como alternativa para tubos de próteses de membros inferiores disponíveis no mercado e na literatura, o trabalho tem como principal objetivo projetar, fabricar e analisar a viabilidade de um novo conceito de tubo protético, fabricado em material compósito, que faz uso de estrutura de travessas rígidas e camada interna polimérica.

Os objetivos específicos são:

- Projetar e analisar, pelo método dos elementos finitos, os tubos protéticos de travessas rígidas utilizando a norma NBR ISO 10328:2002 como referência.
- Validar as configurações estudadas através de simulação numérica pelo método dos elementos finitos e ensaios mecânicos regidos pela norma NBR ISO 10328:2002.
- Verificar os tipos de configurações de estruturas de travessas rígidas propostas por esse trabalho analisando sua viabilidade em aplicação como tubo protético.
- Verificar a correlação entre os resultados numéricos e experimentais das configurações propostas.
- Analisar o processo de fabricação do tubo para prótese de membro inferior do ponto de vista industrial.

## 1.2 Justificativas

A maioria dos tubos para próteses de membro inferior são fabricados em materiais metálicos, o que acarreta em tubos mais pesados. Do ponto de vista do usuário, um tubo mais leve e resistente implica diretamente em um maior conforto e maior segurança para caminhar e realizar as tarefas do cotidiano.

Apesar da tecnologia em materiais compósitos estar bem difundida tanto no meio acadêmico quanto na indústria, tubos protéticos para amputações de membros inferiores utilizando estrutura de travessas rígidas nunca foram estudados e/ou testados. Além disso, não foram encontrados estudos na literatura sobre a influência

de inserir uma camada interna em estruturas de travessas rígidas bem como seus efeitos nas propriedades mecânicas do tubo.

Trata-se de um estudo do ponto de vista de utilização de um novo conceito de estrutura aplicada a tubos para próteses de membros inferiores com potencial em ser alternativa aos tubos presentes no mercado e na literatura.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos conforme descritos a seguir:

O Capítulo 1 aborda uma breve introdução deste trabalho objetivando ressaltar os motivos que levaram a este estudo bem como os objetivos e suas justificativas.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura com uma breve revisão de materiais compósitos e sua aplicação na medicina moderna e biomecânica. Além disso, aborda o estado da arte de próteses biomecânicas, próteses transtibiais, tubos protéticos e estruturas de travessas rígidas finalizando com as características da norma a ser utilizada para validação dos tubos.

O Capítulo 3 apresenta informações dos materiais utilizados, e a metodologia para o projeto, fabricação e validação dos tubos protéticos tanto por análise numérica quanto por ensaios mecânicos.

O Capítulo 4 mostra os resultados obtidos por simulação numérica e experimental além de sua correlação. Apresenta também uma discussão sobre a utilização de estruturas de travessas com camada interna de suporte estrutural e sua aplicação como tubo para próteses transtibiais.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão geral deste trabalho bem como as conclusões específicas baseadas nos resultados obtidos no Capítulo 4. Além disso, traz sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Materiais Compósitos

O conceito de material compósito refere-se à união de dois ou mais materiais que se combinam em escala macroscópica para formar um terceiro material. Esse novo material, se bem projetado, apresentam melhores propriedades que os seus componentes ou constituintes não apresentam individualmente (STRONG, 2008). Um destes constituintes é chamado de reforço ou fase de reforço cujo objetivo, já referenciado pelo próprio nome, é reforçar o compósito no aspecto de suportar carregamentos estruturais. O segundo constituinte, que é responsável pela união e transferência de carga no compósito, é chamado de matriz (ANCELOTTI JUNIOR, 2006). Geralmente a fase de reforço pode ser formada por fibras ou partículas e a fase de matriz por materiais poliméricos como as resinas termorrígidas e termoplásticas (KAW, 2006).

Os materiais compósitos podem ser classificados através da geometria do reforço ou pelo tipo de matriz. Segundo Kaw (2006), a classificação quanto à forma que os reforços estão dispostos na matriz (Figura 2.1) pode ser dividida em:

- Reforço com particulados
- Reforço com fibras curtas ou descontínuas (alinhadas ou desalinhadas)
- Reforço com fibras longas (na forma de filamentos ou tecidos)

(Intencionalmente deixado em branco)

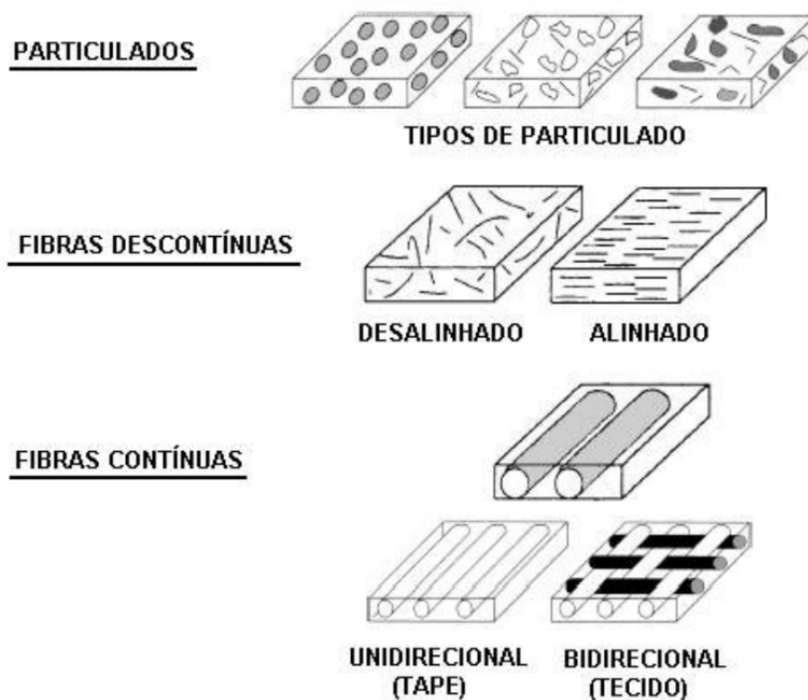
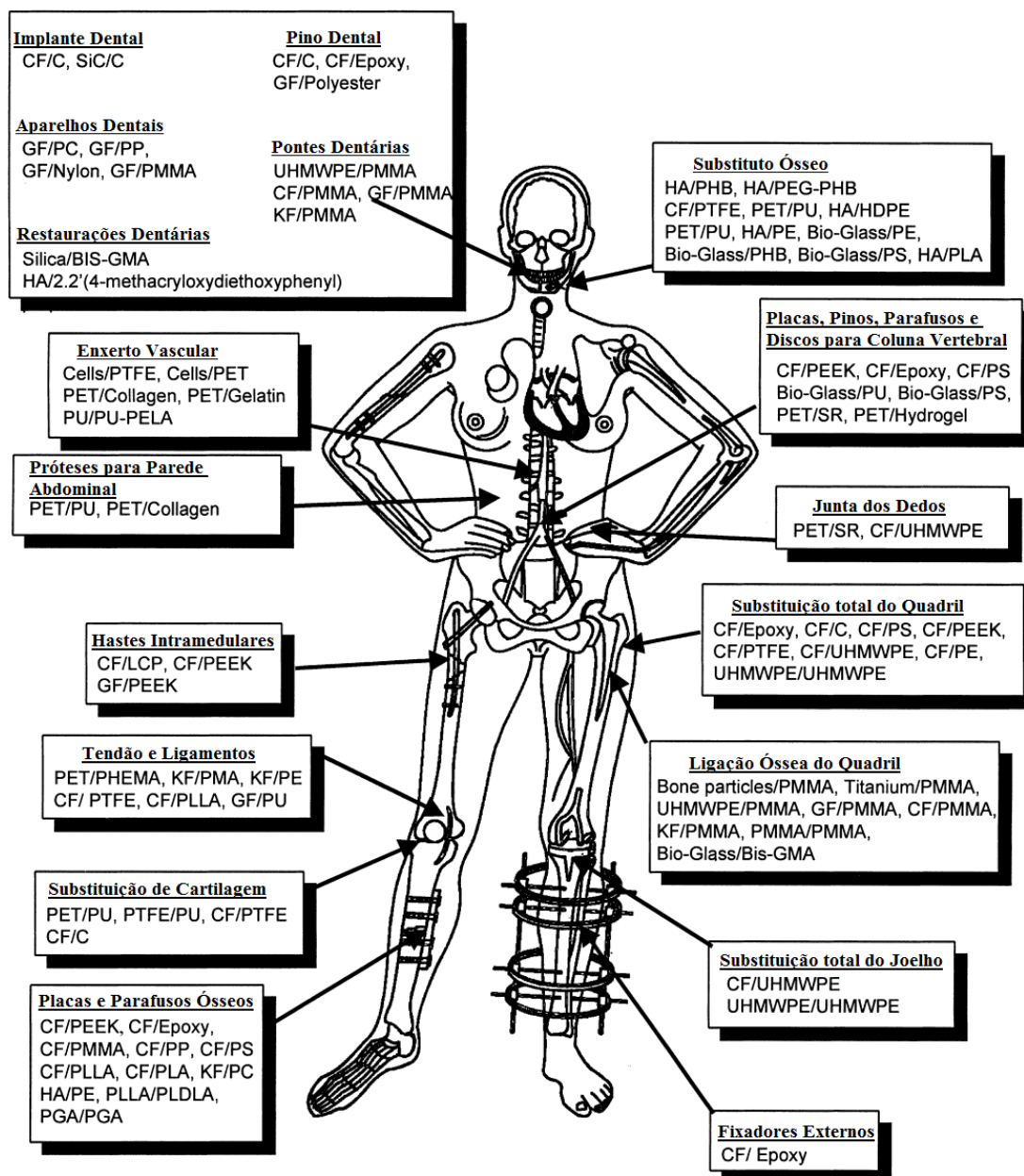


Figura 2.1 - Disposição dos tipos de reforço. Fonte: Adaptado de (KAW, 2006)

Os materiais compósitos possuem uma vasta gama de aplicações em diversos setores industriais como o aeroespacial, automotivo, construção marítima, energias renováveis, etc (ATAFF, 2013). Segundo Pardini (2000), os compósitos estruturais com matrizes poliméricas despertam o interesse para aplicações em engenharia por apresentarem baixa massa específica ( $< 2 \text{ g/cm}^3$ ) aliada à alta resistência mecânica ( $\sigma_T > 500 \text{ MPa}$ ). Um destes materiais compósitos é os de matriz polimérica reforçado com fibra de carbono (CFRP). Enfoque deste trabalho, esse tipo de compósito apresenta grande aplicação estrutural em todos os seguimentos industriais mencionados anteriormente devido as suas excelentes propriedades mecânicas.

De acordo com Ramakrishna *et al.* (2001), nas últimas décadas os compósitos começaram a ser aplicados, tanto com função estrutural quanto estética, na área da medicina moderna e biomecânica (Figura 2.2).



**CF:** Fibra de Carbono, **C:** Carbono, **GF:** Fibra de Vidro, **KF:** Fibra de Kevlar, **PMMA:** Polimetilmetacrilato, **PS:** Polissulfona, **PP:** Polipropileno, **UHMWPE:** Polietileno de Alta densidade, **PLDLA:** Poli L-DL-Lactida, **PLLA:** Poli L-Ácido Lático, **PGA:** Ácido Poliglicólico, **PC:** Policarboneto, **PEEK:** Poli-Éter-Éter-Cetona, **HA:** Hidroxiapatita, **PMA:** Polimetilacrilato, **BIS-GMA:** Bisfenol A-Glicidil Metacrilato, **PU:** Poliuretano, **PTFE:** Politetrafluoretileno, **PET:** Politereftalato de Etileno, **PEA:** Polietileno Adipato, **SR:** Borracha de Silicone, **PELA:** Copolímero em bloco de Ácido Lático e Polietileno Glicol, **LCP:** Polímeros de Cristais Líquidos, **PHB:** Polihidroxibutirato, **PEG:** Polietilenoglicol, **PHEMA:** Poli 2 Hidroxietil Metacrilato

Figura 2.2 - Vários tipos de compósitos poliméricos em aplicações corporais. Fonte: Adaptado de (RAMAKRISHNA *et al.*, 2001)

A substituição de membros corporais por compósitos de matriz polimérica está diretamente ligada à sua vasta composição, propriedades, formas e por apresentarem certa facilidade de serem fabricados com geometrias complexas (RAMAKRISHNA *et al.*, 2001). Além disso, a biocompatibilidade destes materiais é outro motivo pelo qual seu uso vem crescendo na medicina moderna (LEDERMAN *et al.*, 2015). Outra característica importante para utilização de materiais compósitos poliméricos em substituição de membros corporais está relacionada às suas propriedades mecânicas. As Tabelas 2.1 e 2.2 apresentam algumas propriedades mecânicas de materiais orgânicos/membros corporais e de alguns compósitos poliméricos e polímeros.

2.1 - Propriedades mecânicas de materiais orgânicos / membros corporais. Fonte: (LEDERMAN *et al.*, 2015)

Materiais Orgânicos / Membros Corporais	Módulo de Elasticidade (GPa)	Limite de Resistência (MPa)
Osso Cortical	17,7	133
Osso Esponjoso	0,4	7,4
Esmalte Dental	84,3	10
Dentina	11	39,3
Cartilagem das Articulações	10,5	27,5
Cartilagem Fibrosa	159,1	10,4
Ligamentos	303	29,5
Tendão	401,5	46,5

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas típicas de materiais compósitos e polímeros. Fonte: (LEDERMAN *et al.*, 2015)

Materiais Compósitos de matriz polimérica / Polímeros	Módulo de Elasticidade (GPa)	Limite de Resistência (MPa)
PE	0,88	35
PU	0,02	35
PEEK	8,3	139
PMMA	2,55	59
PET	2,85	61
Fibra de Carbono Unidirecional/Epóxi (60% Fibra)	145	1240
Fibra de Vidro Unidirecional /Epóxi (60% Fibra)	45	1020
Fibra de Aramida Unidirecional /Epóxi (60% Fibra)	76	1380

Pode-se observar comparando as tabelas que as propriedades dos materiais orgânicos/membros corporais são muito próximas a de materiais de engenharia, polímeros e compósitos, o que favorece a utilização destes materiais na substituição total ou parcial de alguns membros.

## **2.2 Próteses biomecânicas**

Desde os primórdios da humanidade, infortúnios naturais ou não-naturais como doenças, guerras, acidentes automotivos, etc., ocasionam perdas de membros corporais como dentes, braços, pernas, etc. (BLIQUEZ, 1983). A solução encontrada para a reposição destes membros perdidos está na utilização de próteses. O termo “prótese” tem origem do verbo grego “prostithénai” cujo significado é “colocar no lugar” (BLIQUEZ, 1983).

As primeiras próteses que possuem registro tiveram sua origem no Egito antigo. Devido suas configurações rudimentares, estas próteses eram utilizadas como complemento para o corpo ao invés de serem funcionais. Porém, recentemente cientistas relataram terem encontrado o primeiro dedo protético feito em madeira com aspecto funcional em uma múmia antiga no Egito (NORTON, 2007).

Ao decorrer dos tempos, o design das próteses foi se aprimorando em relação ao seu aspecto funcional. Em 1858, na cidade da Cápua, Itália, desenterrou-se uma perna artificial (Figura 2.3) datada de 300 a.C, feita em bronze e ferro com um núcleo de madeira, aparentemente com uso funcional em amputação de membro inferior (NORTON, 2007).

(Intencionalmente deixado em branco)



Figura 2.3 - Molde e a perna protética de Cápua, respectivamente. Fonte: (BLIQUEZ, 1983)

Em 1560, o cirurgião francês Ambroise Paré e o artesão francês Le Petit Lorrain projetaram uma perna protética funcional e revolucionária feita de metal, couro, papel e cola. Ilustrada pela Figura 2.4, a prótese para amputação de membro inferior faz uso de um mecanismo de acionamento por cordão garantindo certa mobilidade ao usuário (BENHAMOU, 1994).

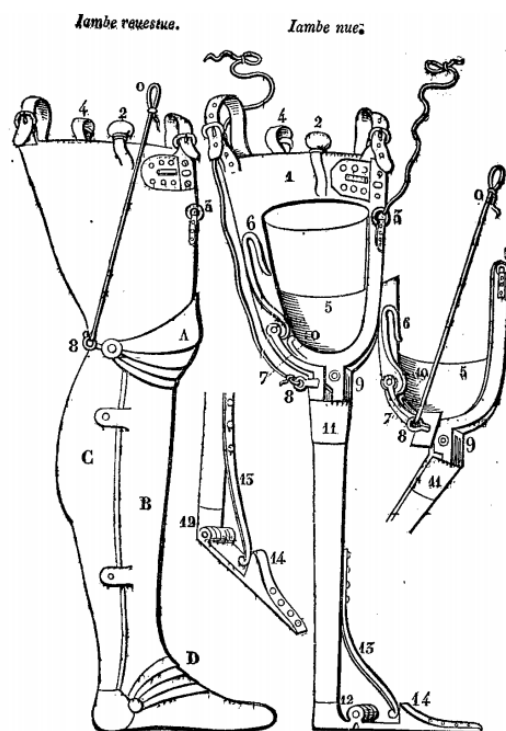


Figura 2.4 - Perna protética proposta por Ambroise Paré e Le Petit Lorrain. Fonte: (BENHAMOU, 1994)

Ao decorrer do século dezessete até meados do século dezenove, vários conceitos de próteses foram desenvolvidos como o caso de Pieter Verduyn que, em 1696, projetou a primeira prótese com juntas móveis tornando-se referência para futuras próteses com juntas que possibilitam graus de liberdade ao usuário. Já em 1800, um londrino chamado James Potts desenvolveu uma prótese para amputação de membro inferior fabricada em madeira que se tornou conhecida como “*Anglesey Leg*”. Em 1839, William Selpho levou a prótese de Potts para os Estados Unidos e desenvolveu a prótese que se chamaria “*Selpho Leg*”. O desenvolvimento de próteses continuou crescente no século dezenove até chegar em 1912 onde o aviador Marcel Desoutter, que perdeu sua perna na primeira guerra mundial, projetou e fabricou a primeira prótese de alumínio da história (NORTON, 2007).

De acordo com Nolan (2008), depois da invenção do pé protético SACH no final da década de 1950, o design e os tipos de materiais empregados na fabricação de próteses não mudaram muito. Porém, na década de 1980, um pé protético flexível foi fabricado utilizando dois laminados de fibra de carbono, material leve, resistente e de alta resistência mecânica que até então havia sido utilizado predominantemente na indústria aeronáutica.

O primeiro modelo de prótese transtibial fabricado completamente em material compósito foi desenvolvido por Van L. Phillips em 1983 (PHILLIPS, 1983). Esse modelo proposto por Phillips (Figura 2.5) engloba a junção de um pé protético com extensão até o coto.

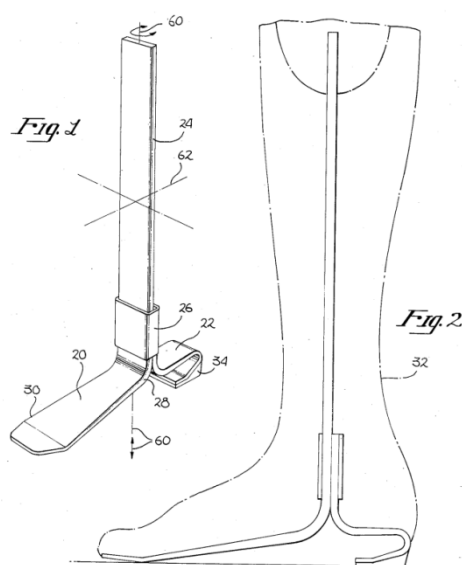


Figura 2.5 – Desenho da prótese de Van L. Phillips fabricada em material compósito.  
 Fonte: (PHILLIPS, 1983)

A partir de Ambroise Paré e Le Petit Lorrain teve início a introdução de novos materiais não convencionais, conceitualmente chamados de materiais compósitos de baixa resistência, para a fabricação de próteses. Porém, com a prótese de Van L. Phillips iniciou-se o uso de materiais compósitos de alta resistência para fabricação de próteses de alto desempenho e conforto para o usuário.

Com o avanço no desenvolvimento de novos materiais compósitos, principalmente com o uso de fibra de carbono e resinas termorrígidas, foi possível um grande avanço no projeto de novas próteses e aparelhos ortopédicos (SCHOLZ *et al.*, 2011). Nos jogos olímpicos de 1988, utilizou-se, pela primeira vez, um pé protético flexível em uma corrida esportiva. Em 1992, vários modelos de próteses de corrida fabricadas em material compósito foram desenvolvidos como é o caso das próteses Cheetah (Össur), flex-sprint (Össur), flex-run (Össur), sprinter (Otto Bock) e C-sprint (Otto Bock) ilustradas na Figura 2.6 (NOLAN, 2008).

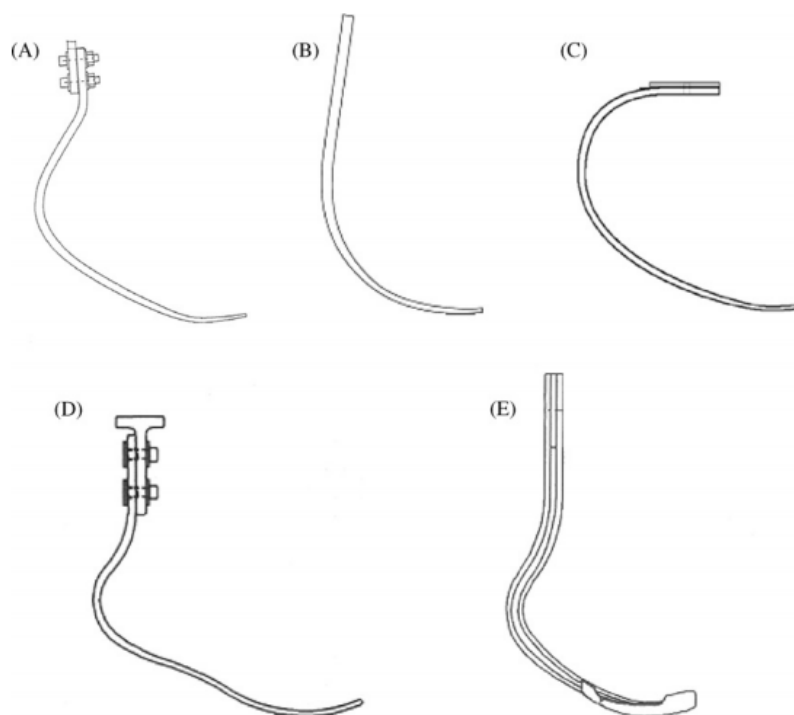


Figura 2.6 – Próteses de corrida: (A) Cheetah, (B) flex-sprint, (C) flex-run, (D) sprinter e (E) C-sprint. Fonte: (NOLAN, 2008)

Assim, o desenvolvimento das próteses transtibiais passou por constante evolução de design e seleção de materiais desde o século 20 até as mais sofisticadas próteses em materiais compósitos poliméricos nos dias atuais como as próteses de corridas.

## 2.3 Próteses transtibiais

De acordo com Vilagra (2011), a amputação transtibial ou amputação de membro inferior pode ser definida como aquela que é realizada entre a articulação do joelho e a desarticulação tibiotársica, podendo ser dividida em três níveis: terço proximal, médio e distal.

As próteses transtibiais podem ser divididas biomecanicamente em dois grupos: Próteses convencionais (exoesqueléticas) e modulares (endoesqueléticas). De acordo com Carvalho (1999) e Bocolini (2000) as próteses convencionais possuem uma estrutura rígida, sendo fabricadas em plástico e/ou madeira e as próteses modulares possuem vários componentes ajustáveis e intercambiáveis entre si, sendo fabricados em aço, alumínio, titânio e fibra de carbono. As próteses modulares são consideradas superiores as convencionais devido a sua funcionalidade, pois permitem um melhor alinhamento por possuírem componentes ajustáveis (VILAGRA et al., 2011).

As próteses para amputações de membros inferiores objetivam dar aos usuários condições para que tenham uma vida normal, ou seja, possam voltar a caminhar e realizar tarefas do cotidiano (SHASMIN *et al.*, 2008). Geralmente, as próteses modulares são constituídas de alguns componentes estruturais e intercambiáveis, ilustrados pela Figura 2.7, tais como o pé protético, o tubo protético e o suporte para o tubo protético.



Figura 2.7 - Prótese modular para amputações de membros inferiores: a) Tubo protético, b) Suporte, c) Pé protético. Fonte: Autor

Alguns estudos (GIEST; CHANG, 2016; SILVERMAN; NEPTUNE, 2012; WINTER; SIENKO, 1988) investigaram os efeitos biomecânicos das próteses transtibiais e sua relação com a locomoção (caminhada) de pessoas com amputações de membros inferiores. Estes estudos demonstraram a eficiência das próteses transtibiais em prover o suporte corpóreo necessário para os usuários além de restaurar as funções locomotoras perdidas e antropometrias alteradas.

De acordo com Major et. al (2011) um grande número de estudos investigaram os efeitos do projeto de próteses transtibiais relacionados a consequências biomecânicas e fisiológicas sobre o desempenho do amputado, mas sem levar em consideração suas propriedades mecânicas. As propriedades mecânicas, design e funcionalidade das próteses transtibiais têm efeito direto sobre o conforto do amputado (FEY; KLUTE; NEPTUNE, 2011; ZHANG *et al.*, 1998).

## 2.4 Tubo protético

O tubo protético, do inglês Pylon (CARROLL; SABOLICH, 1999), geralmente é uma estrutura sem juntas soldadas ou partes móveis. Os tubos protéticos geralmente estão presentes em próteses transtibiais modulares (endoesqueléticas), sendo que nas convencionais (exoesqueléticas) estão incorporados a um único componente formado pela junção do pé, tubo e joelho. Em amputações de membros inferiores, quando conectado a um conjunto soquete/pé, substitui o papel dos ossos tíbia e fíbula como estrutura de suporte e transferência de carga durante a caminhada ou corrida (JUNQUEIRA *et al.*, 2017).

Geralmente, os tubos para próteses transtibiais são fabricados utilizando materiais metálicos como aços inox, alumínio e titânio (SHASMIN *et al.*, 2007). Alternativamente, alguns autores (LEE; ZHANG, 2006; ROTHSCHILD *et al.*, 1990; VALENTI, 1990) estudaram o uso de materiais termoplásticos na fabricação dos tubos protéticos.

O tubo protético proposto por Lee e Zhang (2006), foi fabricado em homopolímero de polipropileno (PP) em um processo de termoformagem a vácuo. Os resultados obtidos através de ensaios de fadiga mostraram que o tubo protético proposto por Lee e Zhang (2006) suportou 500.000 ciclos de carregamento sem falhar, ou seja, o

tubo teria vida útil correspondente a um ano para um amputado transtibial andando cerca de 1.300 passos por dia.

Com o intuito de diminuir o custo de fabricação de próteses transtibiais, Shasmin *et al* (2008) estudou a aplicação de Bambu na fabricação de tubo para prótese de membro inferior como alternativa ao uso de materiais “convencionais”. Por meio de ensaios de compressão, o tubo protético feito de bambu apresentou valores de 88 MPa para tensão de compressão e módulo de elasticidade de 44 GPa. De posse destes valores, Shasmin *et al* (2008) comparou as tensões de compressão de um alumínio no estado recozido (48 MPa) e o módulo de um plástico reforçado com fibras (12 GPa) constatando que o bambu é duas vezes mais resistente que o alumínio e três vezes mais que o plástico reforçado com fibras (FRP). Além disso, concluiu que o Bambu é um excelente material com potencial para ser utilizado em tubos de próteses transtibiais devido ao seu baixo custo de manufatura e boa rigidez estrutural.

Atualmente, os tubos fabricados em materiais compósitos estruturais tiveram um grande crescimento devido ao fato de possuírem elevada rigidez mecânica associada ao baixo peso além de longa vida em fadiga (ANCELOTTI JUNIOR, 2006). Assim, tubos para próteses de membros inferiores fabricados em materiais compósitos passaram a ser objeto de estudo por vários autores (LEBRÃO, 2007; MARTINS, 2015; WILSON, 2015), principalmente os tubos fabricados em matrizes poliméricas reforçadas com fibras (CFRP) que trouxeram ganhos significativos em termos de desempenho mecânico e eficiência estrutural.

Em seu trabalho, Lebrão (2007) desenvolveu um tubo em material compósito de matriz polimérica (epóxi) reforçado com fibra de carbono e vidro. Seu objetivo foi utilizar este tubo em próteses de membros inferiores como um substituto aos tubos tradicionalmente fabricados em materiais metálicos. Além disso, propôs que o tubo possuísse boas condições de resistência mecânica, aliado a leveza e, principalmente, baixo custo de fabricação. Em referência a obtenção do baixo custo de fabricação, Lebrão comparou dois processos de fabricação em materiais compósitos sendo eles o enrolamento filamentar e o moldagem por infusão de resina assistida à vácuo (VARTM). De posse dos tubos fabricados pelos dois processos, realizou ensaios de compressão e comparou os resultados obtidos com os de um tubo protético comercial feito de alumínio. Os resultados mostraram que tanto o tubo protético fabricado em VARTM quanto por enrolamento filamentar obtiveram melhores resultados mecânicos em comparação com o tubo de alumínio. Em relação ao custo, concluiu que os

protótipos produzidos por enrolamento filamentar são mais dispendiosos que os produzidos por VARTM.

Com o intuito de se obter um tubo protético mais barato e com boas propriedades mecânicas, Martins (2015) fabricou e testou tubos compósitos para próteses transtibiais pelo processo de moldagem por *bladder* (BIM) utilizando material pré-impregnado unidirecional em fibras de carbono / epóxi. Fazendo uso de simulação numérica pelo método dos elementos finitos, aperfeiçoou a seqüência de empilhamento do material pré-impregnado e fabricou os tubos pelo processo BIM. Em relação às propriedades mecânicas obtidas a partir de ensaios de certificação referenciados pela norma NBR ISO 10328, constatou que os tubos atingiram todos os requisitos técnicos da norma, sendo viável sua fabricação e comercialização. Em relação ao custo do processo de fabricação dos tubos protéticos fabricados por BIM, comparado com outros processos como o VARTM e o enrolamento filamentar, concluiu que se torna mais caro em relação ao VARTM e de mesmo valor comparado com os produzidos por enrolamento filamentar.

Autores de vários artigos (FEY *et al.*, 2011; HANSEN *et al.*, 2000; SAM *et al.*, 2004; SINITSKI *et al.*, 2012) investigaram os efeitos do design, rigidez e armazenamento de energia no conjunto pé-tornozelo protético e sua influência em amputados abaixo do joelho. Alguns estudos (KOBAYASHI *et al.*, 2013, 2014; SCHWARZE *et al.*, 2013) analisaram os efeitos do alinhamento no soquete/suporte do tubo protético e suas forças de reação em próteses transtibiais. No entanto, uma pequena quantidade de artigos investigou os efeitos do material do tubo protético (LEE; ZHANG, 2006; ROTHSCHILD *et al.*, 1990; SHASMIN *et al.*, 2008; SHASMIN *et al.*, 2007; VALENTI, 1990), flexibilidade (COLEMAN *et al.*, 2001) e propriedades mecânicas de absorção de impacto (BERGE *et al.*, 2004) em próteses transtibiais. E uma quantidade ainda menor de estudos (LEBRÃO, 2007; MARTINS, 2015; SHASMIN *et al.*, 2008; WILSON, 2015) consideraram aspectos de projeto, tensões envolvidas, rigidez e leveza. Assim, o trabalho desenvolvido nesta dissertação engloba parâmetros pouco explorados na literatura como o design, tensões envolvidas, rigidez e leveza.

## 2.5 Estruturas de travessas rígidas

Atualmente, tornou-se mais comum a busca por materiais e estruturas de alto desempenho, ou seja, estruturas que conciliam baixo peso e alta resistência mecânica. Setores industriais de tecnologia avançada em engenharia como, por exemplo, o setor aeroespacial, apresenta uma crescente demanda por peças e componentes muito leves e fortes, capazes de resistir a carregamentos muito elevados. As principais razões desta procura estão relacionadas à diminuição do consumo de combustíveis (com conseqüente redução na emissão de poluentes) e melhor desempenho estrutural e mecânico das aeronaves, gerando maior segurança e conforto aos usuários, além de maior economia para as empresas (ZHENG *et al.*, 2015). Outro setor com elevado crescimento na busca por materiais compósitos e estruturas mais leves e resistentes é o de biomecânica. Já discutido no Capítulo 2 item 2.1, essa busca deve-se a biocompatibilidade de alguns materiais e elevada resistência mecânica associado ao baixo peso. Uma solução ideal para esta demanda consiste na utilização de materiais compósitos para a fabricação de estruturas de travessas rígidas.

Estruturas de travessas rígidas, do Inglês *Isogrid* ou *Anisogrid* (TOTARO, 2012), possuem a forma cilíndrica ou cônica. Tradicionalmente na literatura existem dois tipos de configurações de estruturas de travessas rígidas sendo elas a aberta e a fechada. A estrutura fechada é constituída externamente por algumas camadas de fibra de carbono/epóxi ou outro tipo de material compósito. Internamente a estrutura consiste de travessas rígidas circulares e helicoidais feitas do mesmo material da camada externa ou outro tipo de material compósito. As travessas circulares e helicoidais se cruzam em pontos chamados de nós (FAN *et al.*, 2009). Entre os nós podem se formar estruturas triangulares ou hexagonais cujo objetivo é proporcionar estabilidade estrutural (TOTARO, 2012; TOTARO *et al.*, 2013). A Figura 2.8 ilustra a composição de uma estrutura fechada de travessas rígidas fabricada de fibra de carbono e resina epóxi.



Figura 2.8 – Estrutura de travessas rígidas. Fonte: Adaptado de (SORRENTINO *et al.*, 2016)

A estrutura de travessas rígidas aberta consiste somente de travessas circulares e helicoidais sem o uso da camada externa. Objeto de estudo deste trabalho, uma configuração diferente de estrutura de travessas rígidas foi proposta. Esta estrutura, que será discutida detalhadamente no Capítulo 3, consiste de uma camada interna de polímero com função de estabilização e reforço estrutural.

Segundo Huybrechts *et al.* (1999), o termo “*isogrid*” é comumente usado para se referir a qualquer estrutura de treliças cujos reforços formam triângulos equiláteros. O comportamento acerca da rigidez de uma *isogrid* é isotrópica dentro do plano da estrutura, assim, o termo ‘iso’ é dado em referência a sua isotropia. Para alguns pesquisadores, *isogrid* representa todas as estruturas de treliças, mesmo aquelas que não são isotrópicas em qualquer sentido (HUYBRECHTS *et al.*, 2002).

Um dos primeiros estudos sobre estruturas de travessas rígidas foi realizado pela NASA (sigla em inglês de *National Aeronautics and Space Administration* – Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço) em parceria com a McDonnell Douglas Aeronautics Company (empresa que foi comprada pela Boeing em 1996) o que gerou o primeiro *Handbook* sobre estruturas *isogrids*. O estudo tinha como objetivo a pesquisa de novas estruturas leves, econômicas e estruturalmente eficientes para aplicação aeroespacial (MEYER *et al.*, 1973). Não se pode afirmar que o *Isogrid Handbook* desenvolvido pela NASA foi o primeiro estudo nesta área, pois alguns autores russos como Vasiliev *et al.* (2001) afirmam que o Programa Soviético Espacial (em russo *Космическая программа СССР*, *Kosmicheskaya programma SSSR*) foi o primeiro a desenvolver e aplicar estruturas de travessas rígidas em foguetes e veículos espaciais como o Russo Proton-M (Figura 2.9).

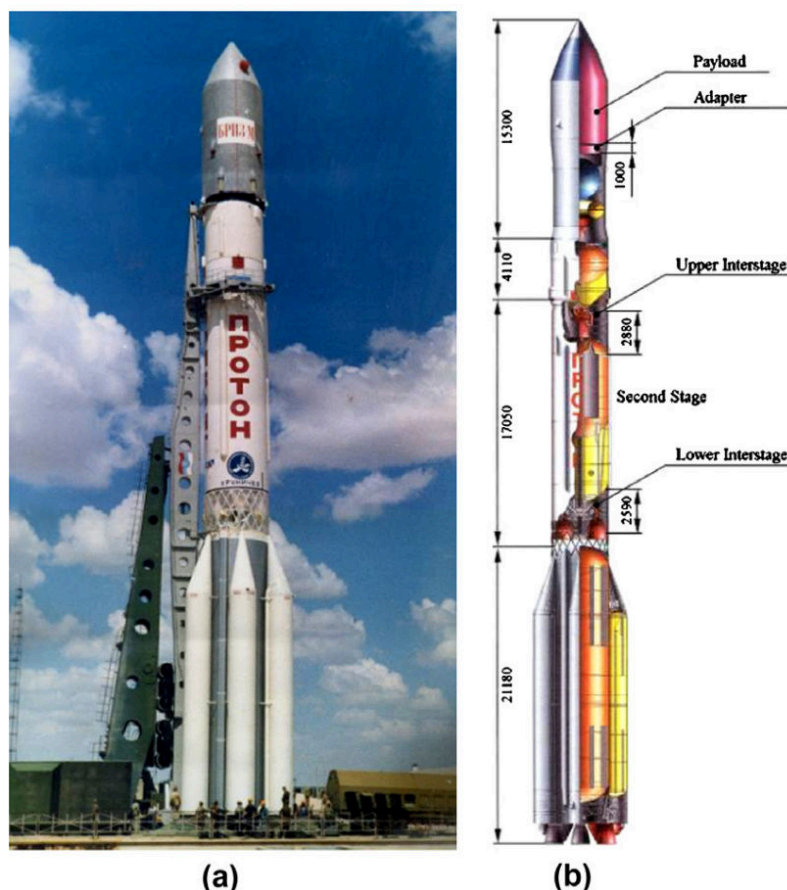


Figura 2.9 – (a) Proton M e (b) sua estrutura de travessas rígidas. Fonte: (VASILIEV *et al.*, 2001)

Em seu trabalho, Vasiliev e Razin (2006) utilizaram filamento unidirecional de fibra de carbono e matriz polimérica para fabricar estruturas de travessas rígidas e aplicá-las em fuselagens de aeronaves, interestágios de foguetes e adaptadores de cargas. Para a realização do projeto estrutural, utilizaram simulação numérica pelo método dos elementos finitos e cálculo analítico (Equações de 1 a 4). Após o projeto das estruturas, realizaram a fabricação (Figura 2.10) para, em seguida, procederem com os ensaios experimentais para comprovação do projeto. Com os resultados, obtiveram 60% de redução de massa da estrutura da fuselagem e 40% de redução para os interestágios e adaptadores de carga comparando com os fabricados em alumínio.

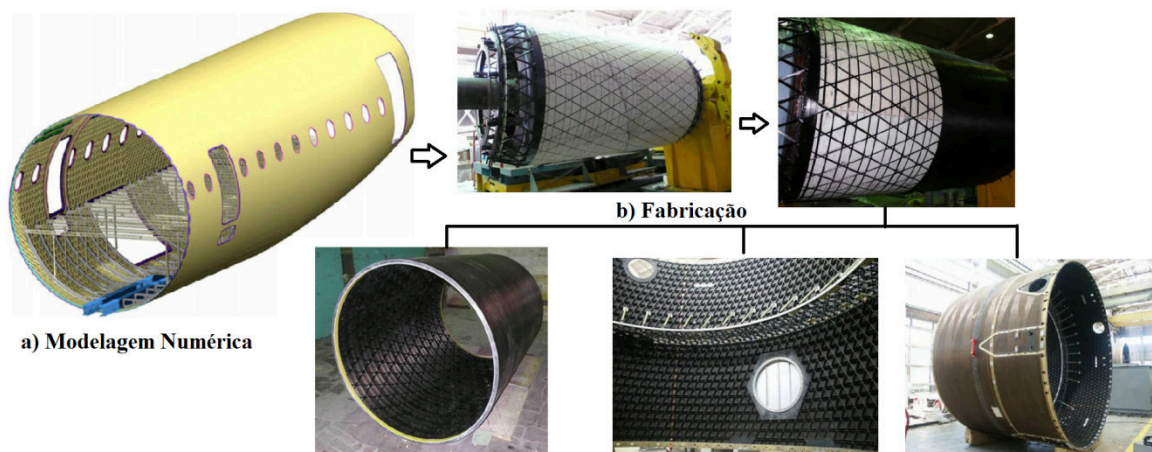


Figura 2.10 - a) Modelagem numérica da fuselagem e b) fabricação da fuselagem.  
 Fonte: Adaptado de (VASILIEV; RAZIN, 2006)

Na fase inicial de projeto de estruturas de travessas rígidas abertas (sem a camada externa de revestimento), a base matemática para a caracterização, validação e otimização da estrutura é dada em função de oito variáveis, sendo elas:

- O diâmetro  $D$  e o comprimento  $L$  da estrutura
- A espessura  $h$  das travessas helicoidais e circulares
- O ângulo  $\varphi$  das travessas helicoidais em relação ao eixo axial da estrutura
- A largura  $\delta_c$  e  $\delta_h$  das travessas circulares e helicoidais, respectivamente.
- A distância  $\alpha_c$  e  $\alpha_h$  das travessas circulares e helicoidais, respectivamente, em relação ao eixo axial da estrutura.

A Figura 2.11 ilustra a localização das oito variáveis de projeto propostas por Vasiliev e Razin (2006).

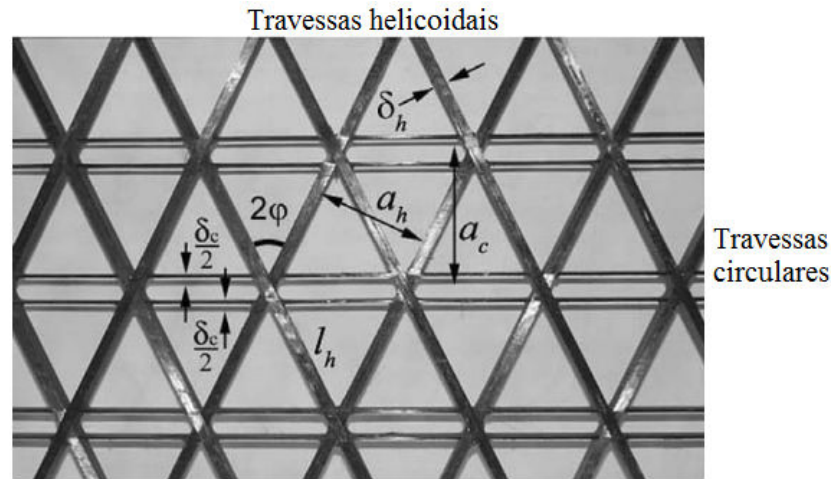


Figura 2.11- Parâmetros geométricos de estrutura de travessas rígidas. Fonte: Adaptado de (VASILIEV; RAZIN, 2006)

Por apresentarem um carregamento predominantemente axial, as estruturas de travessas rígidas são projetadas seguindo Equação 1.

$$P = F + \frac{4M}{D} \quad (1)$$

onde  $F$  é a força de compressão de projeto e  $M$  o momento na estrutura.

Existem três métodos básicos para otimizar estruturas de travessas rígidas, sendo eles:

- Programação geométrica (BUNAKOV; VASILIEV, 1999)
- Minimização dos fatores de segurança (TOTARO *et al.*, 2004)
- Otimização numérica (VASILIEV; RAZIN, 2001)

Considerando o segundo método, os parâmetros ótimos para minimização de massa são calculados pela Equação 2.

$$\bar{h} = \frac{h}{D}, \quad \varphi, \quad \bar{\delta}_c = \frac{\delta_c}{\alpha_c}, \quad \bar{\delta}_h = \frac{\delta_h}{\alpha_h} \quad (2)$$

Além disso, existem três casos que dependem de fatores de normalização de carga. As equações para os três casos estão dispostas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Casos de otimização estrutural. Fonte: Adaptado de (VASILIEV; RAZIN, 2006)

Caso 1	Caso 2	Caso 3
$p \leq p_s$	$p_s \leq p \leq p_o$	$p_o \leq p$
$\bar{h} = \frac{1}{4} \left( \frac{48\pi^4 k^2 \bar{\rho}^3}{E_h E_c^3} p^4 \right)^{1/10}$	$\bar{h} = \frac{1}{4} \left( \frac{\pi^2 k \bar{\rho}}{E_c \bar{\sigma}} p^2 \right)^{1/4}$	$\bar{h} = \frac{\pi p}{16\bar{\sigma}} \sqrt{\frac{k E_h p_s}{3\bar{\sigma} p_o}}$
$\text{tg } \varphi = \frac{1}{2}$	$\text{tg}^2 \varphi = \frac{p_s}{4p}$	$\text{tg}^2 \varphi = \frac{p_s}{4p_o}$
$\bar{\delta}_h = \frac{5}{4\pi} \left( \frac{108\pi^2 E_c p^2}{E_h^3 k^4 \bar{\rho}} \right)^{1/10}$	$\bar{\delta}_h = \frac{2}{\pi \sin 2\varphi} \sqrt{\frac{3\bar{\sigma}}{k E_h}}$	$\bar{\delta}_h = \frac{2}{\pi \sin 2\varphi} \sqrt{\frac{3\bar{\sigma}}{k E_h}}$
$\bar{\delta}_c = \frac{\bar{\delta}_h}{2\bar{\rho}}$	$\bar{\delta}_c = \frac{p_s \bar{\delta}_h}{2\bar{\rho} p}$	$\bar{\delta}_c = \frac{p_s p_o \bar{\delta}_h}{\bar{\rho} p^2} \left( \frac{p_o^2}{p^2} - \frac{1}{2} \right)$
$p = \frac{4P}{\pi D^2}, \quad p_s = \frac{48\bar{\sigma}^2}{\pi E_h} \sqrt{\frac{\bar{\sigma} \bar{\rho}}{k E_c}}$		
$p_o = p_s \sqrt{\frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{2E_h \bar{\rho}}{E_c}} + \sqrt{\frac{2E_h \bar{\rho}}{E_c} - 1} \right)}$		

onde  $\bar{\sigma}$  é a tensão de ruptura das travessas helicoidais,  $k$  é o coeficiente de flambagem ( $k=1$  para estruturas com juntas articuladas e  $k=4$  para estruturas com juntas fixas),  $E$  o módulo de elasticidade na direção principal de carregamento,  $\rho$  é a densidade do material utilizado,  $\bar{\rho} = \rho_c / \rho_h$ , índices h e c referem-se a helicoidais e circulares respectivamente.

Segundo Vasiliev e Razin (2006), as equações do Caso 1 na Tabela 2.1 são os parâmetros otimizados para estruturas de travessas rígidas sob solicitação de carregamentos predominantemente axiais. De acordo com essa conclusão, o ângulo ótimo  $\varphi$  das travessas helicoidais é de  $26^\circ$ . Além disso, através da Equação 3 pode-se calcular a massa otimizada da estrutura.

$$M = \pi DLh\rho_h (2\bar{\delta}_h + \bar{\rho}\bar{\delta}_c) \quad (3)$$

Os valores para  $P$  devem respeitar a Equação de critério de falha de carregamento descrito pela Equação 4.

$$P \leq P_{cr} = 2\pi h \cos^2 \varphi \sqrt{E_h E_c \frac{2\delta_h \delta_c}{3\alpha_h \alpha_c}} \quad (4)$$

Em relação ao ângulo  $\varphi$  das travessas helicoidais, Sorrentino *et al.* (2016) desenvolveu modelos matemáticos com 18 equações para justificar que o ângulo de 30° é o ângulo otimizado ao invés de 26° proposto por Vasiliev e Razin (2006). Primeiramente, em seu trabalho, Sorrentino *et al.* (2016) realizou os cálculos analíticos por meio de seu equacionamento para, em seguida, comparar o resultado com os gerados por simulação numérica. Para a fabricação das travessas rígidas helicoidais e circulares, filamentos de fibra de carbono impregnados com resina epóxi foram enrolados manualmente em um molde de silicone. Após o enrolamento, quatro camadas de tecido prepreg de fibra de carbono foram posicionadas em volta do molde e em contato com as travessas rígidas. Em seguida, a pré compactação das camadas foi realizada pelo processo de *vaccum bag* onde se insere um filme plástico para a aplicação do vácuo. A cura da estrutura foi realizada em autoclave. A estrutura final foi testada e os resultados mostraram uma correlação de 4,6% em relação aos dados simulados pelo método dos elementos finitos. O processo de fabricação e o teste experimental estão ilustrados pela na Figura 2.12.

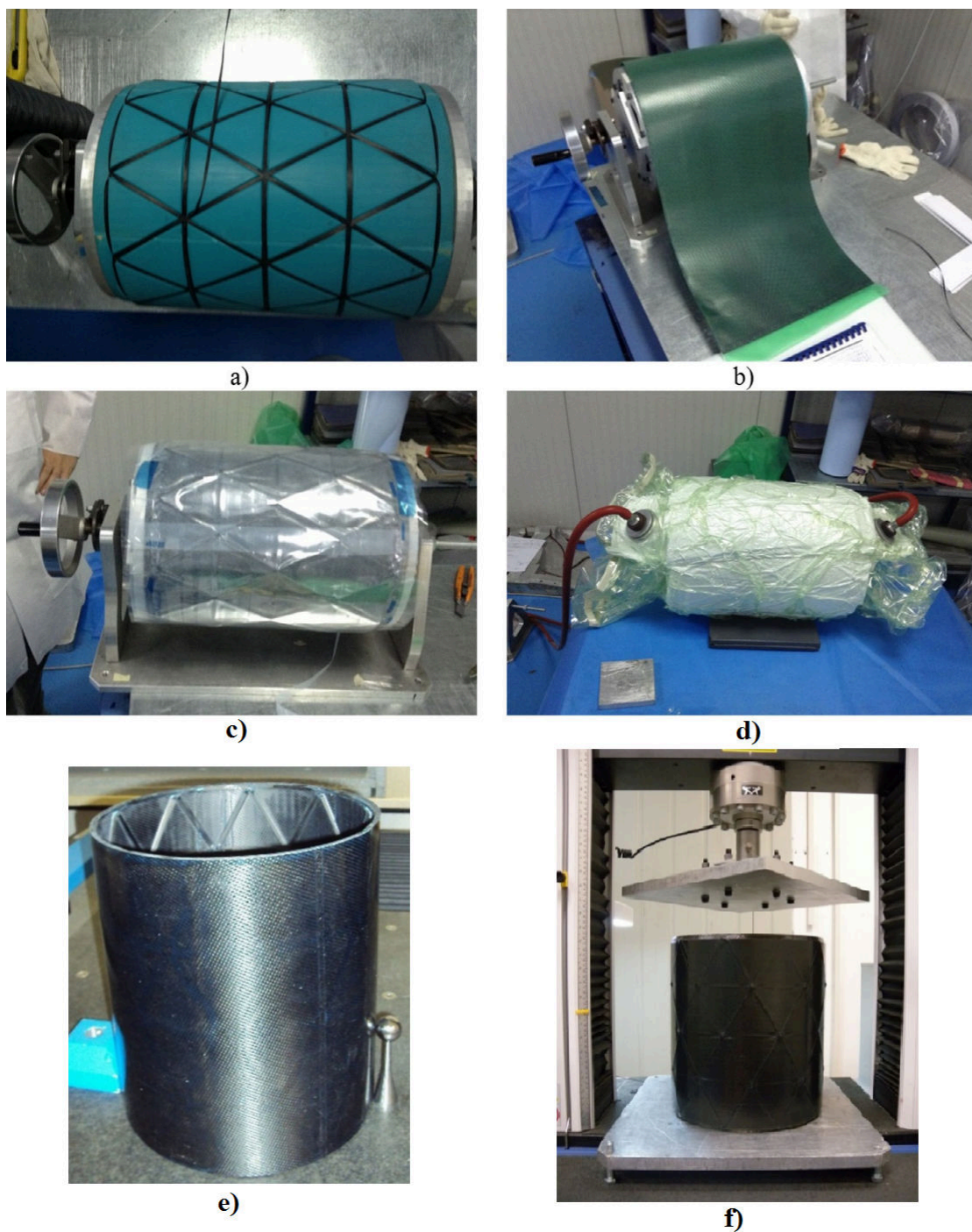


Figura 2.12 - a) Enrolamento da fibra de carbono impregnada, b) posicionamento das camadas de *prepreg*, c) aplicação do filme plástico, d) aplicação do vácuo, e) estrutura finalizada e f) teste experimental da estrutura. Fonte: Adaptado de (SORRENTINO *et al.*, 2016)

Conforme Totaro (2013) ressaltou em seu trabalho, durante as últimas décadas, um progresso notável em relação à pesquisa e fabricação desses tipos de estruturas ocorreu em diversos países desenvolvidos como Estados Unidos, Rússia e Itália. Desde

então, estruturas *isogrid* fabricadas com materiais compósitos, têm sido de grande interesse como um substituto para outros tipos estruturas como as *sandwich* formadas por núcleos *honeycomb* e, até mesmo, *isogrid* de alumínio (DAWOOD *et al.*, 2015)

Empresas e agências de pesquisa com atividade no setor aeroespacial, como NASA, Boeing Company, Alliant Techsystems (ATK), Programa Espacial Russo (Russian State Space Program), Força Aérea dos EUA (US LAB Air Force), CIRA (Italian Aerospace Research Center), dentre outros, têm contribuído para um aumento significativo da qualidade de pesquisas em relação à estruturas de travessas rígidas, levando ao enriquecimento científico de processos e métodos de produção para sistemas aplicados em engenharia (SORRENTINO *et al.*, 2016). Em virtude deste avanço tecnológico, estruturas de travessas rígidas são utilizadas na constituição de vários jatos executivos, satélites de pesquisa/observação, estações espaciais como a Skylab Orbital Workshop, cargueiros espaciais da família “Delta”, foguetes espaciais e veículos de lançamento como o Russo Proton-M (VASILIEV *et al.*, 2012)

Enfoque deste trabalho, não foi encontrado nenhum estudo na literatura que tenha feito uso de estruturas de travessas rígidas como solução de problemas estruturais na área da medicina moderna e biomecânica, especificamente relacionado a próteses para amputações de membros inferiores.

## 2.6 Requisitos de projeto

Os requisitos de projeto envolvendo dimensionamento, carregamentos que o tubo protético deve suportar e posicionamentos para ensaios experimentais foram norteados pela norma NBR ISO 10328:2002 intitulada “Próteses – Ensaio estrutural para próteses de membro inferior”.

Os ensaios descritos na norma abrangem próteses transtibiais (amputações abaixo do joelho), próteses para desarticulações do joelho e próteses transfemorais (amputações acima do joelho). De acordo com a norma, os ensaios podem ser feitos em uma estrutura completa, estruturas parciais ou componentes individuais. Uma estrutura completa para uma prótese transtibial foi discutida no item 2.3 e ilustrada pela Figura 2.7.

Para simular os carregamentos durante a utilização das próteses de membros inferiores, a norma se divide em dois tipos de ensaios sendo eles o estático e o cíclico (Fadiga). O ensaio estático baseia-se no pior carregamento possível durante uma atividade. Já o ensaio cíclico baseia-se nas atividades da marcha normal, onde ocorrem cargas regulares a cada passo.

O ensaio estático divide-se pelo nível de carregamento que a prótese foi projetada em ordem crescente A60, A80 e A100 e pelo tipo de ensaio, compressão e torção. No ensaio de compressão, existem dois tipos de ensaios, o de comprovação e o de falha. O ensaio de comprovação tem como objetivo validar a prótese do ponto de vista utilização pelo usuário e possui relação com seu peso. O ensaio de falha é realizado para determinar o desempenho das estruturas que recebem a descarga, simulando condições extremas que podem ocorrer ocasionalmente durante o uso do componente. Os corpos de provas que foram utilizados no ensaio de comprovação e que não apresentaram defeitos podem ser utilizados no ensaio de falha. Para o ensaio de torção, somente a condição de falha é aplicada de acordo com o projeto e o nível de carga descrito anteriormente.

## **2.7 Simulação numérica pelo método dos elementos finitos**

A simulação numérica pelo método dos elementos finitos é atualmente a forma de modelagem e cálculo estrutural mais utilizada para obtenção de soluções aproximadas de problemas de engenharia (SILVEIRA; FANCELLO, 2015). O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica utilizada para determinar a solução aproximada para cálculos estruturais, por equações diferenciais parciais (EDP) em um domínio definido. Para resolver a EDP, o principal desafio é criar uma base de função que pode aproximar-se da solução. Há muitas maneiras de construir a base de aproximação e como isso é feito é determinado pela formulação selecionada.

O Método dos Elementos Finitos tem um desempenho muito bom para resolver equações diferenciais parciais sobre domínios complexos que podem variar com o tempo. Este método surgiu em meados dos anos 50 como uma ferramenta analítica e teve seu desenvolvimento vertiginoso na década 60 com a demanda do setor espacial (SILVEIRA; FANCELLO, 2015). A sua aplicação é bastante ampla, podendo ser

aplicado tanto na parte de cálculo estrutural (análises estáticas e dinâmicas) como também na área de fluidos e na área térmica.

Na área da biomecânica e medicina moderna, diversos trabalhos utilizaram a simulação numérica pelo método dos elementos finitos para obtenção de valores aproximados de tensão e deslocamento em próteses transtibiais bem como análise dos seus mecanismos de falha e validação dos projetos (CAGLE *et al.*, 2017; JIA *et al.*, 2005; KE *et al.*, 2017; LENKA; CHOUDHURY, 2011). Entretanto, alguns trabalhos na literatura utilizaram elementos finitos para avaliar o comportamento de tubos para próteses de membros inferiores.

Em seu trabalho, Lee *et al.* (2004) utilizou simulação numérica pelo método dos elementos finitos para avaliar as tensões e os deslocamentos presentes em um tubo protético feito de polipropileno. Como condição de contorno utilizou três tipos de carregamentos simulando a marcha de um usuário. Para a validação do modelo, comparou os resultados numéricos com os experimentais obtidos de ensaio em um paciente de 55 anos de idade e massa de 81 Kg. Através das análises dos resultados, conclui que o método dos elementos finitos é uma excelente ferramenta para fase de projeto estrutural de próteses, pois existe uma boa correlação entre os dados experimentais e numéricos. Além disso, exalta que o uso de simulação numérica traz grande economia na fase inicial, pois é possível realizar vários projetos estruturais até se chegar ao projeto final sem a necessidade de fabricação de vários protótipos.

Em outro trabalho sobre tubos protéticos, Martins (2015) fez uso de simulação numérica para a fase inicial de projeto de um tubo protético em material compósito. Além disso, realizou uma otimização estrutural para encontrar uma sequência de empilhamento de camadas que suportasse as condições de carregamentos descritos pela norma NBR ISO 10328:2002. Para analisar a falha do seu tubo protético, utilizou o critério de Tsai-Wu para materiais compósitos. Diante dos resultados experimentais pode-se constatar que os dados simulados possuíam boa correlação e efetivamente suportavam as cargas impostas pela norma.

Enfoque deste trabalho, o uso de simulação numérica pelo método dos elementos finitos encontra respaldo na literatura como uma boa ferramenta para a fase inicial de projeto e validação numérica de estruturas voltadas para a área de biomecânica.

### **3. MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

Neste capítulo será descrito todas as etapas do desenvolvimento do trabalho desde o início do projeto dos tubos de travessas rígidas, passando pelo processo de manufatura até chegar aos ensaios experimentais. A Figura 3.1 ilustra o fluxograma com as etapas do desenvolvimento deste trabalho. Todas as etapas do fluxograma foram realizadas no Núcleo de Tecnologia em Compósitos (NTC) da UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá, campus Itajubá.

(Intencionalmente deixado em branco)

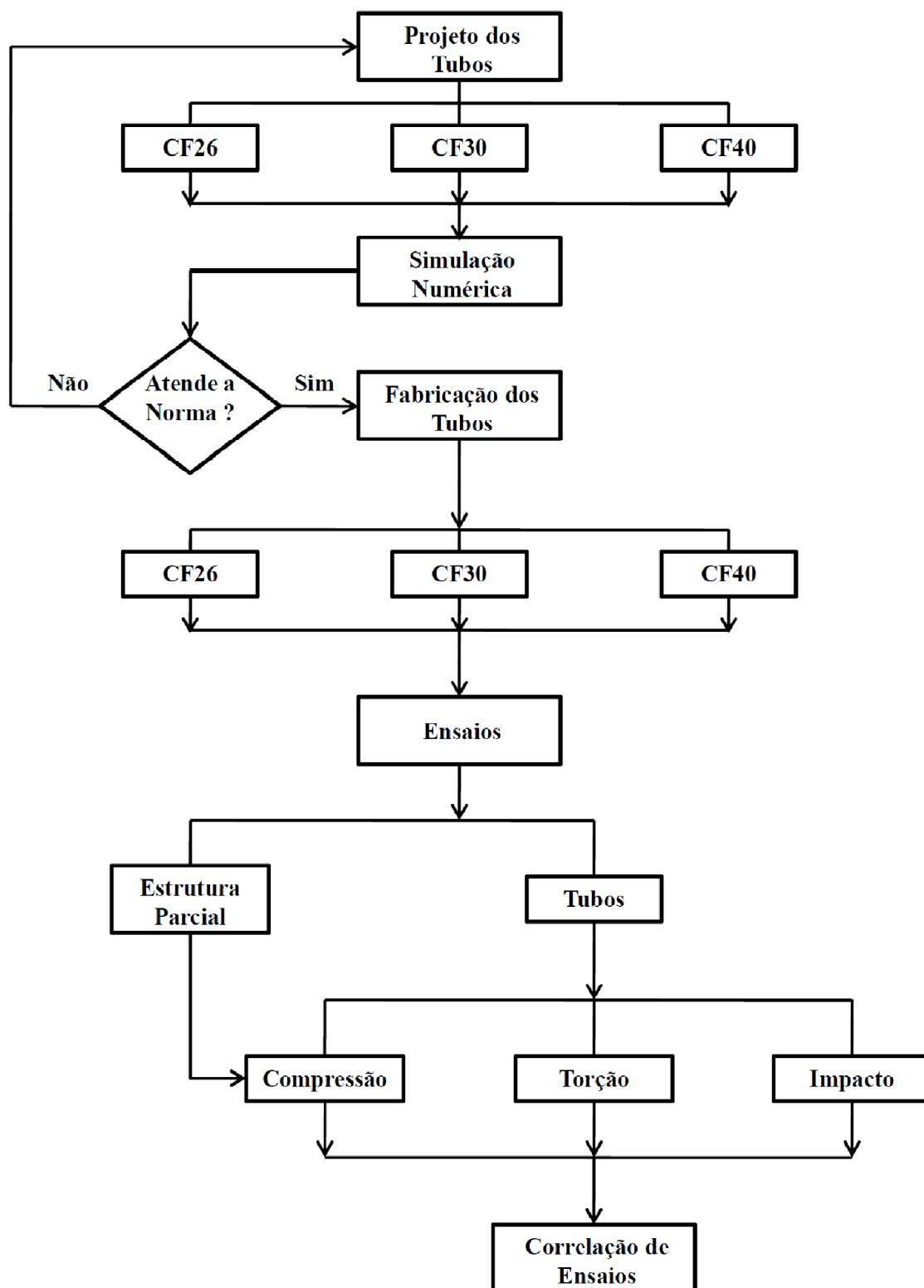


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas do desenvolvimento do trabalho. Fonte: Autor

### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho podem ser divididos em duas partes: material para a fabricação dos dispositivos de ensaio e materiais para o processo de fabricação dos tubos protéticos de travessas rígidas e camada interna estrutural.

O material para a fabricação do dispositivo de ensaio para o tubo de travessas rígidas foi o Aço Carbono SAE 1020. As propriedades mecânicas estão mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Dados do Aço Carbono SAE 1020. Fonte: Adaptado de (JUNQUEIRA *et al.*, 2018)

Propriedades	Unidades	Valores
Massa específica a 25°C	g/cm <sup>3</sup>	7,85
Módulo de Elasticidade	GPa	186
Coefficiente de Poisson	-	0,29

Seguindo a seqüência de fabricação deste trabalho, o material utilizado para a fabricação da camada interna estrutural dos tubos protéticos de travessas rígidas foi o polímero ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno). O ABS deste trabalho foi da marca *ultimaker*<sup>®</sup> e encontra-se comercialmente em forma de filamento para impressora 3D. O filamento possui diâmetro de 2,85mm e pode suportar temperaturas de até 85°C.

Como o processo de fabricação utilizando a impressora 3D acontece com a fusão do polímero e o seu resfriamento rápido em decorrência da deposição do material na bandeja, as suas propriedades mecânicas sofrem uma perda em relação ao polímero virgem (CANTRELL *et al.*, 2017). Assim, as propriedades do ABS resultando do processo de impressão 3D estão dispostas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do ABS pelo processo de impressão 3D. Fonte: (CANTRELL *et al.*, 2017)

Propriedade	Unidade	Valores Experimentais
Módulo de Elasticidade	MPa	2050 ± 110
Resistência a Tração	MPa	39,0 ± 1.3
Coefficiente de Poisson		0,36 ± 0,03
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	0,8 - 3,5

Para fabricação das travessas rígidas em material compósito, foi utilizado um filamento contínuo unidirecional de fibra de carbono da empresa Hexcel Composites. A Tabela 3.3 mostra as características técnicas e propriedades físicas da fibra de carbono utilizada.

Tabela 3.3 - Dados físicos e técnicos da fibra de carbono fornecidos pelo fabricante

<b>Propriedades</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	1,79
Tipo de Filamento		AS4
Nº de Filamentos/Cabo	-	6000
Área da Seção Transversal	mm <sup>2</sup>	0,24
Constituição de Carbono	%	94
Diâmetro do Filamento/Cabo	μ (Microns)	7,1
Densidade Linear	g/m	0,427
Módulo de Elasticidade	GPa	231
Resistência à Tração	MPa	4,1
Alongamento até a Falha	%	1,7

O sistema de resina utilizado para a fabricação dos tubos protéticos foi resina epóxi Araldite® LY5052 (Parte A) e endurecedor Aradur® 5052 (Parte B) da empresa Huntsman na proporção de 100g/38g, respectivamente. A Tabela 3.4 mostra as características técnicas e as propriedades físicas do sistema de resina.

Tabela 3.4 - Dados físicos e técnicos do sistema de resina fornecidos pelo fabricante

<b>Propriedades</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
Massa específica a 25°C	g/cm <sup>3</sup>	1,1-1,2
Viscosidade a 25°C	mPas	600-700
Tempo de Uso da Mistura em 100g a 25°C	min	220-260
Temperatura de Transição Vítrea (Tg) <sup>1</sup>	°C	124-136
Módulo de Elasticidade <sup>2</sup>	GPa	3,4-3,6
Resistência à Tração <sup>2</sup>	MPa	82-86

<sup>1</sup> Cura 1 dia a 25°C + 4h a 100°C (Análise por TMA)

<sup>2</sup> Cura 15h a 50°C

Para realizar a simulação numérica do tubo de travessas rígidas foi necessário o levantamento das propriedades do material compósito. Assim, utilizou-se propriedades mecânicas de um material (Tabela 3.5), similar ao utilizado neste trabalho, obtidas pelo estudo de Madahavi *et al.* (2009).

Tabela 3.5 - Propriedades do compósito de fibra de carbono T300 Unidirecional/resina epóxi LY556/HT972. Fonte: Adaptado de (MADHAVI *et al.*, 2009)

<b>Propriedade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valores Experimentais</b>	<b>Norma</b>
Módulo de Elasticidade Longitudinal ( $E_1$ )	GPa	144	ASTM D3039
Módulo de Elasticidade Transversal ( $E_2$ )	GPa	6,5	ASTM D3039
Módulo de Cisalhamento no Plano ( $G_{12}$ )	GPa	5,6	ASTM D3518
Resistência ao Cisalhamento no Plano ( $S_{12}$ )	MPa	40	ASTM D3518
Resistência a Tração Longitudinal ( $X_{1T}$ )	MPa	1200	ASTM D3039
Resistência a Tração Transversal ( $X_{2T}$ )	MPa	17	ASTM D3039
Resistência a Compressão Longitudinal ( $Y_{1C}$ )	MPa	600	ASTM D3410
Resistência a Compressão Transversal ( $Y_{2C}$ )	MPa	80	ASTM D3410
Cisalhamento Interlaminar (ILSS)	MPa	42	ASTM D2344
Massa específica	$g/cm^3$	1,35	ASTM D3039
Coefficiente de Poisson	-	0,21	ASTM D3039
Volume de Fibra	%	51	ASTM D3171

Os materiais consumíveis utilizados para a fabricação dos tubos de travessas rígidas através do processo VARTM estão listados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Materiais utilizados para o processo de infusão.

<b>Material</b>	<b>Modelo</b>	<b>Fabricante</b>
Bolsa de Vácuo	Flexnyl MLA SF	MAP
Tecido Desmoldante ( <i>Peel Ply</i> )	MAP - Ply MT	MAP
Selante de Borda	MAP / Tape 9880-13A	MAP
Mídia de Distribuição	MAP / INFLUX-E 110-M 1220-100	MAP
Mangueira para Vácuo	120-WA-120-160	MAP
Mangueira Espiral (Spiroduto)	-	-
Registro para Linha de Infusão	-	-

### 3.2 Projeto dos tubos de travessas rígidas e camada interna

A fase inicial do projeto dos tubos de travessas rígidas e da camada interna estrutural pode ser dividida em quatro etapas: seleção dos tipos de configurações das travessas rígidas, cálculo analítico das estruturas, projeto das estruturas e modelagem computacional para simulação numérica pelo método dos elementos finitos.

Antes da seleção dos tipos de configurações das travessas rígidas, conforme discutido no Capítulo 2 item 2.6, as condições de carregamento para a validação do projeto baseou-se na norma NBR ISO 10328:2002. Os valores foram selecionados em função do maior nível de carga (A100) da norma e encontram-se dispostos na Tabela 3.7. Neste trabalho foram realizados somente os ensaios estáticos em virtude da quantidade de configurações a serem estudadas, pois o ensaio cíclico deve ser realizado em cada corpo de prova com uma frequência de 1Hz até atingir  $3 \times 10^6$  ciclos, ou seja, o tempo gasto acabaria inviabilizando este trabalho.

Tabela 3.7 - Condições de carga para o nível A100 da norma

<b>Ensaio Estático</b>		
<b>Compressão</b>		<b>Torção</b>
Comprovação	Falha	Falha
2240 N	4480 N	7,1 N.m

### 3.2.1 Seleção das configurações das estruturas de travessas rígidas

A seleção dos tipos de configurações das travessas rígidas e conseqüente aplicação destas estruturas como tubos para próteses de membros inferiores basearam-se na literatura. Como discutido no Capítulo 2 item 2.5, alguns autores (SORRENTINO *et al.*, 2016; VASILIEV; RAZIN, 2006) estudaram e otimizaram as estruturas de travessas rígidas em função do ângulo  $\varphi$  das travessas helicoidais. Em virtude destes estudos, o presente trabalho buscou selecionar três tipos de configurações de estruturas de travessas rígidas variando o ângulo  $\varphi$ . Os três ângulos selecionados e suas respectivas justificativas de escolha estão dispostos na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Seleção dos tipos de estruturas de travessas rígidas em função do ângulo  $\varphi$

<b>Estrutura de travessas rígidas</b>	<b>Ângulo <math>\varphi</math> das travessas helicoidais</b>	<b>Justificativa</b>
1	26°	Estudo realizado por Vasiliev e Razin (2006) afirmando que este é o ângulo ótimo para estruturas de travessas rígidas sendo solicitadas por esforços predominantemente de compressão
2	30°	Estudo realizado por Sorrentino <i>et al.</i> (2016) afirmando que este é o ângulo ótimo para estruturas de travessas rígidas sendo solicitadas por esforços predominantemente de compressão
3	40°	Adotado pelo Autor para analisar a influência de um ângulo maior nas propriedades da estrutura solicitada por multi-carregamentos

Após definida as configurações das estruturas a serem estudadas neste trabalho e a fim de simplificação da escrita e para o melhor entendimento do leitor, adotou-se a terminologia de CF26 para a Estrutura 1, CF30 para a Estrutura 2 e CF40 para a Estrutura 3.

### 3.2.2 Cálculos analíticos das estruturas de travessas rígidas

A partir da escolha dos três ângulos, a etapa dos cálculos analíticos foi realizada. Para o cálculo analítico das Estruturas 1, 2 e 3, as formulações utilizadas foram as Equações 1 a 4 do Capítulo 2 item 2.5 que contam com 20 variáveis de projeto, sendo 10 dependentes e 10 independentes. Logo, foi necessário determinar os valores para as variáveis independentes para encontrar as variáveis dependentes. Assim, os valores adotados para as variáveis independentes bem como suas justificativas estão dispostos na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Definição dos valores das variáveis independentes de projeto

#	Variável	Valor	Justificativa
1	Diâmetro (D)	30 mm	O valor do diâmetro foi escolhido em função dos diâmetros dos tubos protético presentes comercialmente e na literatura.
2	Comprimento (L)	300 mm	O valor do comprimento foi escolhido baseado nos comprimentos dos tubos protético presentes comercialmente e na literatura.
3	Ângulo $\varphi$	26°, 30° e 40°	Idem Tabela 3.8
4	Largura das travessas helicoidais ( $\delta_h$ )	4 mm	A largura adotada corresponde à largura do filamento contínuo de fibra de carbono descrito no Capítulo 3 item 3.1. Em virtude do pequeno diâmetro da estrutura, o aumento da largura das travessas implicaria em um aumento da superfície e conseqüente aumento de massa, indo contra os objetivos deste trabalho
5	Largura das travessas circulares ( $\delta_c$ )	4 mm	Tratando-se do mesmo material utilizado para as travessas rígidas helicoidais, Idem Justificativa 4
6	Módulo de Elasticidade das travessas helicoidais ( $E_h$ )	144 GPa	O módulo de Elasticidade adotado corresponde ao módulo do compósito de fibra de carbono/resina epóxi e possui referência da literatura na Tabela 3.5 do Capítulo 3 item 3.1
7	Módulo de Elasticidade das travessas circulares ( $E_c$ )	144 GPa	Tratando-se do mesmo material utilizado para as travessas rígidas helicoidais, Idem Justificativa 5
8	Tensão de Ruptura ( $\sigma$ )	1200 MPa	A tensão de ruptura adotada corresponde ao módulo do compósito de fibra de carbono/resina epóxi e possui referência da literatura na Tabela 3.5 do Capítulo 3 item 3.1
9	Massa específicas das travessas helicoidais ( $\rho_h$ )	1,35g/cm <sup>3</sup>	A massa específica adotada corresponde à massa específica do compósito de fibra de carbono/resina epóxi e possui referência da literatura na Tabela 3.5 do Capítulo 3 item 3.1
10	Massa específicas das travessas circulares ( $\rho_c$ )	1,35g/cm <sup>3</sup>	Tratando-se do mesmo material utilizado para as travessas rígidas helicoidais, Idem Justificativa 9

A obtenção dos valores das variáveis dependentes através dos cálculos analíticos foi de suma importância para este trabalho, pois algumas variáveis como a espessura das travessas rígidas e a distância entre as travessas rígidas helicoidais e circulares puderam ser identificadas.

### 3.2.3 Projeto das estruturas de travessas rígidas e camada interna

A partir dos cálculos analíticos e da obtenção de todos os parâmetros das estruturas propostas por este trabalho, teve início a fase dos projetos com auxílio do *software* de CAD (*Computer Aided Design*) *SolidWorks*<sup>®</sup>. Os desenhos foram necessários para a etapa de análise estrutural pelo método dos elementos finitos e para a fase de fabricação dos protótipos.

Na etapa de projeto em CAD, foram geradas as linhas de revolução das travessas rígidas helicoidais de acordo com o seu ângulo  $\varphi$ . Por exemplo, para a Estrutura 1 com ângulo  $\varphi$  de  $26^\circ$  e com o conhecimento dos valores do diâmetro e do comprimento da estrutura pode-se obter o valor das linhas de revolução de cada travessa rígida por trigonometria básica. Assim, o desenho da CF26, CF30 e CF40 pode ser realizado e gerado as superfícies (cascas) de suas respectivas travessas rígidas helicoidais e circulares (Figura 3.2).

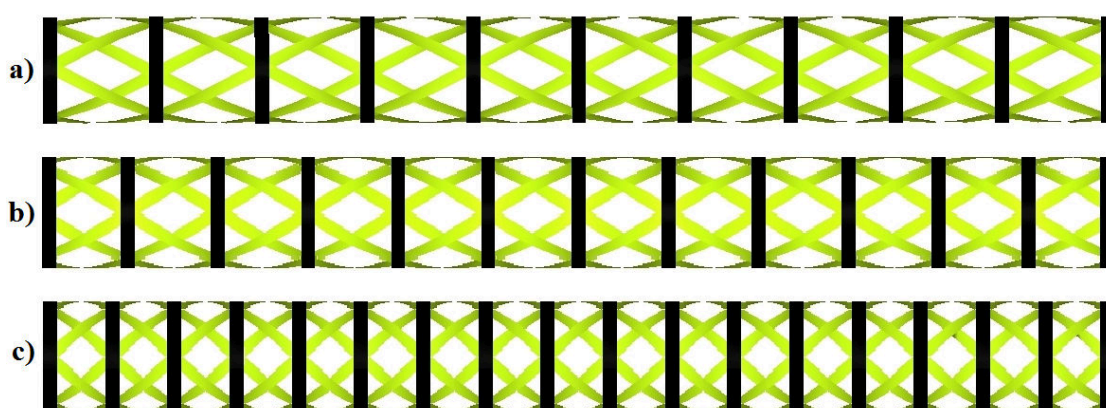


Figura 3.2 - a) CF26, b) CF30 e c) CF40. Fonte: Autor

Para todas as estruturas adotou-se o valor de 6 travessas rígidas helicoidais, sendo que as estruturas CF26, CF30 e CF40 possuem quantidades diferentes de travessas rígidas circulares. Isto ocorre devido ao ângulo  $\varphi$  das travessas rígidas helicoidais que, ao se cruzarem, geram mais ou menos interseções (nós) e conseqüentemente mais ou menos travessas circulares. Como pode ser visualizada pela Figura 3.2, a quantidade de travessas circulares das estruturas CF26, CF30 e CF40 foram de 11, 13 e 18 respectivamente.

A partir do projeto das superfícies das travessas rígidas helicoidais e circulares de cada estrutura, foi possível realizar o desenho da camada interna estrutural que também faz parte dos objetivos deste trabalho. A camada interna possui cavidades para “acomodar” as travessas rígidas helicoidais e circulares. A realização do projeto em CAD da camada interna estrutural foi necessário para a fase inicial do projeto envolvendo simulação numérica e para a etapa de fabricação das estruturas através de impressão 3D. A Figura 3.3 ilustra o projeto em CAD da camada interna da estrutura CF26. Porém, foram feitos os desenhos para todas as estruturas.

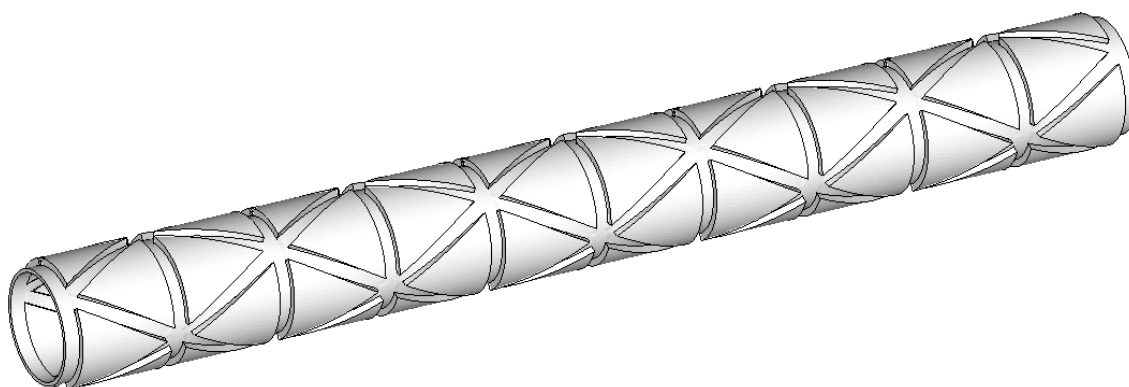


Figura 3.3 - Camada interna da estrutura CF26. Fonte: Autor

Como pode ser visualizado pela Figura 3.3, o projeto da camada interna buscou aumentar o reforço das estruturas e garantir uma melhor precisão para as travessas rígidas helicoidais e circulares durante a fase de enrolamento das fibras de carbono na etapa de fabricação.

### 3.2.4 Modelagem das estruturas

Para a etapa de modelagem estrutural foi necessário importar as geometrias (cascas) de todas as estruturas desenhadas em CAD para o programa computacional *Hypermesh*<sup>®</sup> que é um pré-processador e o *OptiStruct*<sup>®</sup> que é o *solver*, ambos da *Altair Hyperworks*<sup>®</sup>. O programa computacional *Hypermesh*<sup>®</sup> consiste de um programa para modelagem em elementos finitos que engloba desde a geração da malha, passando pela criação das propriedades e materiais, chegando até a aplicação das condições de contorno do projeto como os carregamentos e restrições. A biblioteca de elementos e propriedades que foram utilizadas no *Hypermesh*<sup>®</sup> advém do *OptiStruct*<sup>®</sup> que é o software que realiza o processamento (cálculos) das modelagens e condições de contorno impostas.

A primeira etapa consiste na criação da malha da estrutura a partir do projeto em CAD, ou seja, discretizar a geometria em vários elementos que servirão de base para a simulação numérica. Neste trabalho, a modelagem de todas as estruturas, que incluem a camada interna de revestimento e as travessas rígidas helicoidais e circulares, foram feitas através de elementos de casca 2D. Este tipo de modelagem é amplamente utilizado na área de projetos envolvendo simulação numérica, pois garante bons resultados ao mesmo tempo acarreta em um baixo custo computacional (JUNQUEIRA *et al.*, 2018; SILVEIRA; FANCELLO, 2015). Os elementos utilizados foram o QUAD e TRIA da biblioteca de elementos do *OptiStruct*<sup>®</sup>. O elemento QUAD possui 4 nós e 6 graus de liberdade por nó e o elemento TRIA com 3 nós e também 6 graus de liberdade por nó. Após vários testes com tamanho de malhas diferentes, baseado no melhor custo/convergência, foi definido o tamanho médio do elemento como sendo 1mm.

Após a criação da malha, a orientação do compósito foi definida seguindo um processo lógico de fabricação, ou seja, as orientações das travessas rígidas helicoidais e circulares foram na mesma direção do enrolamento das fibras de carbono. Esta etapa possui grande importância para garantir bons resultados, pois se tratando de material compósito que possui comportamento mecânico anisotrópico, a orientação correta do laminado implica diretamente na resposta da estrutura quando solicitada por um carregamento externo. A Figura 3.4 ilustra as orientações que as camadas do laminado das travessas rígidas helicoidais e circulares seguiram.

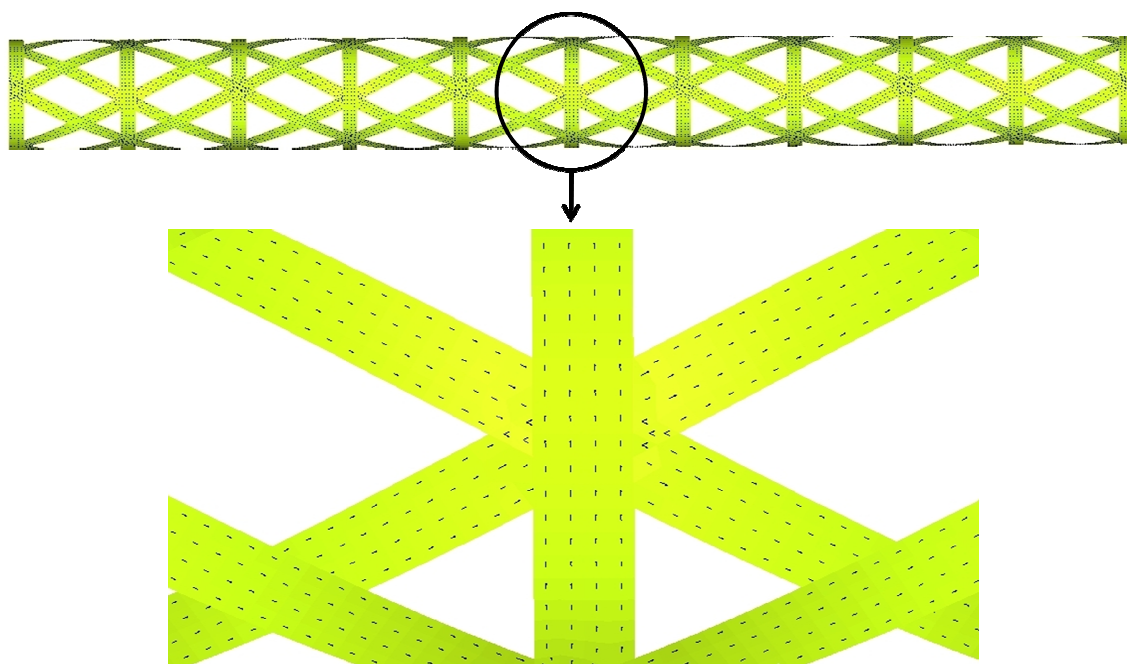


Figura 3.4 - Orientação dos compósitos das travessas rígidas helicoidais e circulares.

Fonte: Autor

Após a orientação dos compósitos, os valores das propriedades do material compósito foram inseridos no programa computacional de simulação numérica através da criação de uma propriedade (PCOMPP) específica para materiais compósitos da biblioteca do *OptiStruct*<sup>®</sup>. Estes valores inseridos no programa computacional correspondem aos contidos na Tabela 3.8 do Capítulo 3 item 3.2.2. Definido as propriedades do compósito, teve início a criação das suas camadas. A espessura de ambas as travessas rígidas helicoidais e circulares foram de 1,4 mm gerando um total de 7 camadas para cada travessa pois cada camada possui 0,2 mm de espessura. Esses valores foram inseridos no programa computacional de simulação numérica na configuração de laminado e criação de camadas (*ply*) como pode ser visualizado pela Figura 3.5.

Definição do Laminado						
Nome	Id	Cor	Material	Espessura (mm)	Orientação (°)	
ply1	1	Azul	Carbono/Epóxi	0,2	0	
ply2	2		Carbono/Epóxi	0,2	0	
ply3	3		Carbono/Epóxi	0,2	0	
ply4	4		Carbono/Epóxi	0,2	0	
ply5	5		Carbono/Epóxi	0,2	0	
ply6	6		Carbono/Epóxi	0,2	0	
ply7	7	Vermelho	Carbono/Epóxi	0,2	0	
ply8	8	Azul	Carbono/Epóxi	0,2	0	
ply9	9		Carbono/Epóxi	0,2	0	
ply10	10		Carbono/Epóxi	0,2	0	
ply11	11		Carbono/Epóxi	0,2	0	
ply12	12		Carbono/Epóxi	0,2	0	
ply13	13		Carbono/Epóxi	0,2	0	
ply14	14		Vermelho	Carbono/Epóxi	0,2	0
ply15	15		Carbono/Epóxi	0,2	0	
ply16	16		Carbono/Epóxi	0,2	0	
ply17	17	Carbono/Epóxi	0,2	0		

Figura 3.5 – Criação das camadas do laminado para as travessas rígidas helicoidais (azul) e circulares (vermelho). Fonte: Autor

Para a criação das propriedades da camada interna do tubo protético, os valores inseridos estão dispostos na Tabela 3.2 do Capítulo 3 item 3.1. A espessura total da camada interna de revestimento foi de 2,6 mm sendo que, para sua modelagem, foi necessário partir da superfície coincidente com os elementos das travessas rígidas e aumentar a espessura em 1,6 mm para fora e 1 mm para dentro. Esse procedimento foi adotado para garantir a precisão da modelagem tendo em vista que as camadas das travessas rígidas helicoidais e circulares cresceram 1,4mm para fora devido à seqüência de empilhamento das camadas seguir um critério lógico de enrolamento na sua fabricação. Os detalhes da modelagem da camada interna de revestimento e das travessas rígidas helicoidais e circulares podem ser visualizados pela Figura 3.6. Este procedimento de modelagem foi adotado para todas as estruturas propostas por este trabalho.

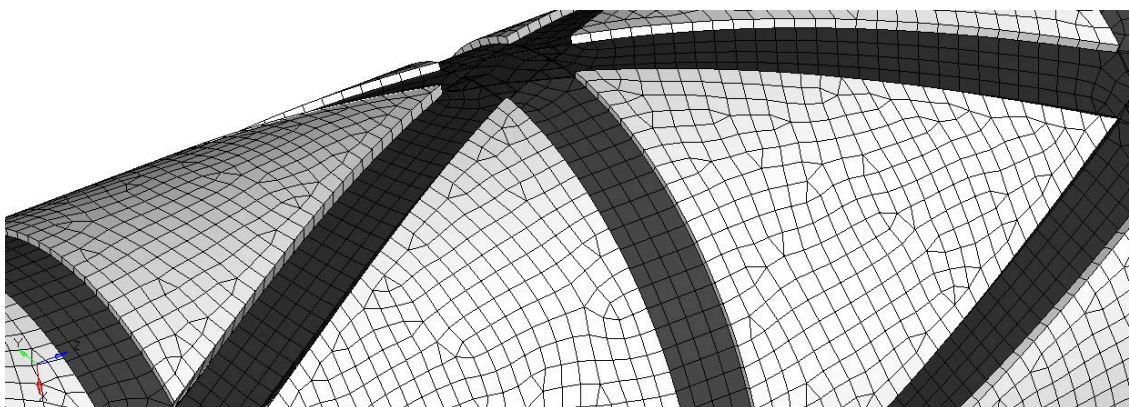


Figura 3.6 - Detalhe da modelagem em elementos finitos do tubo protético para a estrutura CF26. Fonte: Autor

Na etapa de modelagem das condições de contorno, foi criado um elemento rígido que liga os elementos 2D da superfície da camada interna de revestimento e das travessas rígidas. A criação deste elemento foi necessária para uma distribuição uniforme dos carregamentos nas estruturas propostas por este trabalho. Os valores dos carregamentos tanto de compressão quanto de torção aplicados ao modelo estão de acordo com a norma NBR ISO 10328:2002 e dispostos na Tabela 3.6 do Capítulo 3 item 3.2. Para a aplicação da restrição nas estruturas, todos os nós dos elementos da base foram selecionados e restringidos todos seus graus de liberdade tanto em translação quanto em rotação. A Figura 3.7 ilustra as condições de contorno aplicadas ao modelo da estrutura CF26. Para todas as estruturas a modelagem adotada foram as mesmas da Figura 3.7.

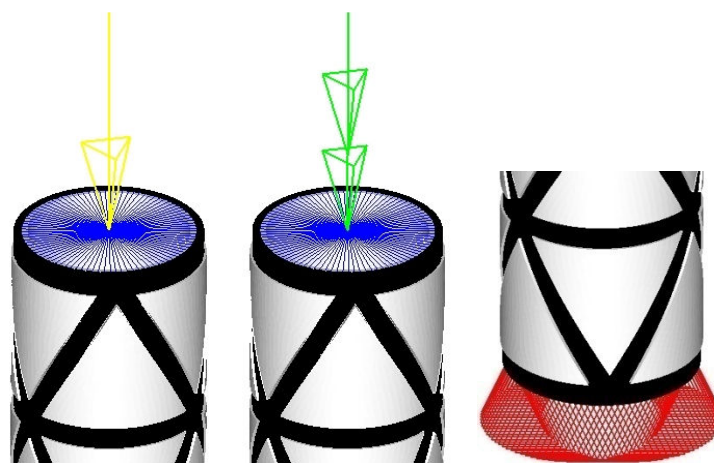


Figura 3.7 – Elemento rígido (Azul), força de compressão (Amarelo), força de torção (Verde) e as restrições (Vermelho) aplicadas na CF26. Fonte: Autor

Após a definição das condições de contorno, foi selecionado o critério de falha de Tsai-Wu (TSAI; WU, 1971) para a análise linear estática das estruturas. O critério de falha proposto por TSAI e WU (1971) estabelece equacionamentos para uma análise de tensões para materiais anisotrópicos. Resumidamente, uma laminado viria a falhar segundo a Equação 5.

$$F = F_1\sigma_1 + F_{11}\sigma_1^2 + F_2\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{66}\tau_{12}^2 < 1.0 \quad (5)$$

sendo:

$$F_1 = \frac{1}{X_{1T}} - \frac{1}{Y_{1C}}; \quad F_{11} = \frac{1}{X_{1T}Y_{1C}}; \quad F_2 = \frac{1}{X_{2T}} - \frac{1}{Y_{2C}}; \quad F_{22} = \frac{1}{X_{2T}Y_{2C}}; \quad F_{66} = \frac{1}{S_{12}^2};$$

$$F_{12} = \frac{1}{2P^2} \left[ 1 - P \left( \frac{1}{X_{1T}} - \frac{1}{Y_{1C}} + \frac{1}{X_{2T}} - \frac{1}{Y_{2C}} \right) - P^2 \left( \frac{1}{X_{1T}Y_{1C}} + \frac{1}{X_{2T}Y_{2C}} \right) \right]$$

onde  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\tau_{12}$  são as tensões principais e  $P = \sigma_1 = \sigma_2$  assumindo tensões biaxiais (TSAI; WU, 1971).

Como descrito anteriormente, foi realizado simulações numéricas para cada estrutura proposta por este trabalho e para cada tipo de carregamento de acordo com a norma. Para o cálculo das margens de segurança (MoS, *Margin of Safety*) das estruturas em função do índice de falha (FI, *Failure Index*) do critério de Tsai-Wu tem-se as equações 6 e 7.

$$MoS = SR - 1 \quad (6)$$

$$SR = \frac{1}{FI} \quad (7)$$

onde, SR é o fator de resistência e é inversamente proporcional ao índice máximo de falha (FI) do critério de Tsai-Wu.

Por fim, após a modelagem no *Hypermesh*<sup>®</sup> utilizou-se o *OptiStruct*<sup>®</sup> como *solver* (programa que realiza os cálculos das matrizes de deformação, rigidez, etc.) no módulo de análise linear estática. Este tipo de análise foi possível porque os ensaios são lentos o suficiente para que possam ser considerados estáticos. As deformações e deslocamentos também foram consideradas pequenas, bem como as condições de contato substituídas por carregamentos pontuais e restrições. Em todas as simulações foram consideradas apenas o regime elástico dos materiais. Dadas estas simplificações, foi possível utilizar um solver de análise linear estática (*OptiStruct*<sup>®</sup>), que possui baixo custo computacional e bons resultados para estas simplificações (JUNQUEIRA *et al.*, 2018).

Com o objetivo de avaliar a influência da camada interna na estrutura de travessas rígidas, uma análise numérica somente com as estruturas da Figura 3.2 foi realizada para critérios de comparação.

### **3.3 Processos de fabricação**

Após a realização do projeto das estruturas CF26, CF30 e CF40, teve início o processo de fabricação que pode ser dividido em 3 etapas: fabricação da camada interna, posicionamento das fibras de carbono na camada interna e processamento das estruturas via VARTM.

De acordo com a Norma NBR ISO 10328:2002, não existe uma quantidade mínima de corpos de prova para os ensaios estáticos. Além disso, os corpos de provas que foram utilizados no ensaio de comprovação e que não apresentaram defeitos podem ser utilizados no ensaio de falha. Para o ensaio de torção, somente a condição de falha é aplicada. Assim, neste trabalho, para cada tipo de estrutura (CF26, CF30 e CF40) foram fabricados 3 tubos para o ensaio de compressão e 3 tubos para o ensaio de torção.

### 3.3.1 Fabricação da camada interna

Para a fabricação da camada interna de suporte estrutural, este trabalho fez uso de impressão 3D que é um processo de manufatura aditiva. Basicamente, o processo consiste na fusão do material e depois sua deposição em camadas para formar a estrutura desejada. A Figura 3.8 ilustra as etapas do processo de impressão 3D. A impressora 3D utilizada neste trabalho foi uma *Ultimaker 2*® com volume de impressão de 120x120x115mm.

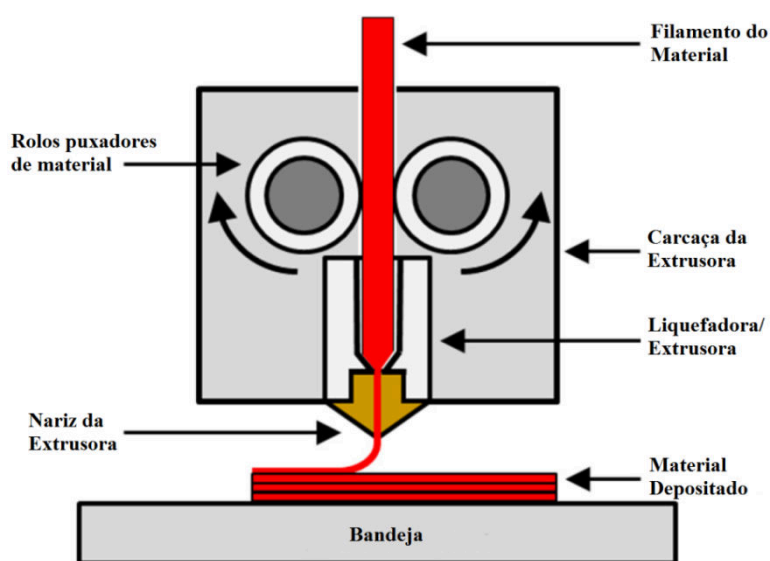


Figura 3.8 – Processo de impressão 3D. Fonte: Adaptado de (CANTRELL *et al.*, 2017)

Para a primeira etapa de fabricação da camada interna foi necessário importar o desenho CAD das estruturas (Figura 3.3) para o programa *Ultimaker Cura*® cuja função é gerar o código *G* para a interpretação da impressora 3D. Importado as geometrias, foi possível selecionar os parâmetros de impressão para a obtenção das propriedades mecânicas do ABS (Tabela 3.2) para as estruturas. Os parâmetros de impressão para as estruturas CF26, CF30 e CF40, que estão dispostos na Tabela 3.9, seguiram parâmetros estudados na literatura (CANTRELL *et al.*, 2017).

3.10 - Parâmetros de impressão 3D. Fonte: Adaptado de (CANTRELL *et al.*, 2017)

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>
Material	ABS
Tipo de Placa	3x3mm
Fixador	Solução ABS
Temperatura da Bandeja	115 °C
Temperatura do Nariz de Extrusão	250 °C
Velocidade	100%
Fluxo de Material	108%
Altura da Camada	0,1mm
Espessura da Casca	0,4mm
Espessura da Tampa/Fundo	0,8mm
Densidade do Preenchimento	100%
Velocidade de Impressão	50 mm/s
Espessura da Camada Inicial	0,2mm

Após os ajustes dos parâmetros de impressão 3D, foi possível a fabricação das camadas internas das estruturas CF26, CF30 e CF40. Conforme discutido anteriormente, a altura máxima de impressão da *Ultimaker 2®* é de 115 mm, sendo assim, foi necessário dividir o tubo de 300 mm em quatro peças de 75 mm e depois junta-las em um único tubo. Para garantir a precisão das juntas, foi projetado flanges internos para o posicionamento das peças. A Figura 3.9 ilustra a impressão 3D de uma parte da camada interna da estrutura CF26 e sua montagem completa.

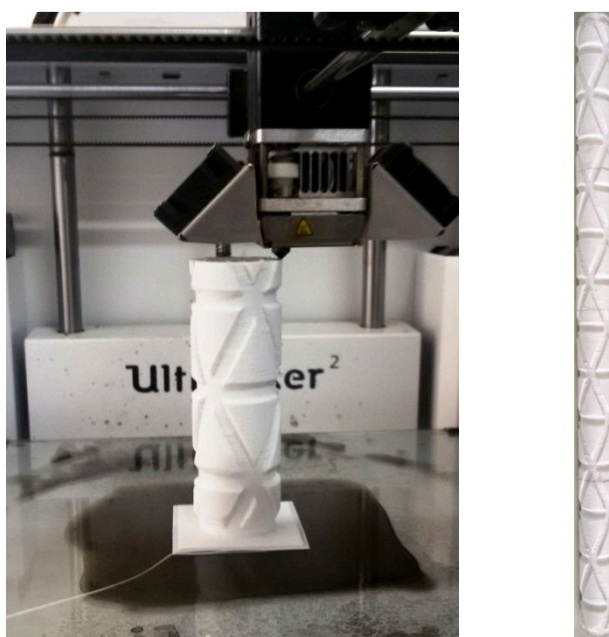


Figura 3.9 – Impressão da camada interna da CF26. Fonte: Autor

Assim, todas as camadas internas das estruturas CF26, CF30 e CF40 foram impressas e montadas para a próxima etapa de fabricação. A impressão em 3D da camada interna foi de suma importância para este trabalho, pois além de servir como parte estrutural do tubo protético, serviu para garantir a precisão do enrolamento das camadas de fibra de carbono nas posições e ângulos corretos.

### **3.3.2 Enrolamento da fibra contínua de carbono**

Após a fabricação da camada interna estrutural/revestimento, teve início o processo de posicionamento dos filamentos contínuos de fibra de carbono. Este processo de deposição das fibras foi realizado de forma manual com o auxílio de luvas para evitar a contaminação.

Primeiramente, a camada interna foi posicionada entre dois suportes de madeira para facilitar o enrolamento manual. Para que a camada interna fosse bem posicionada entre os suportes, foram projetados dois pinos para garantir seu apoio e mobilidade no momento do enrolamento.

Diante disso, teve início a deposição das fibras secas nas cavidades da camada interna sem que houvesse a interrupção ou quebra do filamento de fibra de carbono. Este procedimento foi de grande importância para garantir a continuidade das fibras de carbono em todas as travessas rígidas do tubo protético. Como discutido anteriormente, as cavidades da camada interna foram de grande importância para garantir a precisão do enrolamento das fibras de carbono. No final do enrolamento, foram utilizados dois pedaços de fita adesiva crepe de 10 mm de largura para garantir a restrição dos movimentos das fibras. O processo de deposição das fibras foi realizado para todos os corpos de prova de todas as estruturas propostas por este trabalho. A Figura 3.10 ilustra o enrolamento das fibras de carbono na estrutura CF40.

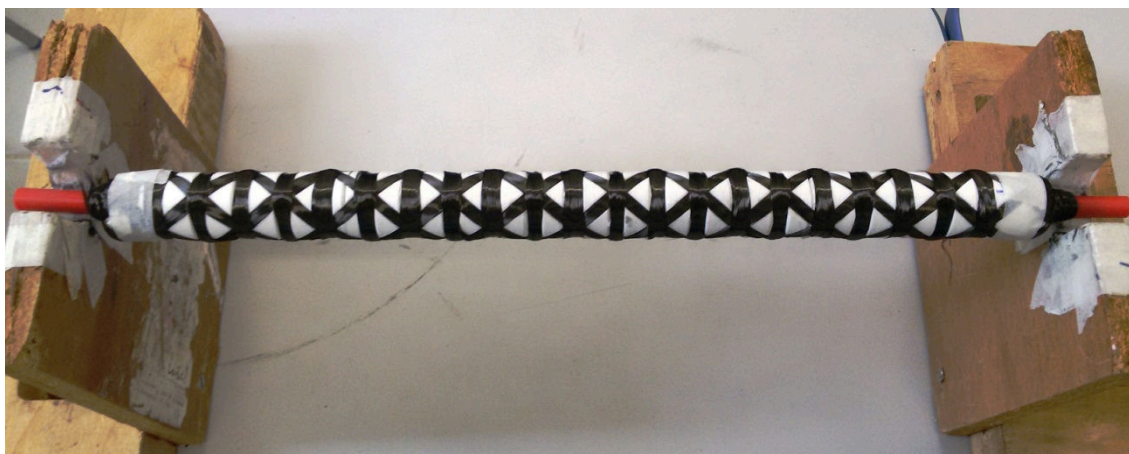


Figura 3.10 – Enrolamento manual do filamento contínuo de fibra de carbono na CF40.

Fonte: Autor

### 3.3.3 Processamento das estruturas via VARTM

A partir do enrolamento das fibras secas em todos os corpos de prova das estruturas CF26, CF30 e CF40, teve início o processo de infusão de resina via VARTM. Resumidamente, neste processo as camadas de fibras (laminado) são posicionadas contra um molde e envoltas em um filme plástico cujo objetivo é o de compactar o laminado e ao mesmo tempo servir de contramolde flexível (MIL-HDBK-17, 2002). Em seguida, é realizada a adição de materiais consumíveis (tecido desmoldante, mídia de transporte, duto de transporte de resina) e fechamento do sistema utilizando uma fita selante de borda. Para a aplicação do vácuo, utiliza-se uma bomba de vácuo conectada a uma saída para a resina. Assim, com o auxílio do vácuo, realiza-se a infusão de resina através do laminado ocasionando a impregnação das fibras (Figura 3.11).

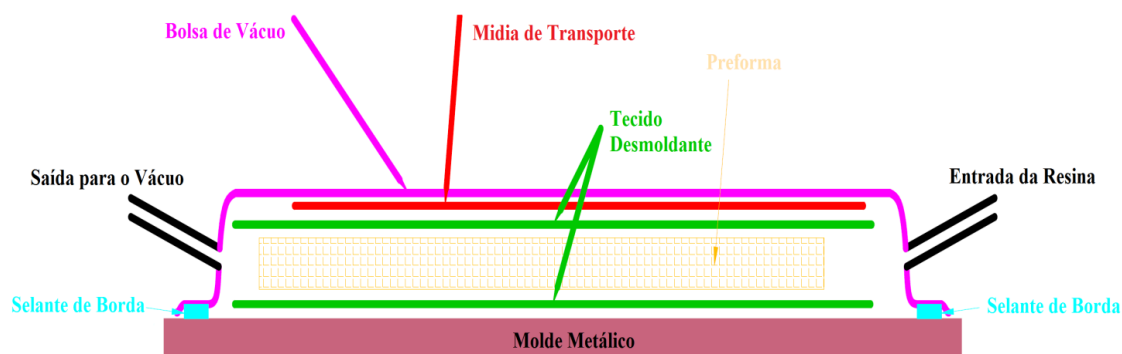


Figura 3.11 – Processo VARTM. Fonte: Adaptado de (ZHU, 2010)

Para o início do processo de infusão de resina via VARTM dos tubos de travessas rígidas, a primeira etapa foi cortar a bolsa de vácuo e posicioná-la sobre uma mesa de trabalho. A aplicação do selante de borda foi realizada em volta da região onde a estrutura ficaria posicionada. Em seguida, foi realizado o corte de dois pedaços de tecido desmoldante (*peel ply*) para revestir a estrutura e facilitar sua desmoldagem. A estrutura revestida com *peel ply* foi posicionada sobre a bolsa de vácuo e inserido a mídia de transporte de resina. Toda esta etapa pode ser visualizada pela Figura 3.12.

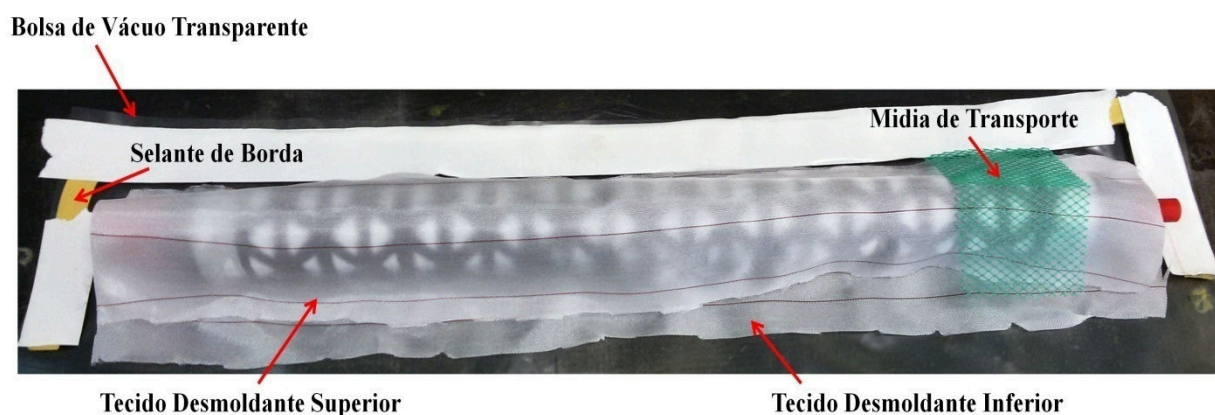


Figura 3.12 – Estrutura posicionada sobre a bolsa de vácuo e envolta em tecido desmoldante. Fonte: Autor

Em seguida, foi realizado o posicionamento de dois registros para linha de infusão nas extremidades da bolsa de vácuo e sobre o selante de borda. Em cada registro foi colocado duas mangueiras em espiral (Spiraduto) para garantir uma melhor distribuição da resina. Estes registros juntamente com os Spiradutos são responsáveis pela entrada da resina e saída do vácuo e estão ilustrados na Figura 3.13.

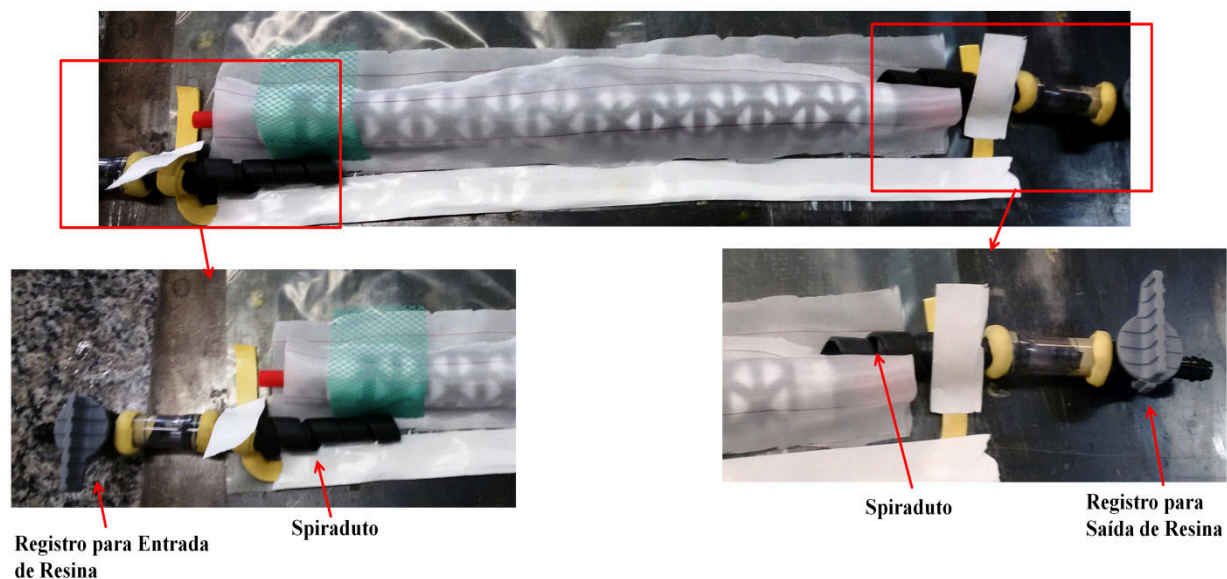


Figura 3.13 – Posicionamento dos registros e dos Spiradutos. Fonte: Autor

A próxima etapa foi realizar o fechamento da bolsa de vácuo (Figura 3.14), sendo assim, foi retirada a proteção (Branca) do selante de borda e cuidadosamente foi posicionada a bolsa de vácuo em toda a região do selante de borda. Conectou-se duas mangueiras no final dos registros da linha de infusão, uma na entrada de resina e outra na saída do vácuo. Na entrada de resina, foi inserido um funil para facilitar no processo de infusão e na saída do vácuo conectou-se a mangueira na bomba de vácuo.



Figura 3.14 – Fechamento da bolsa de vácuo. Fonte: Autor

Em seguida, a bomba de vácuo é acionada com uma pressão de aproximadamente 25 mPa para garantir que não existem regiões com vazamentos de ar evitando que ocorram bolhas no momento da infusão de resina. A aplicação do vácuo garante a compactação das camadas de fibra além de ajudar na impregnação uniforme das fibras.

Após a aplicação do vácuo e da inspeção para garantir que não houve vazamentos, teve início o procedimento para infusão da resina. Com o auxílio de um misturador, misturou-se as partes A e B do sistema de resina por um período de 4 minutos. Assim, a mistura foi despejada no funil e o registro da linha de infusão de resina foi aberto. Com o auxílio do vácuo, houve a impregnação total das fibras de carbono pela resina. Após o processo ser concluído, a bolsa de vácuo com a estrutura foi levada para uma estufa (Figura 3.15) com rampa de aquecimento de 5°C/min até atingir 80°C de temperatura de patamar e permanecendo por 4 horas a 80°C para garantir a cura completa. Todo este procedimento descrito anteriormente foi aplicado a todos os corpos de prova de todas as estruturas propostas por este trabalho.



3.15 - Estrutura na estufa para realizar a cura. Fonte: Autor

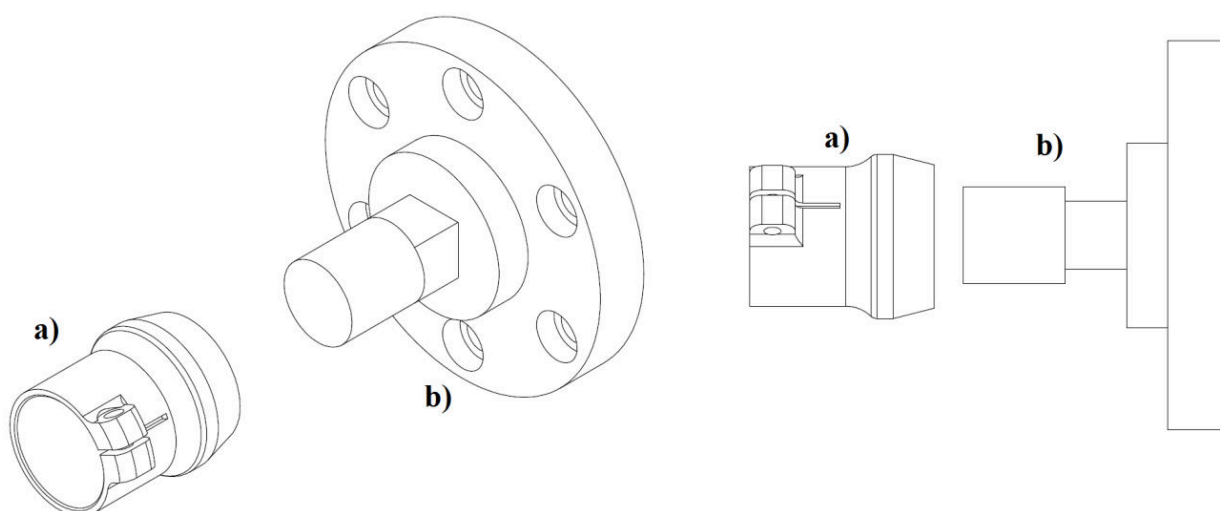
## 3.4 Ensaios estáticos

### 3.4.1 Projeto e fabricação dos dispositivos de ensaio

Como discutido no Capítulo 2 item 2.6, os ensaios mecânicos para os tubos de travessas rígidas seguiram os procedimentos descritos pela norma NBR ISO 10328:2002. Para a realização dos ensaios estáticos de compressão e de torção foi necessário o projeto e fabricação de dois dispositivos mecânicos que atendessem a ambos os ensaios.

Primeiramente, o projeto dos dispositivos foi realizado com auxílio do programa computacional de CAD *SolidWorks*<sup>®</sup>. O projeto foi concebido com o objetivo de ser útil para o ensaio de compressão onde os carregamentos aplicados pela máquina de ensaio fossem transferidos corretamente para os corpos de prova e para o ensaio de torção onde garantissem que os tubos não girassem livremente. Para tal, o projeto pode ser visualizado pelas Figuras 3.16.

Pela Figura 3.16 a parte (a) corresponde ao bocal de suporte para transferência de carga e acoplamento do tubo. A parte (b) corresponde ao suporte cuja função é evitar que o tubo seja comprimido ao ser pressionado pelo suporte (a) dando batente interno no ensaio de torção e batente no ensaio de compressão. Além disso, o suporte (b) consegue ser acoplado na máquina de ensaios universal através de simples parafusos.



3.16 - Suportes para ensaios estáticos. Fonte: Autor

Após o projeto dos dispositivos de ensaio, foi realizada sua fabricação em máquina de fresamento convencional do instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI Campus Itajubá. A Figura 3.17 ilustra os dispositivos finalizados.



3.17 - Dispositivos de ensaio de compressão e torção. Fonte: Autor

### 3.4.2 Ensaio de torção

Para o ensaio de torção dos tubos de travessas rígidas foi utilizado um total de nove tubos sendo três de cada estrutura (CF26, CF30 e CF40). O comprimento dos tubos teve que ser reduzidos para 100 mm devido a restrições da máquina para ensaio de torção. Os suportes (b) da Figura 3.16 foram acoplados através de parafusos na máquina de ensaio axial/torsional da marca *Instron*®, modelo 8874. Os suportes (a) foram acoplados nos tubos e fixados através de parafusos nos suportes (b). Para garantir que os corpos de prova não escorregassem, os parafusos dos suportes (a) foram apertados contra a parede dos tubos. Em seguida, o tubo de travessas rígidas foi posicionado na máquina de ensaio (Figura 3.18) e teve início o ensaio a uma velocidade de 1°/min.



3.18 – Montagem dos suportes e do tubo de travessas rígidas para o ensaio de torção.

Fonte: Autor

### 3.4.3 Ensaio de compressão dos tubos de travessas rígidas

De acordo com a norma, os ensaios de compressão foram divididos em duas etapas: Comprovação e Falha. Para o ensaio de comprovação foi utilizado um total de nove tubos sendo três de cada estrutura (CF26, CF30 e CF40) todos com comprimento de 300 mm. Conforme discutido anteriormente, se os corpos de prova não falhassem no ensaio de comprovação, poderiam ser utilizados no ensaio de compressão até a falha. Para ambos os ensaios (Comprovação e Falha), foi utilizado os suportes (Figura 3.17) que foram projetados para garantir uma melhor distribuição do carregamento de compressão e evitar que os tubos “escorregassem” nos ensaios.

Os suportes (b) da Figura 3.16 foram acoplados através de parafusos na máquina de ensaio universal servo-hidráulica da marca *Instron*®, modelo 8801. Os suportes (a) foram acoplados nos tubos e fixados através de parafusos nos suportes (b). Para garantir a fixação dos corpos de prova, os parafusos dos suportes (a) foram apertados contra a parede dos tubos.

Os corpos de prova foram posicionados na máquina de ensaio universal (Figura 3.19) e assim, iniciou-se o ensaio de comprovação com uma velocidade de 2mm/min. Ao atingir 2240N o ensaio foi interrompido, conforme descrito na norma NBR ISO 10328:2002. Todos os corpos de prova que foram aprovados, ou seja, não romperam antes da carga de comprovação, foram ensaiados novamente até a falha.

Para o cálculo da resistência a compressão e do módulo de elasticidade dos tubos de travessas rígidas foi utilizado as Equações 8 e 9 respectivamente.

$$\sigma = \frac{F}{A_{tr}} \quad (8)$$

$$E = - \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (9)$$

onde,  $\sigma$  é a resistência a compressão (MPa),  $F$  é a força aplicada em (N),  $A_{tr}$  é a área da seção transversal do tubo de travessas rígidas,  $E$  é o módulo de elasticidade em (GPa),  $\Delta\sigma$  é a variação entre a resistência a compressão inicial e final,  $\Delta\varepsilon$  variação entre a deformação inicial e final.



3.19 - Montagem dos suportes de ensaio e do tubo de travessas rígidas na máquina de ensaio universal para o ensaio de compressão. Fonte: Autor

#### **3.4.4 Ensaio de compressão da estrutura parcial (transtibial)**

De acordo com a norma NBR ISO 10328:2002 uma estrutura parcial (transtibial) envolve o tubo protético, o suporte do tubo protético e o conjunto pé/calcanhar (Figura 2.7). Pela norma, a estrutura transtibial deve passar pelo ensaio de comprovação e falha e deve ser ensaiada tanto a parte frontal (pé protético) quanto a parte traseira (calcanhar protético) em ambas as modalidades.

Para a realização do ensaio do pé/calcanhar, a montagem da estrutura transtibial foi realizada de acordo com a norma que estabelece as inclinações e ângulos para aplicação de força. As Figuras 3.20 e 3.21 ilustram os posicionamentos da estrutura transtibial para as configurações de ensaio frontal e traseira, respectivamente.



3.20 – Posição de ensaio frontal. Fonte: Autor



3.21 - Posição de ensaio calcanhar. Fonte: Autor

Após o posicionamento da estrutura na máquina de ensaio universal servo-hidráulica da marca *Instron*®, modelo 8801, a velocidade de ensaio foi de 2mm/min. Os critérios de carregamentos que devem ser aplicados na estrutura transtibial estão dispostos na Tabela 3.11.

3.11 - Condições de carregamento para estrutura transtibial. Fonte: Adaptado de NBR ISO 10328:2002

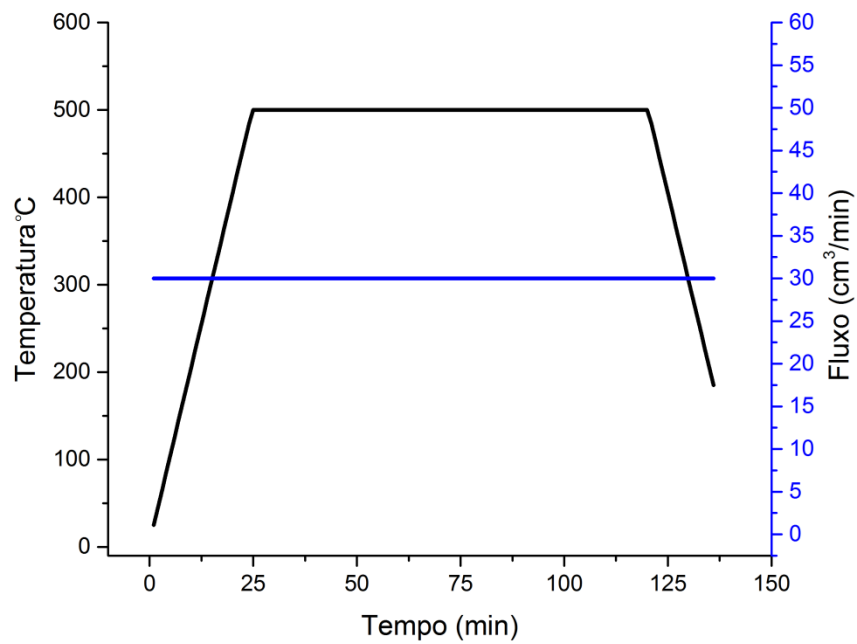
<b>Ensaio Estático Estrutura Transtibial</b>		
<b>Condição de Carga</b>	<b>Ensaio de Comprovação</b>	<b>Ensaio de Falha</b>
I	2240 N	4480 N
II	2013 N	4025 N

I – Aplicada no Calcâneo  
II – Aplicada no Pé

### 3.5 Caracterização do volume de fibras

As propriedades mecânicas de um material compósito estão diretamente relacionadas ao volume de reforço que o laminado apresenta. Portanto, a caracterização das estruturas quanto ao seu volume de fibra possui grande importância para análise dos resultados dos ensaios mecânicos deste trabalho.

Para o procedimento de caracterização do volume de fibras de todos os corpos das estruturas CF26, CF30 e CF40, iniciou-se com a retirada de aproximadamente 600mg de amostras das travessas rígidas helicoidais e circulares. Com o auxílio de uma balança de precisão da marca Shimadzu® modelo AUW220D, pesou-se um porta amostras de platina. As amostras retiradas dos tubos protéticos foram colocadas e pesadas junto com o porta amostras de platina. Para a obtenção da massa de fibra e massa de resina do compósito, foi necessário realizar a degradação da resina. Para tal, o porta amostras de platina junto com as amostras do compósito foram levadas para um forno com atmosfera controlada de Nitrogênio. O ciclo térmico utilizado para a degradação da resina foi uma rampa de aquecimento a uma taxa de 20°C/min, começando em 25°C e chegando até o patamar de 500°C permanecendo a esta temperatura por 120min. O fluxo de nitrogênio utilizado foi de 30cm<sup>3</sup>/min durante todo o processo de degradação. A Figura 3.22 ilustra o ciclo térmico de degradação da resina.



3.22 – Ciclo térmico utilizado para a degradação da resina. Fonte: Autor

Após a degradação da resina, o que restou no porta amostras de platina foi somente a fibra de carbono. Para a obtenção do volume de fibras foram utilizadas as Equações de 10 a 14.

$$m_c = m_t - m_p \quad (10)$$

$$m_f = m_c - m_p \quad (11)$$

$$m_m = m_c - m_f \quad (12)$$

$$V_f = \frac{m_f}{\rho_f} \quad (13)$$

$$V_m = \frac{m_m}{\rho_m} \quad (14)$$

onde,  $m_c$  é a massa do compósito,  $m_t$  é a soma da massa das amostras pesadas junto com o porta amostras de platina,  $m_p$  é a massa do porta amostras de platina,  $m_f$  é a massa de fibra,  $m_m$  é a massa da matriz,  $V_f$  é o volume de fibra,  $V_m$  é o volume da matriz,  $\rho_f$  é a massa específica de fibra que é igual a  $1,78\text{g/cm}^3$  e  $\rho_m$  é a densidade da matriz que é igual a  $1,2\text{ g/cm}^3$ .

### 3.6 Ensaio de impacto

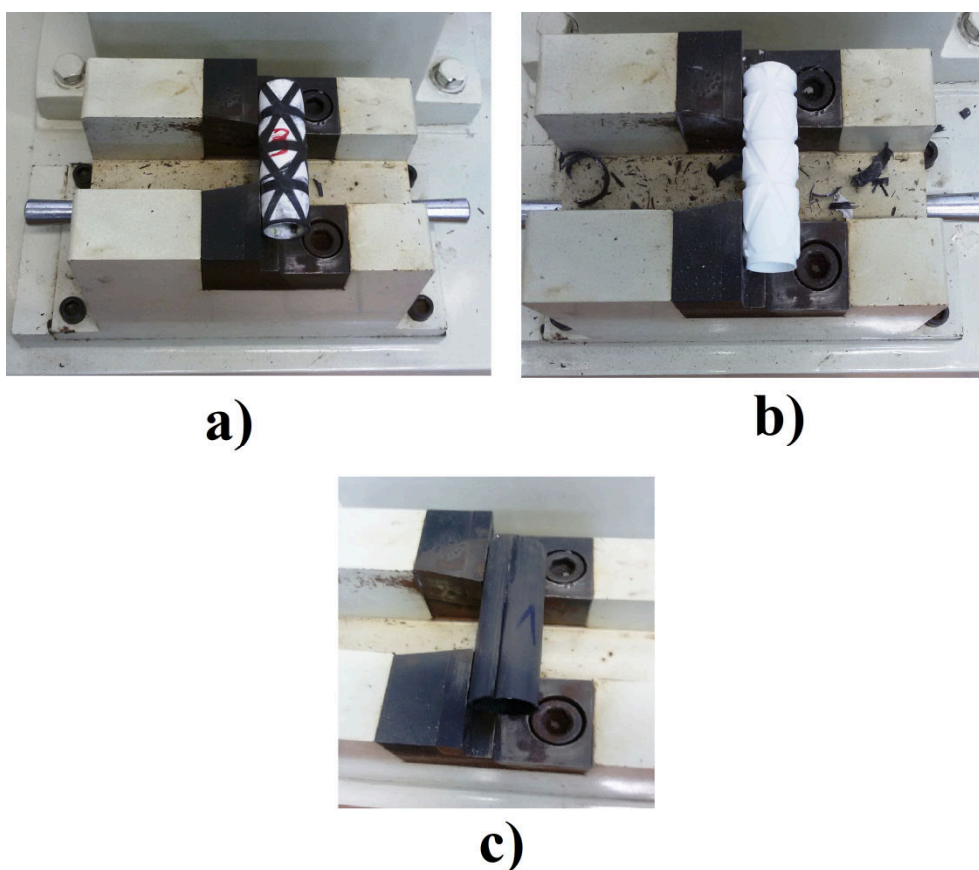
De acordo com a norma NBR ISO 10328:2002 o teste de impacto nos tubos protéticos não é exigido. Porém, os tubos protéticos estão sujeitos a impactos transversais quando em uso. Com o objetivo de medir a energia de absorção de impacto dos tubos de travessas rígidas, o ensaio de impacto de Charpy foi realizado.

A máquina para o teste de impacto utilizada foi da empresa *Jinan Shidai Shijin Testing Machine Group Co., Ltd.*, modelo JB-300AI/C (Figura 3.23). O pendulo utilizado para o ensaio foi de 300J-Charpy e o comprimento da região de impacto do tubo de travessas rígidas foi de 40mm e todos os corpos de prova tinham 100mm de comprimento devido a restrições da máquina de ensaio.



3.23 – Máquina para ensaio de impacto. Fonte: Autor

Os ensaios foram realizados com um total de 15 corpos de prova sendo 3 para cada tipo de estrutura (CF26, CF30 e CF40), 3 para a camada interna e 3 para um tubo de fibra de carbono/resina epóxi. O objetivo de realizar o teste de impacto somente na camada interna foi de avaliar a energia que ela iria absorver sem o reforço das travessas rígidas. Para o tubo de fibra de carbono/resina epóxi, o objetivo foi o mesmo da camada interna, porém analisando se somente a fibra e a resina possuem melhores propriedades de absorção de impacto que a estrutura de travessas rígidas em conjunto com a camada interna. Os posicionamentos do tubo de travessas rígidas, da camada interna e do tubo de fibra de carbono/resina epóxi na máquina de ensaio estão ilustrados na Figura 3.24.



3.24 – Posicionamento par o ensaio de impacto a) Tubo de travessas rígidas, b) Camada interna e c) Tudo de fibra de carbono/resina epóxi. Fonte: Autor

Após o posicionamento dos corpos de prova, o pendulo de 300J-Charpy foi liberado e assim foi possível realizar o levantamento da absorção de energia ao impacto que é dada em Joules (J).

### 3.7 Microscopia

Para as análises de falha dos tubos de travessas rígidas foi utilizado o estereomicroscópio *Feldmann Wild Leitz SMZ 7.5* (Figura 3.25), com aumento de 8 vezes. O estereomicroscópio conta com auxílio de uma câmera acoplada, para obtenção de imagens nos locais das fraturas dos tubos após ensaios de ruptura. O uso do estereomicroscópio foi com a finalidade de analisar os tipos de falhas que ocorreram nas travessas rígidas.



3.25 - Estereomicroscópio *Feldmann Wild Leitz SMZ 7.5*. Fonte: Autor

(Intencionalmente deixado em branco)

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

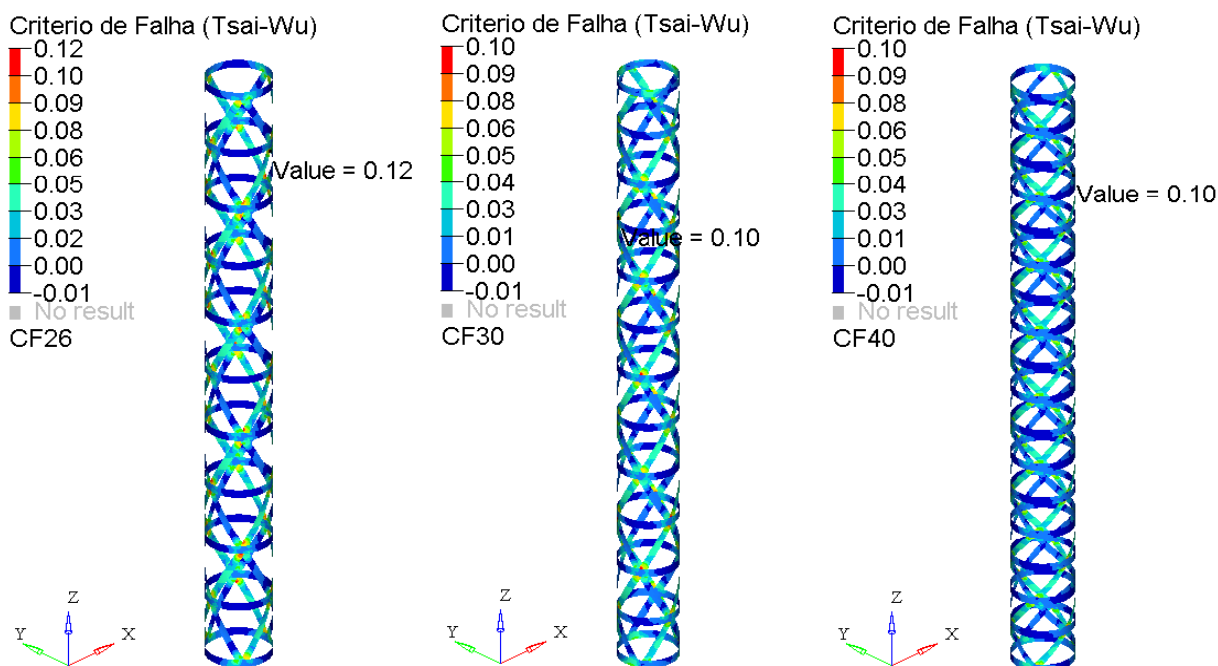
### **4.1 Análise estrutural pelo método dos elementos finitos**

Nesta etapa, serão analisados e discutidos os resultados de simulação numérica pelo método dos elementos finitos para as estruturas de travessas rígidas com e sem a camada interna. Como ressaltado anteriormente, a finalidade de analisar somente a estrutura de travessas rígidas foi de verificar a influência da camada interna nas propriedades mecânicas do tubo protético como o aumento da resistência a compressão ou torção.

Em primeiro momento, a partir do cálculo analítico das estruturas de travessas rígidas discutido no Capítulo 3 item 3.2.2, foi possível obter a espessura das travessas helicoidais e circulares. Através dos cálculos, o valor mínimo que as travessas deveriam possuir seria de 0,8 mm. Porém, ao realizar as simulações numéricas de compressão (os resultados serão mostrados e discutidos nos capítulos posteriores) as estruturas de travessas rígidas sem a presença de camada interna falharam. Assim, para o decorrer da análise dos resultados, a espessura adotada tanto para as travessas helicoidais quanto para as circulares foi de 1,4 mm. Vale ressaltar que o valor de 1,4 mm também foi adotado na fabricação das estruturas para avaliar a correlação dos resultados numéricos e experimentais.

#### **4.1.1 Análise de torção**

Nesta etapa, foi realizada a simulação numérica para avaliar se as estruturas CF26, CF30 e CF40 iriam suportar o carregamento de 7,1N.m sem a presença da camada interna. Os resultados estão ilustrados na Figura 4.1.



4.1 – Resultados de torção para estruturas de travessas rígidas sem camada interna.

Fonte: Autor

O critério utilizado para avaliar se as estruturas estão falhando foi o de Tsai-Wu (discutido no Capítulo 3 item 3.2.4). Pode-se observar pela Figura 4.1 que todas as estruturas de travessas rígidas não estão falhando com o carregamento de 7,1N.m exigido pela norma. Para uma melhor interpretação dos resultados, foi realizado o cálculo da margem de segurança (MoS) a partir das Equações 6 e 7 e os resultados estão dispostos na Tabela 4.1.

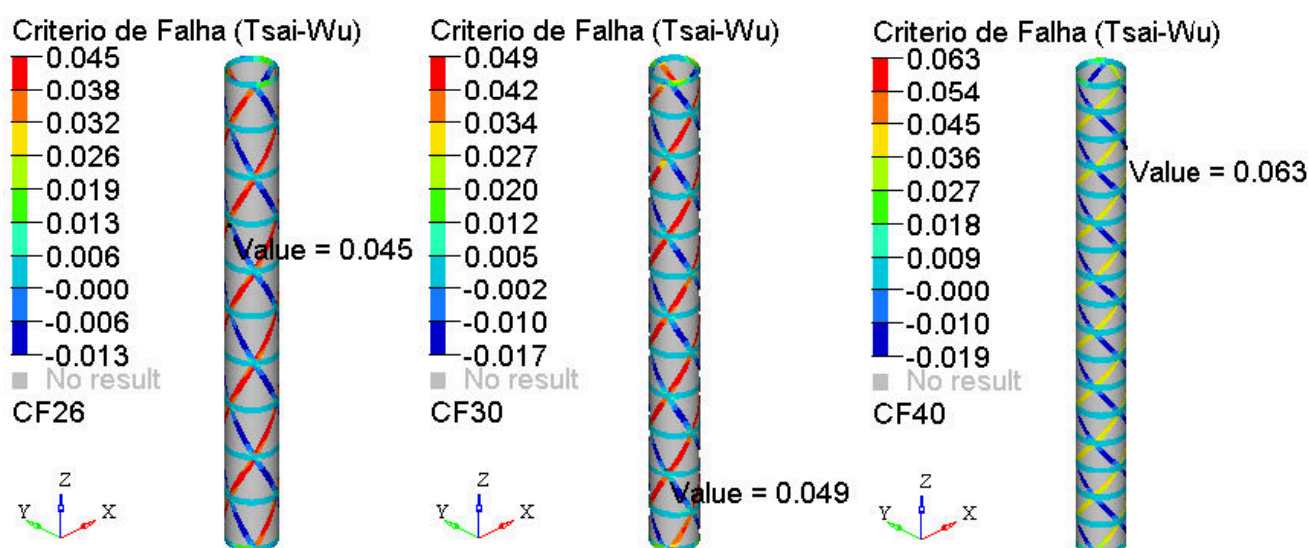
4.1- Valores, em torção, da margem de segurança para as estruturas de travessas rígidas sem cama interna. Fonte: Autor

<b>Estrutura</b>	<b>FI</b>	<b>MoS</b>
CF26	0,12	7,3
CF30	0,10	9,0
CF40	0,10	9,0

Como se pode observar da Tabela 4.1, as margens de segurança estão bem altas, sendo que a menor margem é da estrutura CF26. As estruturas CF30 e CF40 possuem as maiores margens de segurança e ambas são iguais. Além disso, a estrutura CF26 é menos eficiente no quesito de torção em comparação com as estruturas CF30 e CF40,

porém, todas as estruturas atendem a norma com grande margem de segurança. Assim, em ordem decrescente de resistência à torção aparecem as estruturas CF40, CF30 e CF26.

Os resultados da simulação numérica de torção para as estruturas de travessas rígidas CF26, CF30 e CF40 com a camada interna estão ilustrados na Figura 4.2. Os mesmos parâmetros adotados anteriormente foram utilizados nesta simulação, com a diferença que esta possui a camada interna de ABS. Para uma melhor interpretação dos resultados, também foi realizado o cálculo da margem de segurança (MoS) a partir das Equações 6 e 7 e os resultados estão dispostos na Tabela 4.2.



4.2 - Resultados de torção para estrutura de travessas rígidas com camada interna.

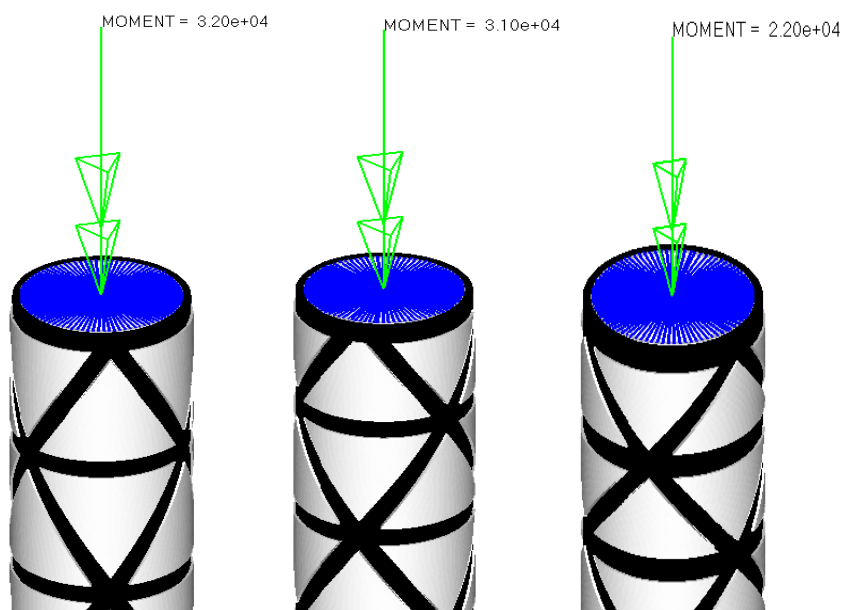
Fonte: Autor

4.2 - Valores, em torção, da margem de segurança para as estruturas de travessas rígidas com camada interna. Fonte: Autor

Estrutura	FI	MoS
CF26	0,045	21,2
CF30	0,049	19,4
CF40	0,063	14,9

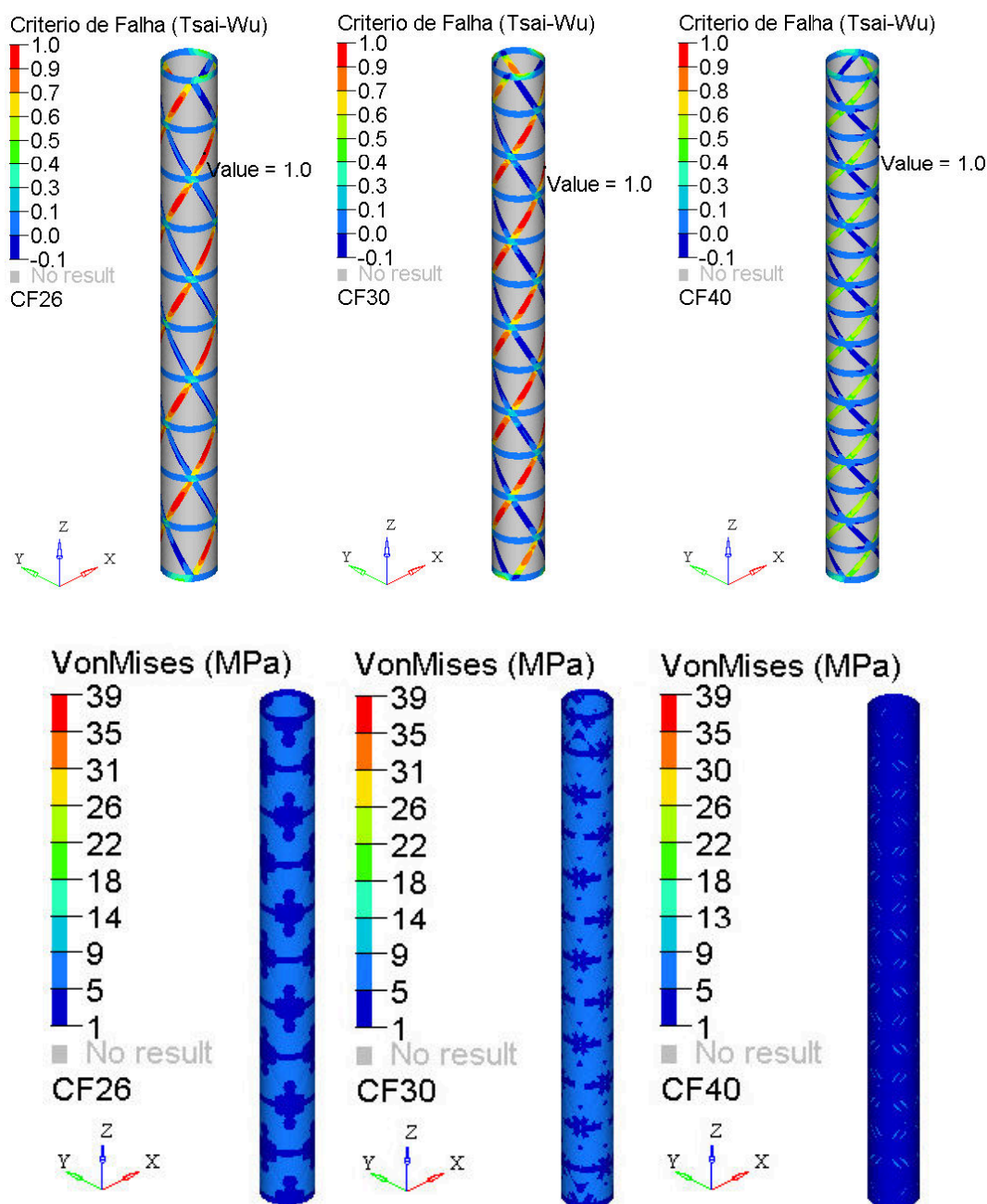
Analisando a Figura 4.2 e a Tabela 4.2 pode-se observar que as margens de segurança aumentaram muito com a inclusão da camada interna na estrutura. Além disso, houve uma inversão dos valores de MoS com a utilização da camada interna. Em ordem decrescente de resistência à torção aparecem as estruturas CF26, CF30 e CF40. Isto significa que a camada interna aumenta a resistência à torção das estruturas.

Após comprovado que a camada interna beneficia mecanicamente as estruturas de travessas rígidas, foram realizadas várias simulações numéricas (métodos iterativos) para se chegar ao valor máximo de carga em torção que os diferentes tipos de configurações de tubos iriam suportar. A Figura 4.3 ilustra a modelagem numérica com a carga máxima em torção obtida para cada tipo de estrutura. A Figura 4.4 mostra a análise de falha das estruturas de travessas rígidas e da camada interna de ABS.



4.3 – Carga máxima em torção para as estruturas CF26, CF30 e CF40, respectivamente.

Fonte: Autor

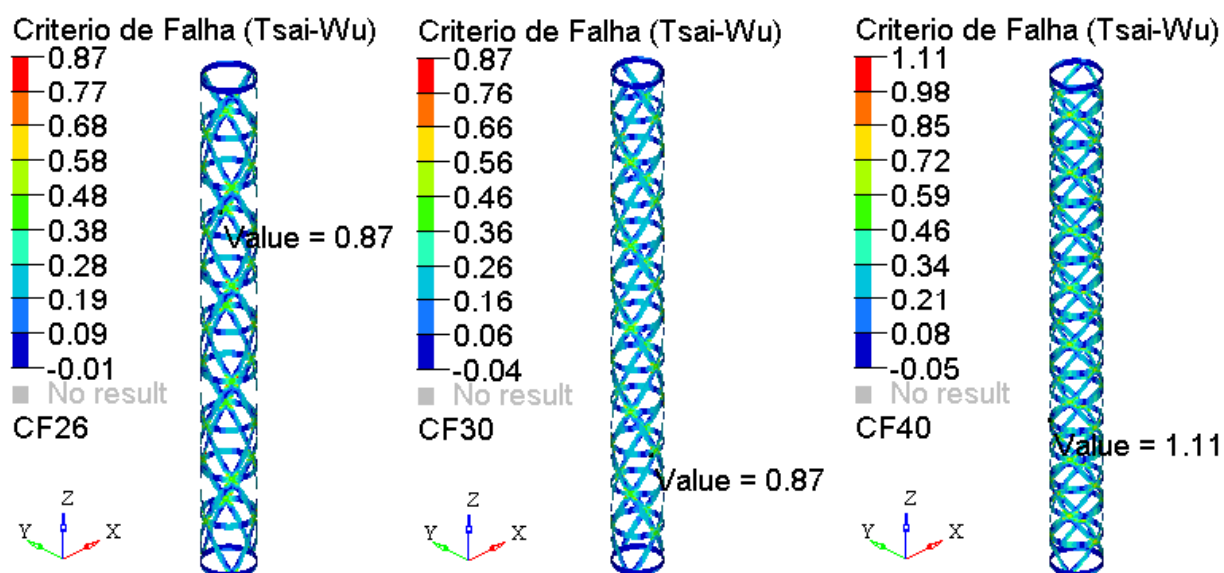


4.4 – Análise de Falha em carga máxima de torção para as estruturas CF26, CF30 e CF40, respectivamente. Fonte: Autor

Os valores máximo em torção, obtidos por simulação numérica, para as estruturas CF26, CF30 e CF40 foram de 32kN.m, 31kN.m e 22kN.m, respectivamente. Esses valores encontram-se muito acima aos 7,1N.m exigidos pela norma. Além disso, pode-se observar que a camada interna de ABS não apresentou falha tendo em vista que o limite de escoamento para o ABS é de 39MPa de acordo com a Tabela 3.2.

### 4.1.2 Análise de compressão

Utilizando a mesma metodologia para as simulações em compressão, primeiramente as estruturas foram analisadas sem a camada interna de revestimento. A etapa de comprovação foi descartada nesta fase de simulação numérica, pois as estruturas devem ser robustas o suficiente para suportar o carregamento de 4480N, portanto a carga de 2240N do ensaio de comprovação torna-se irrelevante por possuir menor valor. Assim, a Figura 4.5 ilustra os resultados de compressão para as estruturas CF26, CF30 e CF40 sem a presença de camada interna. Os cálculos da margem de segurança, utilizando as Equações 6 e 7, estão dispostos na Tabela 4.3.



4.5 - Resultados de compressão para estruturas de travessas rígidas sem camada interna.

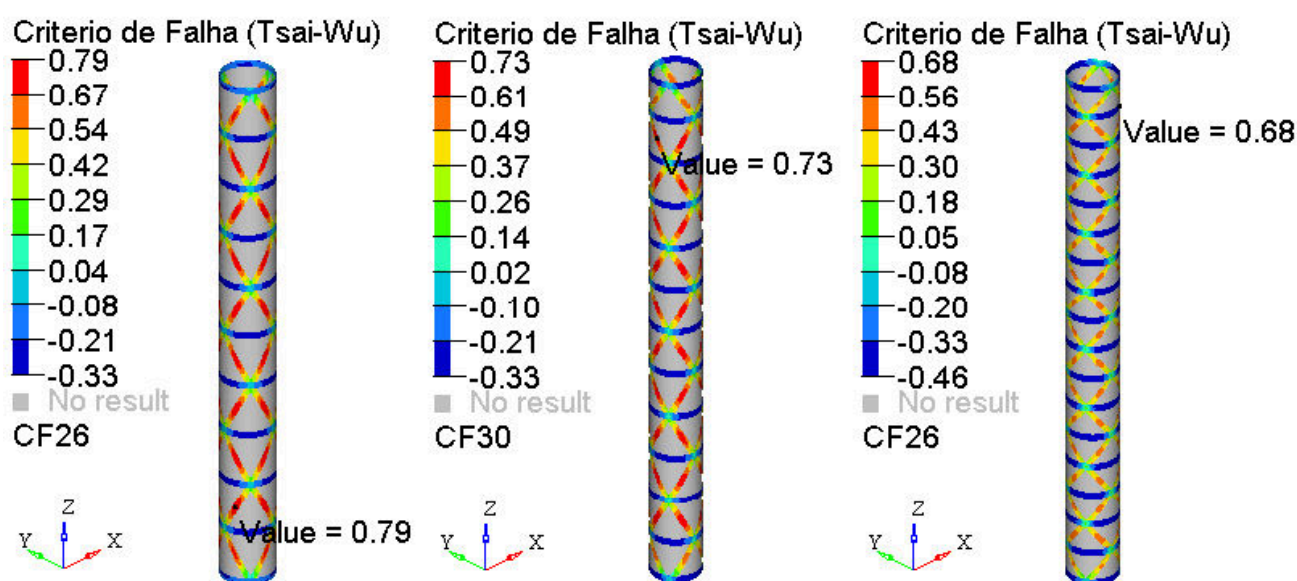
Fonte: Autor

4.3 - Valores, em compressão, da margem de segurança para as estruturas de travessas rígidas sem cama interna. Fonte: Autor

Estrutura	FI	MoS
CF26	0,87	0,15
CF30	0,87	0,15
CF40	1,11	-0,10

Analisando a Figura 4.5 e Tabela 4.3 pode-se observar que as estruturas CF26 e CF30 estão atingindo os requisitos de falha em compressão da norma, porém com margens de segurança bem apertadas. Em relação à estrutura CF40, ela está falhando antes de atingir a carga de 4480N de compressão estipulada pela norma. Em ordem decrescente de resistência à compressão estão as estruturas CF26, CF30 e CF40.

Os resultados de falha em compressão das estruturas CF26, CF30 e CF40 com a camada interna estão ilustrados pela Figura 4.6 e suas margens de segurança calculadas através das Equações 6 e 7 estão dispostas na Tabela 4.4.



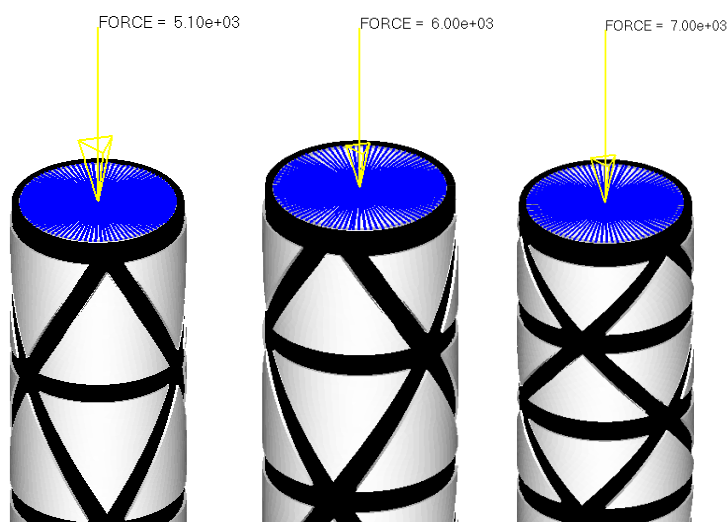
4.6 – Resultados de compressão para estrutura de travessas rígidas com camada interna.  
Fonte: Autor

4.4 – Valores, em compressão, da margem de segurança para as estruturas de travessas rígidas com camada interna. Fonte: Autor

<b>Estrutura</b>	<b>FI</b>	<b>MoS</b>
CF26	0,79	0,27
CF30	0,73	0,37
CF40	0,68	0,47

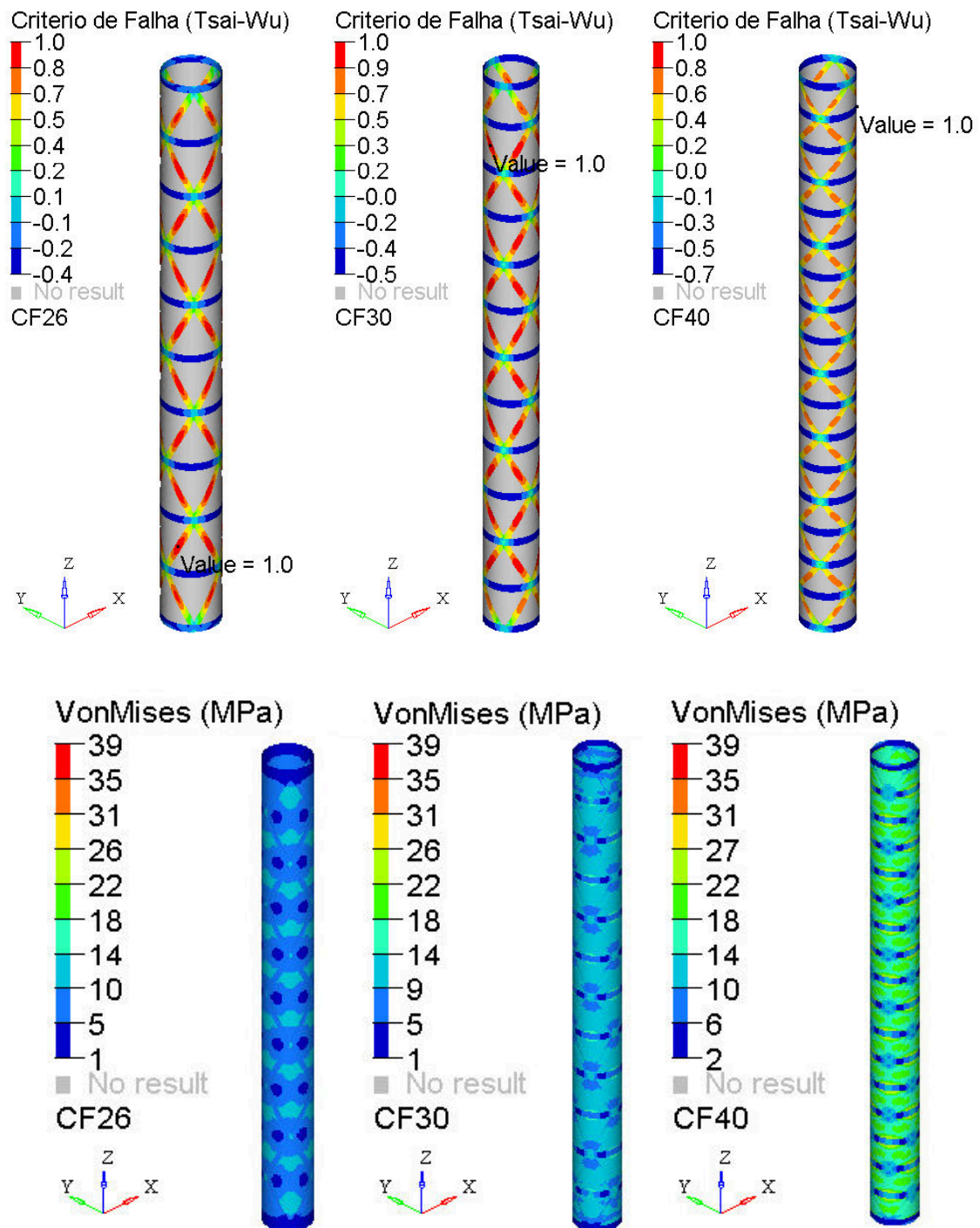
Pelos resultados da Figura 4.6 e da Tabela 4.4 as estruturas com camada interna tiveram aumento da resistência à compressão. Portanto, todas foram aprovadas nos requisitos da norma, até mesmo a estrutura CF40 que anteriormente estava sendo reprovada. Além disso, seguindo a mesma tendência dos resultados de torção, com a inclusão da camada interna de revestimento, houve uma inversão dos valores de resistência à compressão e em ordem decrescente estão as estruturas CF40, CF30 e CF26.

Com o objetivo de se avaliar os valores máximos de resistência a compressão até a falha, da mesma maneira que para a resistência à torção, foram realizadas várias simulações numéricas (métodos iterativos) para se chegar ao valor máximo de carga em compressão que os diferentes tipos de configurações de tubos iriam suportar. A Figura 4.7 ilustra a modelagem numérica com a carga máxima em compressão obtida para cada tipo de estrutura. A Figura 4.8 mostra a análise de falha das estruturas de travessas rígidas e da camada interna de ABS.



4.7- Carga máxima em torção para as estruturas CF26, CF30 e CF40, respectivamente.

Fonte: Autor



4.8 - Análise de Falha em carga máxima de compressão para as estruturas CF26, CF30 e CF40, respectivamente. Fonte: Autor

Os valores máximos, em compressão, encontrados para todas as estruturas CF26, CF30 e CF40 foram de 5100N, 6000N e 7000N, respectivamente, todos acima da exigência da norma. As camadas internas de ABS para todas as estruturas não

apresentam falha, tendo em vista que o limite de escoamento é de 39MPa de acordo com a Tabela 3.2.

Os trabalhos de Vasiliev e Razin (2006) e de Sorrentino *et al.* (2016) afirmam que as estruturas de travessas rígidas com ângulos de 26° e 30°, respectivamente, possuem as melhores propriedades mecânicas em compressão. Estes resultados, se confirmados experimentalmente, principalmente os de inversão de valores quando inserido a camada interna nas estruturas, mostram que se torna necessário um modelo matemático mais aprimorado para prever o comportamento de estruturas de travessas rígidas com camadas interna.

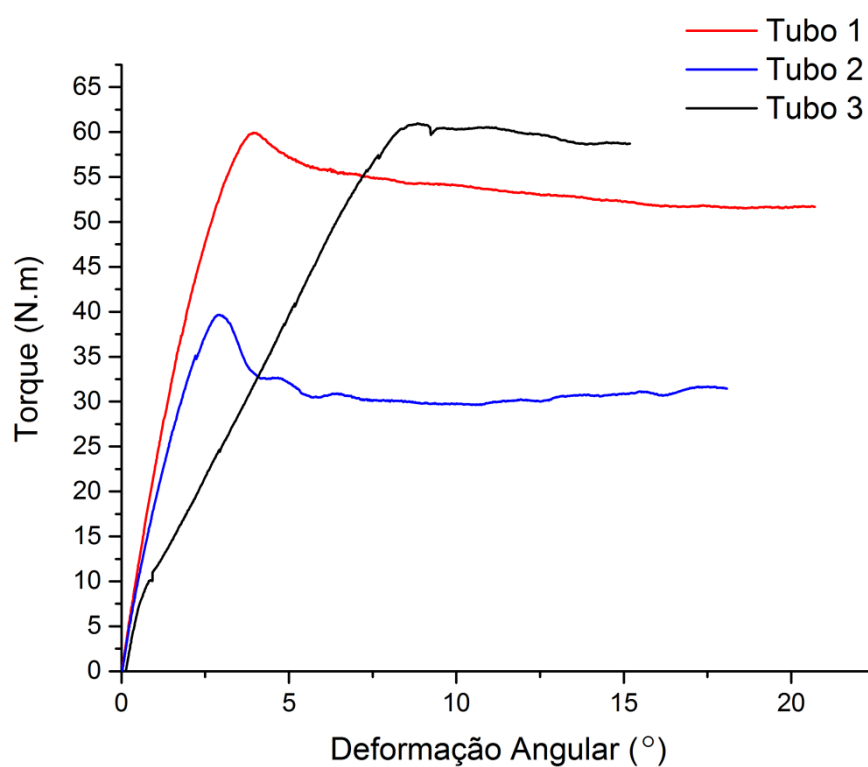
Esta inversão de valores acontece devido a alguns fatores: A estrutura de travessas rígidas, sem o uso da camada interna de polímero, é formada pelo compósito de fibra de carbono e resina epóxi onde as características relacionadas às propriedades mecânicas são influenciadas somente pela orientação das fibras (reforço). Quando a camada interna faz parte da estrutura, o compósito é formado pela fibra de carbono, resina epóxi e o polímero ABS. Assim, existe a modificação das propriedades mecânicas da estrutura que não dependem somente das orientações das fibras, mas também da quantidade de reforço. Além disso, fazendo uma análise das Figuras 4.4 e 4.8 foi comprovado que as maiores tensões nas camadas internas aconteceram nas estruturas que suportaram os maiores carregamentos. Isto evidencia que uma parcela do carregamento que antes era suportado apenas pelas travessas rígidas foi transferida para o polímero ABS que por sua vez contribui para o aumento de rigidez da estrutura.

## **4.2 Ensaios estáticos**

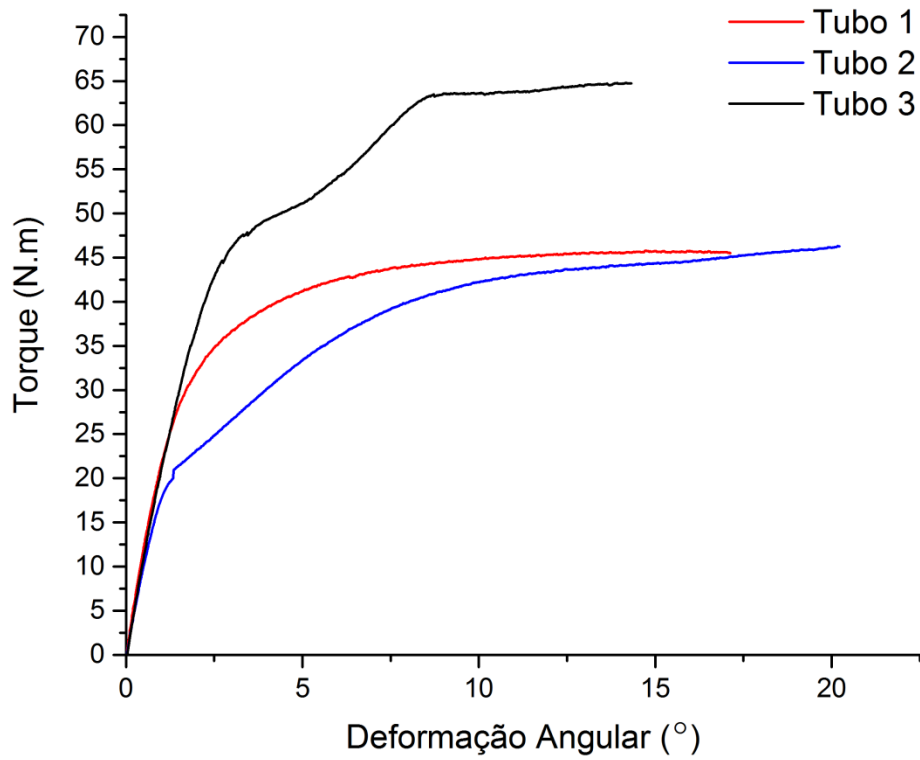
Após a análise dos resultados das simulações numéricas tanto para torção quanto para compressão, uma análise experimental dos resultados através de ensaios mecânicos foi de suma importância para critério de comprovação da estrutura. Além disso, a partir dos ensaios mecânicos exigidos pela norma foi possível calcular a correlação dos resultados numéricos e experimentais. Assim, neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios mecânicos de torção e compressão das estruturas CF26, CF30 e CF40, bem como o resultado do ensaio da estrutura parcial em compressão.

### 4.2.1 Ensaio de torção

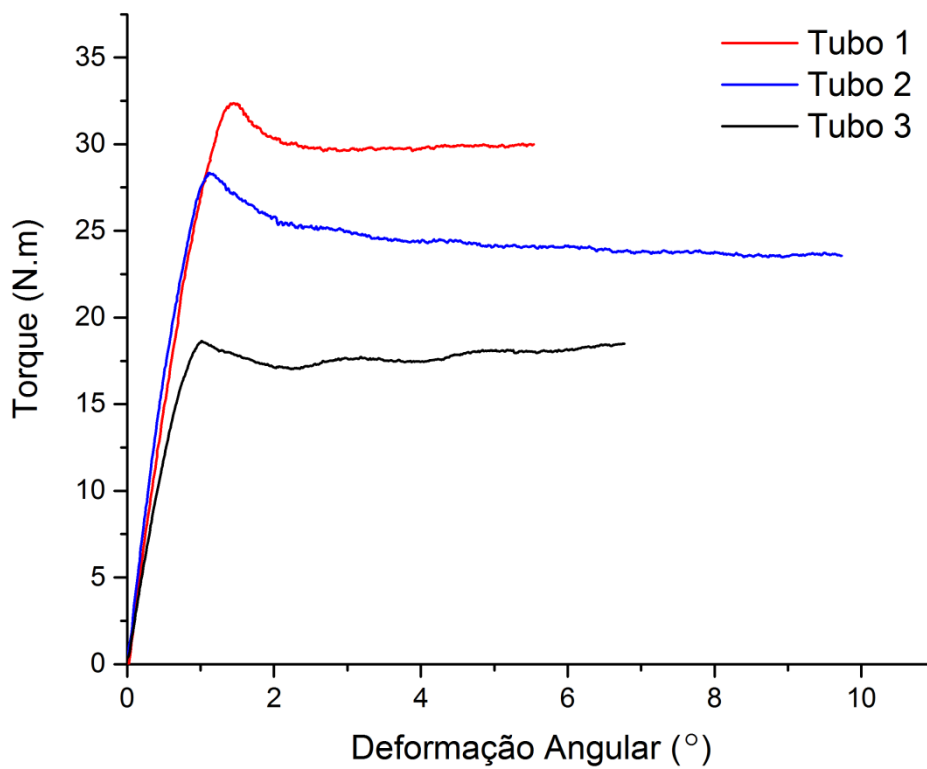
Para os ensaios de torção, foram fabricados 3 tubos de travessas rígidas para cada estrutura. Os resultados para a estrutura CF26, CF30 e CF40 estão ilustrados nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11, respectivamente.



4.9 – Curva dos corpos de prova ensaiados em torção para a estrutura CF26. Fonte: Autor



4.10 - Curva dos corpos de prova ensaiados em torção para a estrutura CF30. Fonte:  
Autor



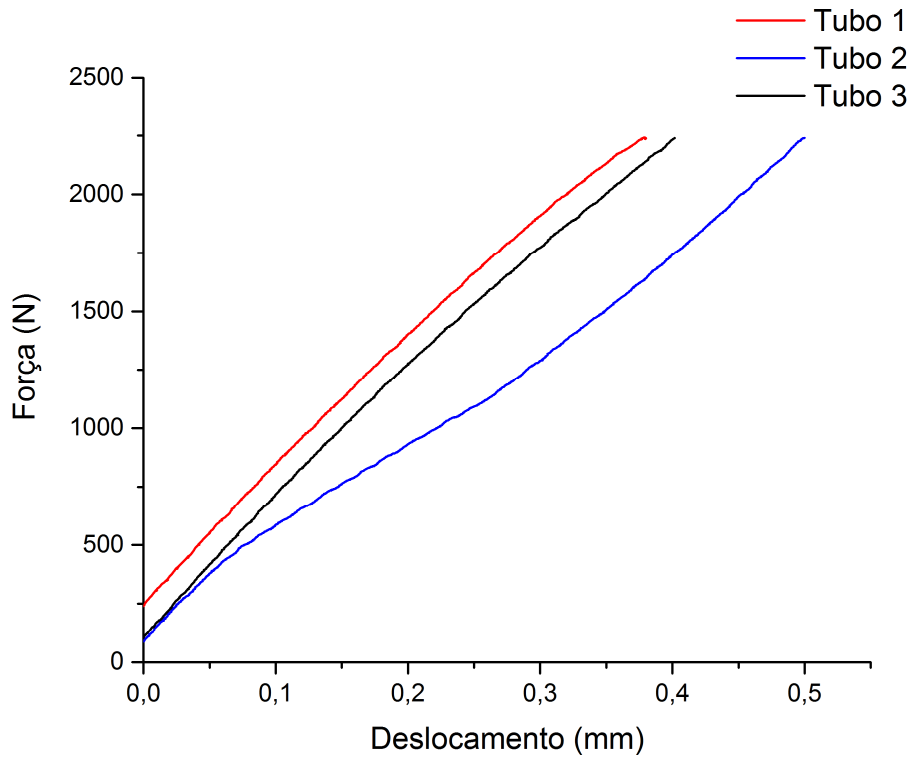
4.11 - Curva dos corpos de prova ensaiados em torção para a estrutura CF40. Fonte:  
Autor

Em um primeiro momento, analisando as curvas das Figuras 4.9, 4.10 e 4.11, pressupõe-se que os tubos falharam, pois apresentam “picos” onde as estruturas alcançam valores mais altos e depois caem e se mantêm constante. O fato foi que nos ensaios, esse pico e os valores constantes representam o início e a continuidade do escorregamento dos tubos. Devido a problemas de fixação dos corpos de prova no dispositivo de ensaio, depois de um determinado tempo, o dispositivo rotacionava sem transferir o carregamento para os tubos. Assim, neste ensaio não foi possível realizar a falha dos corpos de prova para se obter o carregamento máximo em torção de cada tipo de configuração. Porém, todos os corpos de prova de todas as configurações obtiveram valores maiores de resistência à torção que o exigido pela norma sendo que alguns corpos de prova, como no caso do Tubo 1 da CF26 e Tubo 3 da CF30, obtiveram valores acima de 60N.m.

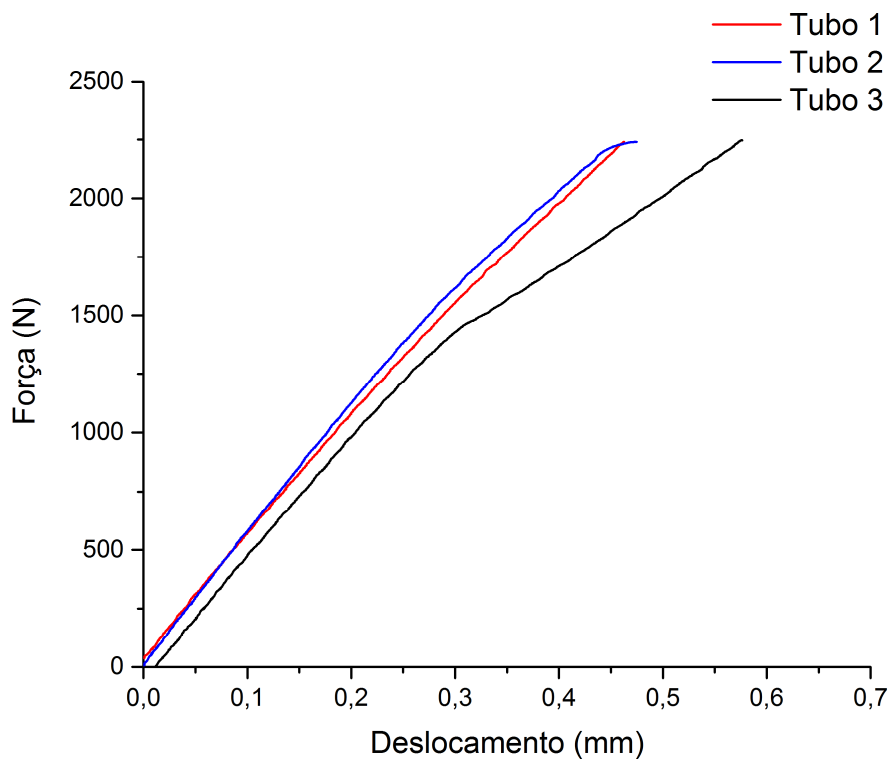
#### **4.2.2 Ensaio de compressão**

De acordo com a norma, os ensaios de compressão devem ser divididos em Comprovação e Falha. Assim, o procedimento experimental adotado foi de realizar o ensaio de comprovação com os corpos de prova de todas as estruturas e, se atingissem o valor de 2240N, poderiam ser ensaiados até a falha.

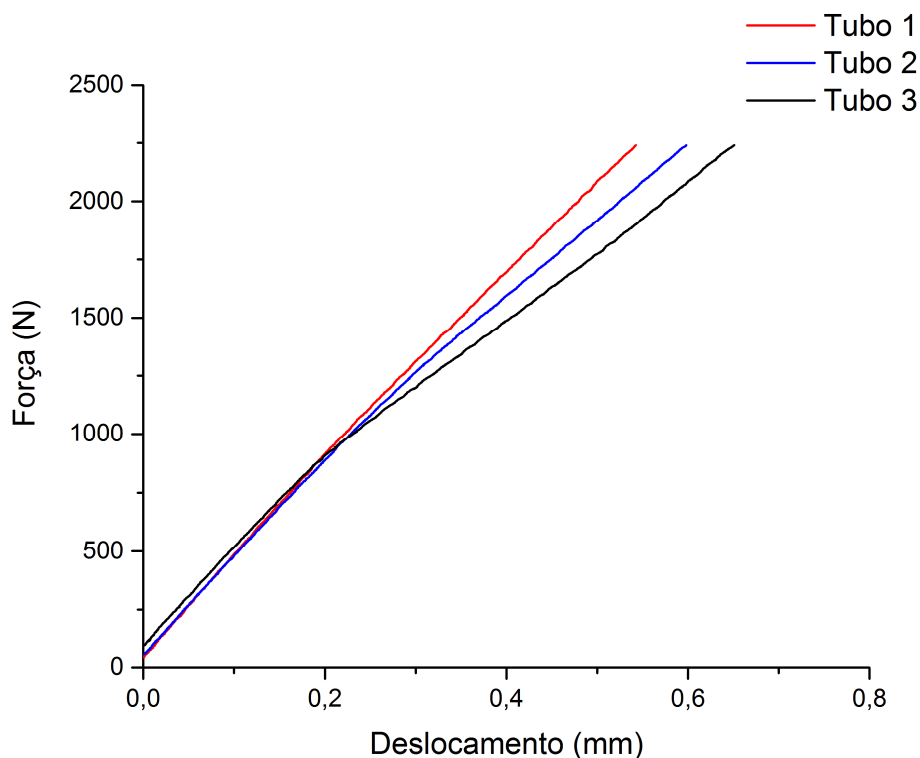
As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 mostram o comportamento dos corpos de prova das estruturas CF26, CF30 e CF40, respectivamente. As diferenças em relação às curvas em todos as curvas foram devido à acomodação dos tubos no dispositivo de ensaio. De acordo com a norma, uma carga inicial de 100N deve ser aplicada para a acomodação dos tubos, porém este carregamento não foi suficiente para alguns corpos de prova, gerando esta diferença entre as curvas. Porém, todos os tubos protéticos das estruturas CF26, CF30 e CF40 atingiram o valor de 2240N exigido pela norma NBR ISO 10328:2002. Sendo assim, estes tubos puderam ser ensaiados até a falha.



4.12 - Curva dos corpos de prova do ensaio de comprovação para a estrutura CF26.  
Fonte: Autor



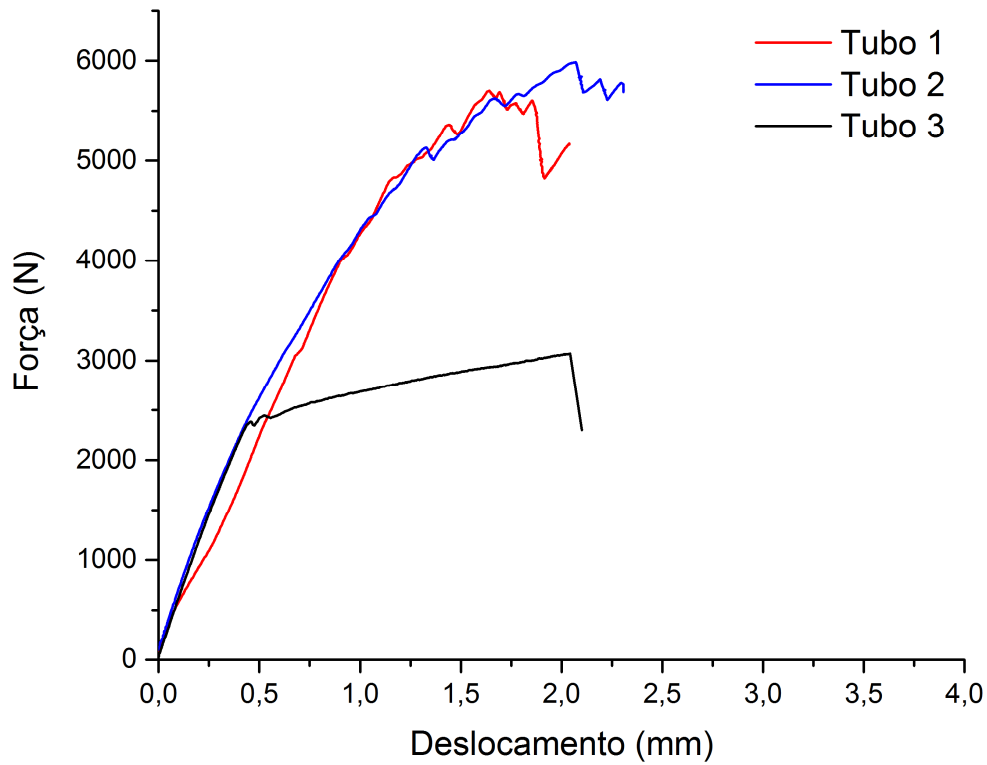
4.13 - Curva dos corpos de prova do ensaio de comprovação para a estrutura CF30.  
Fonte: Autor



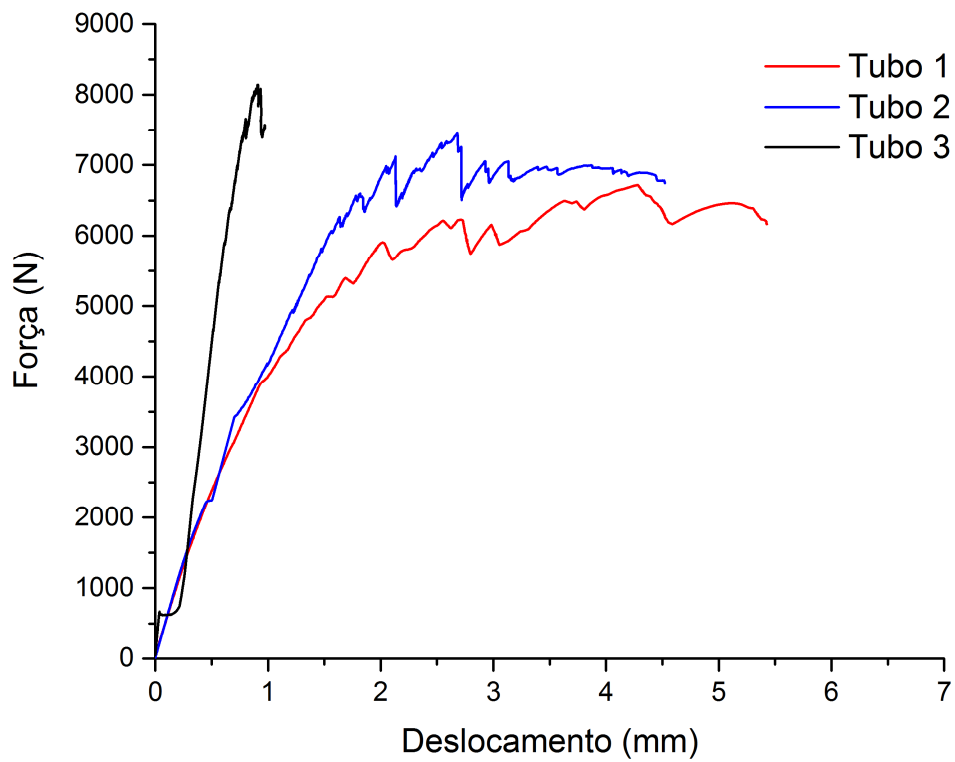
4.14 - Curva dos corpos de prova do ensaio de comprovação para a estrutura CF40.  
Fonte: Autor

Após o ensaio de comprovação, foi realizado o ensaio de falha onde os tubos deveriam resistir à carga de 4480N. As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 mostram os resultados dos ensaios de falha para as estruturas CF26, CF30 e CF40 respectivamente. Analisando o gráfico da Figura 4.15, correspondente a estrutura CF26, pode-se observar que o Tubo 3 falhou antes de atingir a carga de 4480N. O fato foi que, devido a problemas de acomodação e posicionamento no dispositivo de ensaio, o corpo de prova apresentou falha na extremidade, justamente onde deveria estar bem fixado. A Figura 4.18, evidencia a falha na extremidade do Tubo 3 estrutura CF26 possivelmente causada pela mal acomodação e posicionamento no momento do ensaio de compressão.

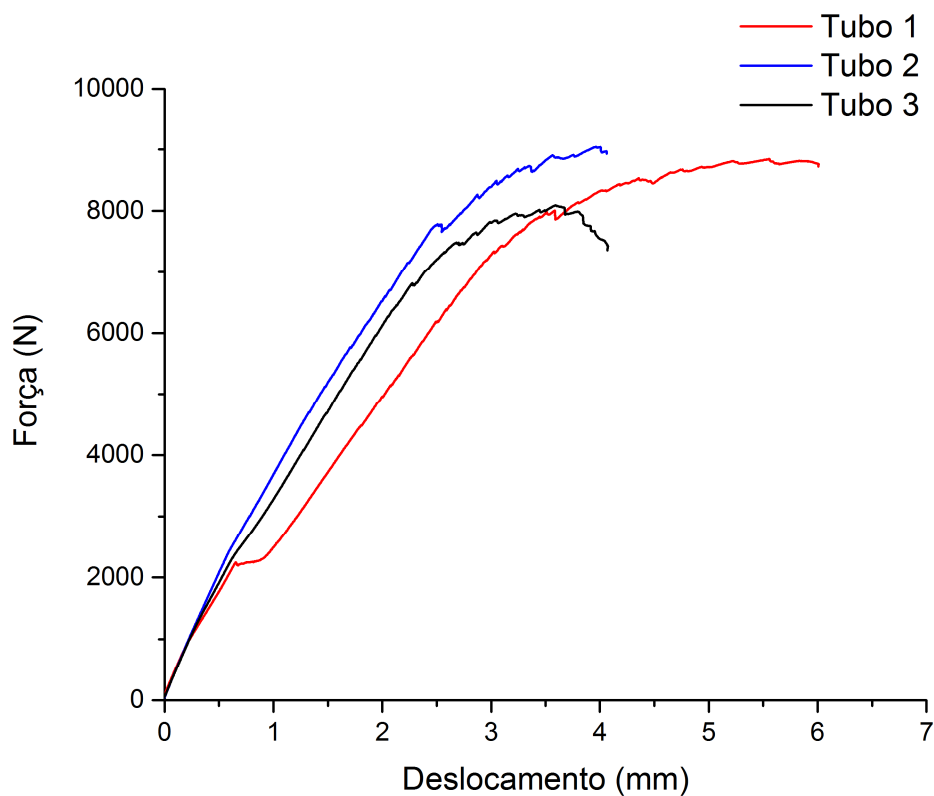
Analisando as curvas das Figuras 4.16 e 4.17, o Tubo 3 da estrutura CF30 e o Tubo 1 da estrutura CF40, apresentaram uma pequena continuidade nos valores de compressão na fase inicial de carregamento. Novamente, isto foi causado devido a acomodação dos tubos no dispositivo de ensaio. Após a fase de acomodação, as curvas mostram uma evolução nos valores de compressão até chegar à falha.



4.15 - Curva dos corpos de prova do ensaio de falha para a estrutura CF26. Fonte: Autor



4.16 - Curva dos corpos de prova do ensaio de falha para a estrutura CF30. Fonte: Autor



4.17 - Curva dos corpos de prova do ensaio de falha para a estrutura CF40. Fonte: Autor



4.18 – Análise da falha no Tubo 3 da estrutura CF26. Fonte: Autor

Assim, mesmo com alguns problemas ocorridos em alguns ensaios e descartado o Tubo 3 da estrutura CF26, todos os tubos de todas as estruturas falharam com cargas superiores aos 4480N exigidos pela norma.

### 4.3 Análises das falhas e correlação dos resultados numéricos e experimentais

A Tabela 4.5 mostra os resultados dos ensaios de falha em compressão e correlaciona os ensaios com os resultados dos volumes de fibra obtidos pelo processo de caracterização descrito no Capítulo 3 item 3.5.

4.5 - Correlação entre os resultados de compressão com os seus respectivos volumes de fibra. Fonte: Autor

<b>CF26</b>			<b>CF30</b>			<b>CF40</b>		
	<b>Falha (N)</b>	<b>Volume Fibra (%)</b>		<b>Falha (N)</b>	<b>Volume Fibra (%)</b>		<b>Falha (N)</b>	<b>Volume Fibra (%)</b>
<b>Tubo 1</b>	5360	52,4	<b>Tubo 1</b>	5400	45,2	<b>Tubo 1</b>	7900	48,3
<b>Tubo 2</b>	5000	44,5	<b>Tubo 2</b>	6200	45,5	<b>Tubo 2</b>	7800	42,1
<b>Tubo 3<sup>1</sup></b>	-	39,7	<b>Tubo 3</b>	7000	51,4	<b>Tubo 3</b>	6800	41,1
<b>Média</b>	5180	48,5	<b>Média</b>	6200	47,4	<b>Média</b>	7500	43,8
<b>Desvio Padrão</b>	255	5,6	<b>Desvio Padrão</b>	800	3,5	<b>Desvio Padrão</b>	608	3,9

1- O valor de falha foi descartado devido a problemas justificados no item 4.2.2

Analisando a Tabela 4.5, os maiores valores nos ensaios de compressão para todas as estruturas estão relacionados aos maiores valores de volume de fibra. Conforme discutido no Capítulo 3 item 3.5, o volume de fibra afeta diretamente as propriedades mecânicas dos materiais compósitos logo, isto foi evidenciado nos ensaios de compressão deste trabalho.

Ainda na Tabela 4.5, os valores médios de falha para as estruturas CF26, CF30 e CF40 foram de 5180N, 6200N e 7500N respectivamente. Em ordem decrescente de valores para resistência à compressão estão as estruturas CF40, CF30 e CF26. Esta inversão de valores em relação às estruturas sem a camada interna foi discutida neste Capítulo 4 item 4.1.2.

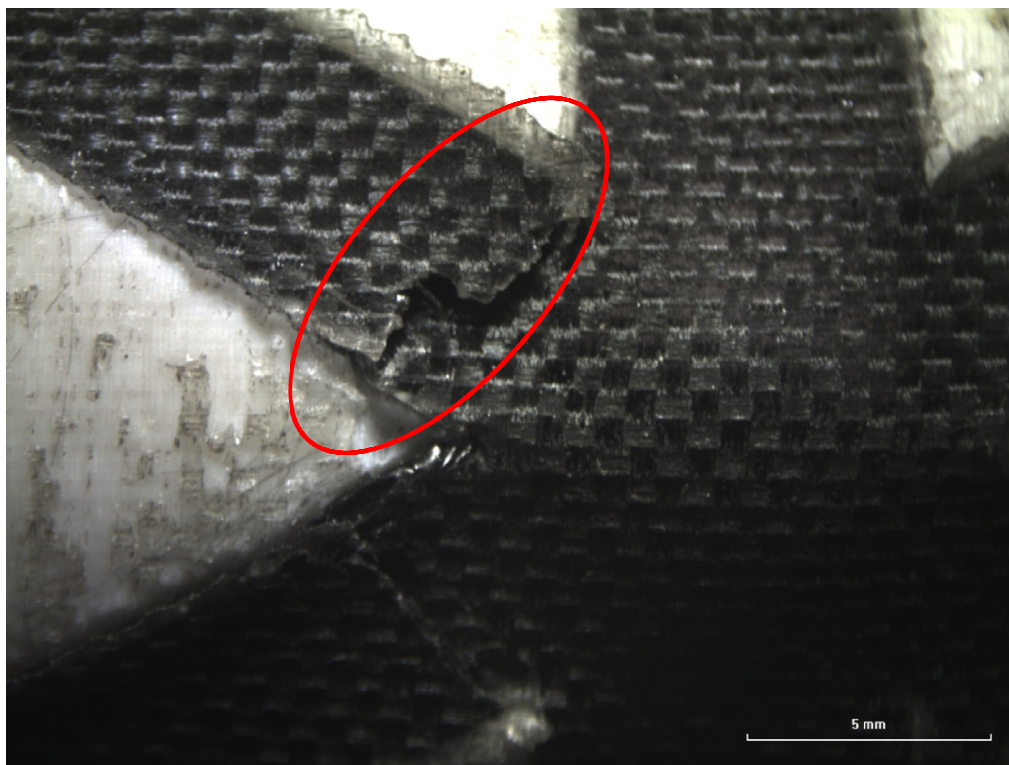
Os resultados experimentais confirmam que a tendência de inversão dos valores de resistência à compressão para as estruturas CF26, CF30 e CF40, que foi prevista pelos resultados de simulação numérica, estavam corretos. Logo, os equacionamentos matemáticos propostos por Vasiliev e Razin (2006) e de Sorrentino *et al.* (2016) não se aplicam a este caso particular de estrutura de travessas rígidas com a presença de camada interna de revestimento, ou seja, os ângulos ótimos de 26° e 30° passam a apresentar resultados inferiores que ângulos maiores como o de 40°.

Esta inversão de valores também pode ser comprovada através da eficiência estrutural (carga suportada por peso) de cada estrutura de tubos de travessas rígidas mostrada na Tabela 4.6. Analisando a Tabela 4.6, os valores médios de eficiência para as estruturas CF26, CF30 e CF40 foram de 66 kN/Kg, 76 kN/Kg e 91 kN/Kg respectivamente. Sendo assim, pode-se afirmar que o tubo de travessas rígidas com camada interna e ângulo de 40° é o mais eficiente que os de 26° e 30°.

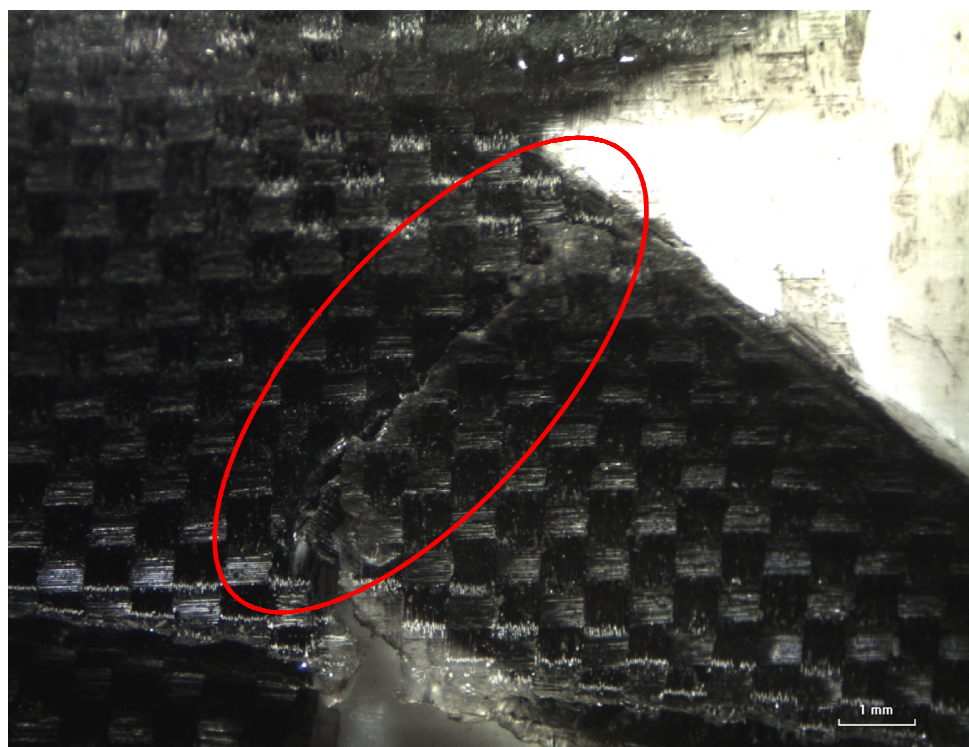
4.6 - Eficiência em resistência a compressão dos tubos de travessas rígidas propostos por este trabalho. Fonte: Autor

CF26			CF30			CF40					
Carga (N)	Massa (Kg)	Eficiência (N/Kg)	Carga (N)	Massa (Kg)	Eficiência (N/Kg)	Carga (N)	Massa (Kg)	Eficiência (N/Kg)			
<b>Tubo 1</b>	5360	0,0786	68228	<b>Tubo 1</b>	5400	0,0833	64841	<b>Tubo 1</b>	7900	0,0825	95816
<b>Tubo 2</b>	5000	0,0769	65036	<b>Tubo 2</b>	6200	0,0809	76619	<b>Tubo 2</b>	7800	0,0823	94821
<b>Tubo 3</b>	-	0,0777	-	<b>Tubo 3</b>	7000	0,0806	86806	<b>Tubo 3</b>	6800	0,0819	83008
<b>Média</b>	5180	0,0777	66632	<b>Média</b>	6200	0,0816	75968	<b>Média</b>	7500	0,0822	91215
<b>Desvio Padrão</b>	255	0,0012	2257	<b>Desvio Padrão</b>	800	0,0015	10992	<b>Desvio Padrão</b>	608	0,0003	7125

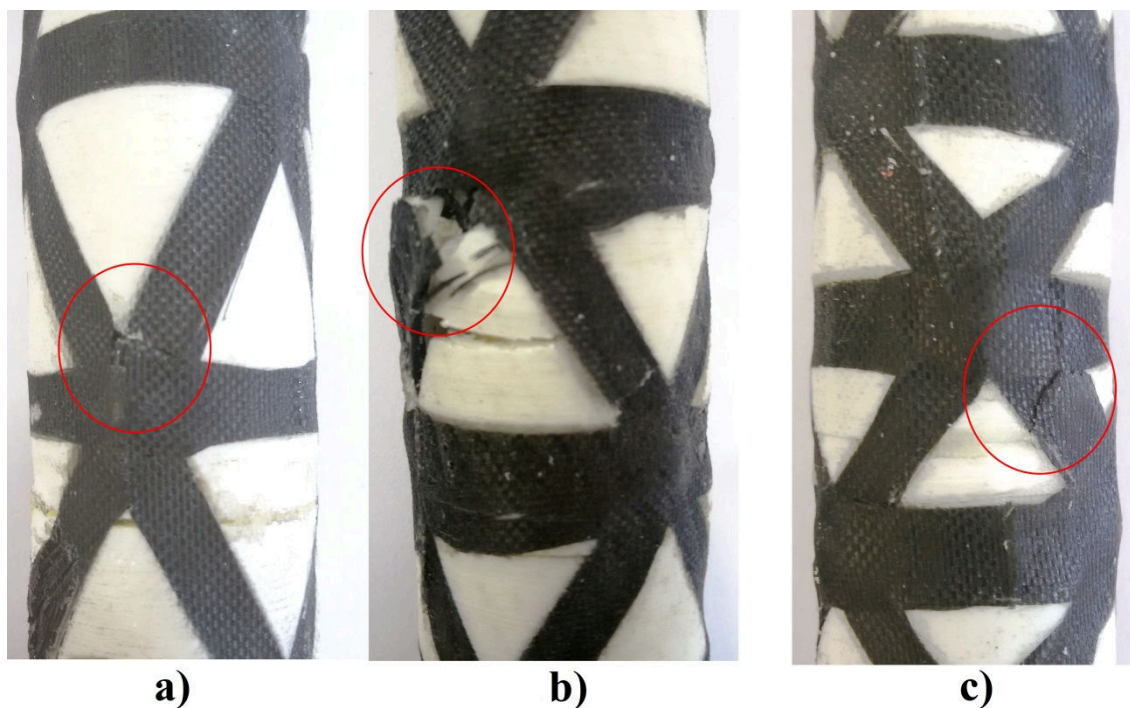
A falha característica em compressão que ocorre em todas as estruturas pode ser evidenciada pelas Figuras 4.19 e 4.20 obtidas por microscopia óptica e pela Figura 4.21 que mostra todas as estruturas.



4.19 – Análise da falha característica da estrutura CF30 por microscopia óptica. Fonte:  
Autor

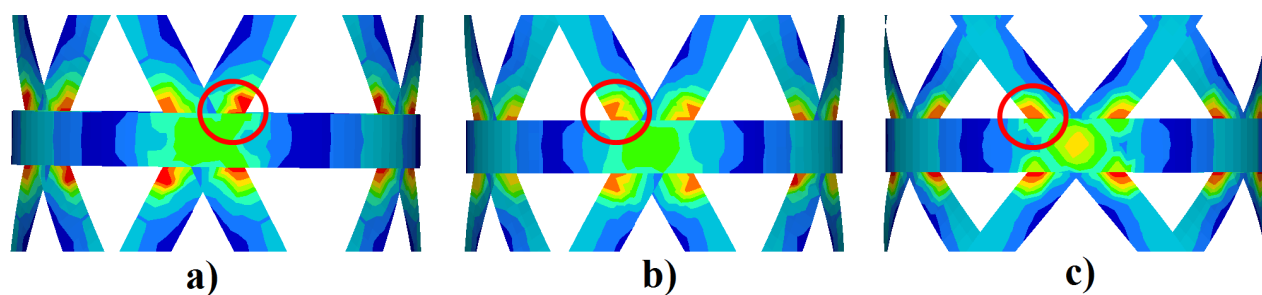


4.20 - Análise da falha característica da estrutura CF40 por microscopia óptica. Fonte:  
Autor



4.21 – Falha característica a) CF26, b) CF30 e c) CF40. Fonte: Autor

Vale ressaltar que esta falha característica das travessas rígidas helicoidais foi prevista através de simulação numérica. A Figura 4.22 ilustra o modo de falha das estruturas CF26, CF30 e CF40.



4.22 – Modo de falha das estruturas CF26, CF30 e CF40 obtidos por simulação numérica. Fonte: Autor

A Tabela 4.7 mostra a correlação dos valores médios dos resultados obtidos por simulação numérica com os experimentais. A correlação pode ser explicada pela diferença, em percentagem, entre os dados simulados e os obtidos experimentalmente.

Esta análise tem utilidade para avaliar se um projeto numérico está próximo da realidade e vice versa.

4.7 – Correlação entre os resultados experimentais e numéricos. Fonte: Autor

	CF 26			CF 30			CF 40	
	Carga (N)	Correlação (%)		Carga (N)	Correlação (%)		Carga (N)	Correlação (%)
Simulação Numérica	5100	98,5	Simulação Numérica	6000	96,8	Simulação Numérica	7000	93,3
Experimental	5180		Experimental	6200		Experimental	7500	

Analisando a Tabela 4.7, os valores de correlação entre os resultados obtidos por simulação numérica e experimental foram todos abaixo de 10%, sendo que para a estrutura CF26 foi de apenas 1,54%. Isto significa que o modelo de elementos finitos adotado para as simulações numéricas destes ensaios estão coerentes, podendo ser utilizados em projetos futuros de outras próteses com o mesmo processo de fabricação. A correlação foi realizada somente para compressão, pois os valores experimentais obtidos em torção não foram os que representam a falha. Porém, a maioria dos tubos em torção superaram os valores de 22kN.m, 31kN.m e 32kN.m das estruturas CF26, CF30 e CF40 obtidos por simulação numérica.

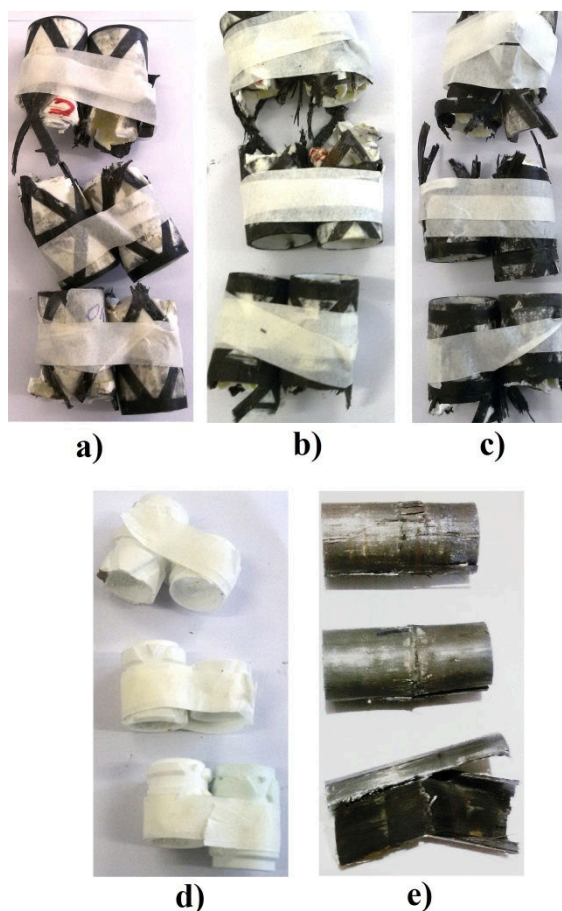
#### 4.4 Análise de impacto

Conforme discutido no Capítulo 3 item 3, com o objetivo de medir a energia de absorção de impacto dos tubos de travessas rígidas, o ensaio de impacto de Charpy foi realizado. A Tabela 4.8 mostra os resultados de absorção de energia de impacto para as estruturas CF26, CF30 e CF40, para a camada interna e para o Tubo de Fibra de carbono/resina epóxi.

4.8 - Resultado de absorção de energia de impacto. Fonte: Autor

	<b>CF26</b>	<b>CF30</b>	<b>CF40</b>	<b>Camada Interna</b>	<b>Tubo CFRP</b>
	<b>Energia (J)</b>	<b>Energia (J)</b>	<b>Energia (J)</b>	<b>Energia (J)</b>	<b>Energia (J)</b>
<b>Tubo 1</b>	58	<b>Tubo 1</b> 50	<b>Tubo 1</b> 62	<b>Tubo 1</b> 1	<b>Tubo 1</b> 56
<b>Tubo 2</b>	57	<b>Tubo 2</b> 62	<b>Tubo 2</b> 78	<b>Tubo 2</b> 1	<b>Tubo 2</b> 54
<b>Tubo 3</b>	54	<b>Tubo 3</b> 60	<b>Tubo 3</b> 76	<b>Tubo 3</b> 1	<b>Tubo 3</b> 70
<b>Média</b>	56	<b>Média</b> 57	<b>Média</b> 72	<b>Média</b> 1	<b>Média</b> 60
<b>Desvio Padrão</b>	2	<b>Desvio Padrão</b> 6	<b>Desvio Padrão</b> 9	<b>Desvio Padrão</b> 0	<b>Desvio Padrão</b> 9

Através dos resultados da Tabela 4.8 foi possível observar que as estruturas CF26 e CF30 possuem valores de absorção de energia muito próximos que o Tubo CFRP sendo que a estrutura CF40 possui 12J a mais. Assim, os tubos de travessas rígidas propostos por este trabalho possuem ótima resistência ao impacto. A Figura 4.23 ilustra todas as estruturas ensaiadas em impacto.

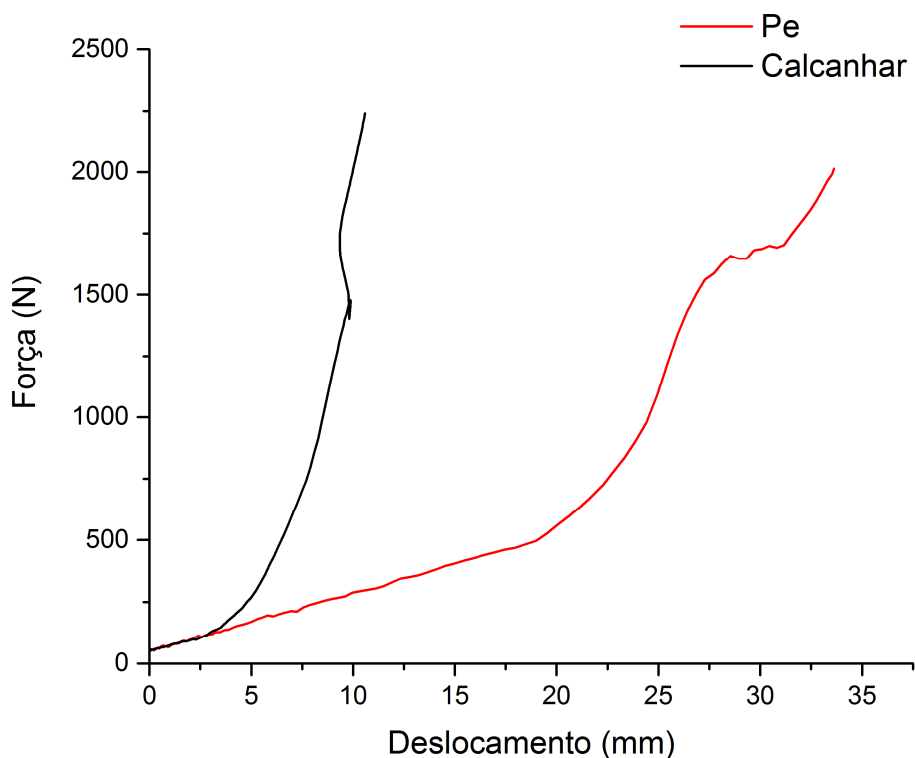


4.23 – Ensaio de impacto a) CF26, b) CF30, c) CF40, d) Camada interna e e) Tubo CFRP. Fonte: Autor

## 4.5 Análise da estrutura parcial

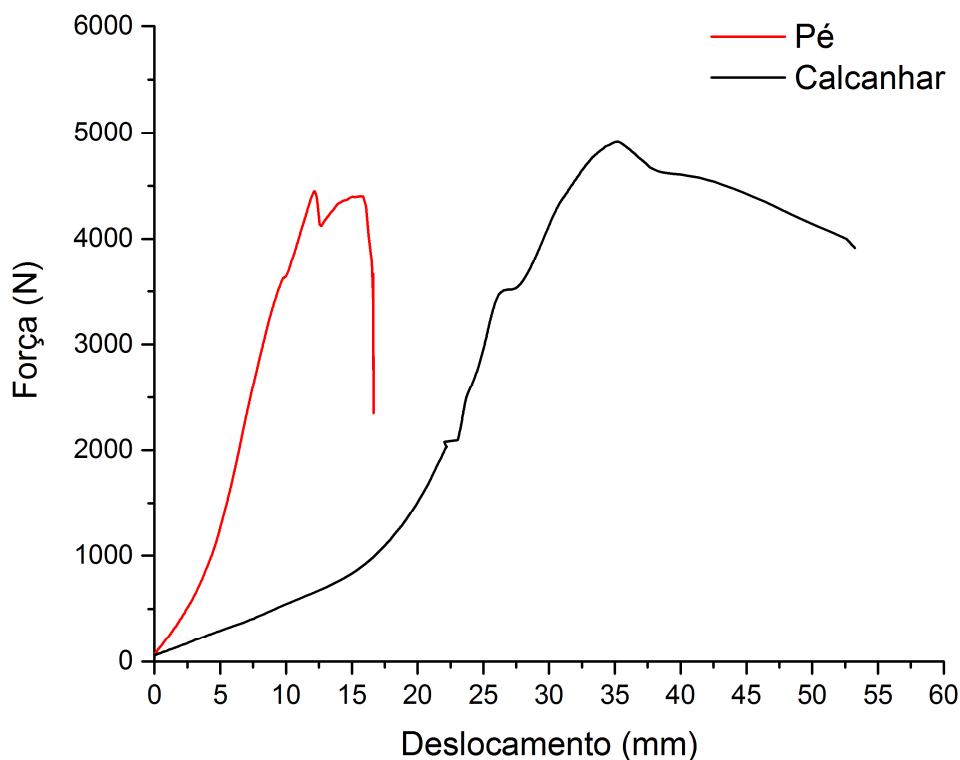
No Capítulo 3 item 3.4.4 foi discutido o método experimental para ensaio de compressão da estrutura parcial com carregamento aplicado no pé protético e no calcanhar protético. Em um primeiro momento, o ensaio da estrutura parcial para ambos os casos foi realizado somente com o tubo de estrutura CF26. Isto ocorreu devido ao tempo elevado de fabricação dos corpos de prova, sendo assim, somente a estrutura CF26 foi finalizada a tempo para o ensaio. Porém, espera-se que as estruturas CF30 e CF40 apresentem a tendência de melhores resultados que a estrutura CF26.

Os resultados do ensaio de comprovação em compressão da estrutura parcial com ponto de aplicação de carga no pé e no calcanhar protético estão ilustrados pelas curvas da Figura 4.24.



4.24 – Ensaio estático de comprovação da estrutura parcial. Fonte: Autor

Por meio das curvas da Figura 4.24 pode-se constatar que a estrutura parcial com o tubo CF26 obteve êxito no ensaio de comprovação. Os resultados do ensaio de ruptura para a estrutura parcial com ponto de aplicação de carga no pé e no calcanhar protético estão ilustrados pelo gráfico da Figura 4.25.



4.25 - Ensaio estático de ruptura da estrutura parcial. Fonte: Autor

Através da análise dos resultados do gráfico da Figura 4.25 foi possível avaliar que a estrutura parcial com o tubo CF26 foi aprovada nos requisitos da norma tendo em vista que chegou à carga de ruptura 4445N para o pé e 4794N para o calcanhar sendo que era exigido pela norma 4025N e 4480N, respectivamente.

Vale ressaltar que os carregamentos estáticos propostos pela norma NBR ISO 10328:2002 estão muito além aos valores máximos encontrados nos ossos tíbia e fibula de uma pessoa em movimento de caminhar ou correr. Em seu trabalho, D'Angeli *et al.* (2013) estudou as forças aplicadas nos ossos tíbia e fibula de uma pessoa em movimento de caminhar ou correr utilizando sensores em 20 pacientes homens e mulheres de várias idades durante 5 meses ininterruptos. Assim, concluiu que o valor do

pico máximo de força encontrado foi de 728,6N. Sendo assim, atingir os valores da norma garante a segurança do projeto.

A Figura 4.26 ilustra as falhas dos tubos nos ensaios de compressão do pé e do calcanhar, respectivamente.



4.26 - Falha dos tubos no pé e calcanhar, respectivamente. Fonte: Autor

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

No presente trabalho foi avaliada a viabilidade de um novo conceito de tubo, fabricado em material compósito, que faz uso de estrutura de travessas rígidas e camada interna estrutural para aplicação como tubo para prótese transtibial. Para tal proposta, foi utilizada a norma NBR ISO 10328:2002 que garante a viabilidade do projeto estrutural de tubos para prótese transtibial. Todas as configurações de tubos propostas por este trabalho atingiram os requisitos técnicos exigidos pela norma.

Do ponto de vista estrutural, o uso de uma camada interna em tubos de travessas rígidas se mostrou muito eficiente e bem promissora. A camada interna pode ser considerada como parte de suporte estrutural por implicar diretamente nos resultados numéricos e experimentais para estruturas de travessas rígidas tendo em vista que sua inclusão na estrutura modifica os parâmetros ótimos já propostos pela literatura.

- Em relação à projetar e analisar, pelo método dos elementos finitos, os tubos protéticos de travessas rígidas utilizando a norma NBR ISO 10328:2002 como referência:

Pode-se afirmar que é uma ótima ferramenta para a fase inicial de projeto e de análise para tubos de travessas rígidas. Foi possível modelar vários parâmetros de tubos sem que fosse necessário realizar sua fabricação gerando economia de tempo e diminuição de custos. Sendo assim, mostra-se uma ferramenta ideal para projeto e análise de tubos de travessas rígidas utilizando a norma NBR ISO 10328:2002 como referência.

- Em relação a validar as configurações estudadas através de simulação numérica pelo método dos elementos finitos e ensaios mecânicos regidos pela norma NBR ISO 10328:2002:

Os resultados mostraram que é possível validar as configurações de tubos de travessas rígidas propostas por este trabalho através de simulação numérica e ensaios mecânicos. Todas as configurações atingiram os carregamentos exigidos pela norma. A validação numérica foi de suma importância como fase que antecede a fabricação de tubos de travessas rígidas, pois todo projeto pode ser feito numericamente (em computador) e depois dos parâmetros validados é possível realizar a fabricação e os ensaios mecânicos.

- Com relação a comparar os tipos de configurações de estruturas de travessas rígidas propostas por esse trabalho analisando sua viabilidade em aplicação como tubo protético:

Os resultados mostraram que todas as estruturas de travessas rígidas propostas por este trabalho possuem viabilidade para serem utilizadas como tubo para próteses transtibiais. A estrutura CF40 apresentou os melhores resultados e é a mais indicada para ser utilizada como tubo protético. As estruturas CF26 e CF30 também podem ser utilizadas como tubo protético, pois atingiram os requisitos da norma, porém são menos eficientes.

- Em relação a verificar a correlação entre os resultados numéricos e experimentais das configurações propostas.

Os resultados mostraram que a correlação entre os resultados numéricos e experimentais foram excelentes. Levando em consideração todas as correlações das estruturas propostas por este trabalho, todas ficaram entre 98,5% e 93,3%. Isso mostra que é muito confiável a realização do projeto inicial e validação por simulação numérica de tubos de travessas rígidas com camada interna. Isto é muito importante do ponto de vista de redução de custos, pois é possível realizar todo o projeto e validação sem a necessidade de fabricar várias estruturas e fazer vários ensaios mecânicos.

- Analisar o processo de fabricação do tubo para prótese de membro inferior do ponto de vista industrial.

Em um primeiro momento, a fabricação de tubos de travessas rígidas com camada interna mostra-se inviável do ponto de vista industrial, pois o enrolamento da fibra manualmente, a fabricação da camada através de impressão 3D e a infusão de resina por VARTM acarretam em um lento processo de fabricação. Este processo de fabricação foi utilizado para testar o conceito da estrutura que utiliza as estruturas de travessas rígidas e camada interna. Os resultados mostraram que o conceito foi aprovado com sucesso, podendo ser utilizado como tubo protético. Sendo assim, uma forma para agilizar a manufatura e aumentar a produtividade seria implementar o enrolamento das fibras em uma máquina de *filament winding* e fazer um ferramental para injeção de polímero para a fabricação em escala das camadas internas. Assim o processo iria possuir agilidade e poderia entrar em escala de produção industrial.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Obter um equacionamento matemático para o projeto de estruturas de travessas rígidas com camada interna, pois as equações presentes na literatura somente possuem validade para o uso das travessas rígidas sem a camada interna.
- Realizar os ensaios de compressão da estrutura parcial com os tubos CF30 e CF40.
- Realizar os ensaios de fadiga nas estruturas CF26, CF30 e CF40.
- Avaliar o uso de outros tipos de materiais poliméricos para aplicação na camada interna.
- Avaliar o uso de uma camada externa de revestimento em conjunto com as travessas rígidas.
- Avaliar a utilização de outros tipos de fibras e matrizes para o compósito que formam as travessas rígidas helicoidais e circulares.
- Avaliar os danos pelo método de emissão acústica.
- Realizar uma otimização estrutural das travessas rígidas e da camada interna.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, “NBR ISO 10328: **Próteses - Ensaio estrutural para próteses de membro inferior,**” 2002.

ANCELOTTI JUNIOR, A. C. **Efeitos da porosidade na resistência ao cisalhamento e nas propriedades dinâmicas de compósitos de fibra de carbono/resina epoxi.** [s.l.] Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2006.

ATAFF, B. Ecodesign Criteria for Composite Materials and Products. **Journal of Fundamental and Applied Sciences**, v. 5, n. 1, p. 68–80, 2013.

BENHAMOU, R. The artificial limb in preindustrial France. **Technology and Culture**, v. 35, n. 4, p. 835–845, 1994.

BERGE, J. S.; KLUTE, G. K.; CZERNIECKI, J. M. Mechanical properties of shock-absorbing pylons used in transtibial prostheses. **J Biomech Eng**, v. 126, n. 1, p. 120–122, 2004.

BLIQUEZ, L. V. Classical Prosthetics. **Archaeological Institute of America**, v. 36, n. 5, p. 25–29, 1983.

BOCOLINI, F. **Reabilitação: Amputados, Amputações, Próteses.** 2ª Edição, Ed.: Guanabara, São Paulo, 2000.

BUNAKOV, V. A.; VASILIEV, V. V. **Design of axially compressed composite cylindrical shells with lattice stiffeners - Optimal structural design.** Technomic Publishing Co. 1999.

CAGLE, J. C. *et al.* A finite element model to assess transtibial prosthetic sockets with elastomeric liners. **Medical & Biological Engineering & Computing**, p. 1–14, 2017.

CANTRELL, J. T. *et al.* Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts. **Rapid Prototyping Journal**, v. 23, n. 4, p. 811–824, 2017.

CARVALHO, J. A. **Amputação de membros inferiores: Em busca da plena**

**reabilitação**. Manole, São Paulo, Brasil, 1999.

CARROLL, K.; SABOLICH, S. "Below-Knee Prosthetics. Is It Time For An Upgrade?", **INMotion Magazine**, vol 9(4), 1 p., 1999.

COLEMAN, K. L. *et al.* Effect of trans-tibial prosthesis pylon flexibility on ground reaction forces during gait. **Prosthetics and Orthotics International**, v. 25, n. 3, p. 195–201, 2001.

DAWOOD, S. D. S.; INAYATULLAH, O. B.; SAMIN, R. B. Computational study of the effect of using open isogrids on the natural frequencies of a small satellite structure. **Acta Astronautica**, v. 106, p. 120–138, 2015.

FAN, H. *et al.* Manufacturing and testing of a CFRC sandwich cylinder with Kagome cores. **Composites Science and Technology**, v. 69, n. 15–16, p. 2695–2700, 2009.

FEY, N. P.; KLUTE, G. K.; NEPTUNE, R. R. The influence of energy storage and return foot stiffness on walking mechanics and muscle activity in below-knee amputees. **Clinical Biomechanics**, v. 26, n. 10, p. 1025–1032, 2011.

GIEST, T. N.; CHANG, Y. H. Biomechanics of the human walk-to-run gait transition in persons with unilateral transtibial amputation. **Journal of Biomechanics**, v. 49, n. 9, p. 1757–1764, 2016.

HANSEN, A. H.; CHILDRESS, D. S.; KNOX, E. H. Prosthetic foot roll-over shapes with implications for alignment of trans-tibial prostheses. **Prosthetics and Orthotics International**, v. 24, n. 3, p. 205–215, 2000.

HUYBRECHTS, S. M.; HAHN, S. E.; MEINK, T. E. Grid Stiffened Structures: A Survey of Fabrication, Analysis and Design Methods. **12 ICCM Proceedings**. 1999.

HUYBRECHTS, S. M. *et al.* Manufacturing theory for advanced grid stiffened structures. **Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 33, n. 2, p. 155–161, 2002.

JIA, X. *et al.* A quasi-dynamic nonlinear finite element model to investigate prosthetic interface stresses during walking for trans-tibial amputees. **Clinical Biomechanics**, v. 20, n. 6, p. 630–635, 2005.

JUNQUEIRA, D. M. *et al.* **Tubo para Prótese de Membro Inferior Utilizando Travessas Rígidas - Uma Análise Numérica.** 7 Congresso Brasileiro de Carbono. Campos do Jordão, Brazil: 2017

JUNQUEIRA, D. M.; SILVEIRA, M. E.; ANCELOTTI JUNIOR, A. C. Analysis of spot weld distribution in a weldment — numerical simulation and topology optimization. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 1, p. 1–9, 2018.

KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials.** Second Edition, p.473, 2006.

KE, M.-J. *et al.* Influence of Three Different Curvatures Flex-Foot Prosthesis While Single-Leg Standing or Running: a Finite Element Analysis Study. **Journal of Mechanics in Medicine and Biology**, v. 17, n. 3, p. 1750055, 2017.

KOBAYASHI, T. *et al.* Effect of alignment changes on sagittal and coronal socket reaction moment interactions in transtibial prostheses. **Journal of Biomechanics**, v. 46, n. 7, p. 1343–1350, 2013.

KOBAYASHI, T. *et al.* Effect of prosthetic alignment changes on socket reaction moment impulse during walking in transtibial amputees. **Journal of Biomechanics**, v. 47, n. 6, p. 1315–1323, 2014.

LEBRÃO, G. W. **Viabilidade De Fabricação De Tubo Para Prótese De Membro Inferior Em Compósito Híbrido Epóxi Carbono-Vidro.** [s.l.], Unversidade de São Paulo, 2007.

LEDERMAN, M. *et al.* Biocompatibility of composites- literature review. **Refuat Hapeh Vehashinayim**, v. 32, n. 9, p. 21–60, 2015.

LEE, W. C. C.; ZHANG, M. Fatigue test of low-cost flexible-shank monolimb transtibial prosthesis. **Prosthetics and Orthotics International**, v. 30, n. 3, p. 305–315, 2006.

LENKA, P. K.; CHOUDHURY, A. R. Analysis of trans tibial prosthetic socket materials using finite element method. **Journal of Biomedical Science and Engineering**, v. 4, n. 12, p. 762–768, 2011.

MADHAVI, M.; RAO, K. V. J.; RAO, K. N. Design and analysis of filament wound

composite pressure vessel with integrated-end domes. **Defence Science Journal**, v. 59, n. 1, p. 73–81, 2009.

MARTINS, A. T. D. **Projeto e Fabricação de Tubos Compósitos em Fibras de Carbono/Epóxi para Próteses Transtibiais por Moldagem com Bladder**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2015.

MEYER, R. R. *et al.* **NASA - Isogrid design handbook**. USA, 1973.

NOLAN, L. Carbon fibre prostheses and running in amputees: A review. **Foot and Ankle Surgery**, v. 14, n. 3, p. 125–129, 2008.

NORTON, K. A brief History of Prosthetics. **InMotion**, v. 17, n. 7, p. 1–3, 2007.

PARDINI, L. C. Preformas para compósitos estruturais. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 100–109, 2000.

PHILLIPS, V. L. **Composite Prosthetic Foot and Leg** USA, 1983.

RAMAKRISHNA, S. *et al.* Biomedical applications of polymer-composite materials : A review. **Composites Science and Technology**, v. 61, p. 1189–1224, 2001.

ROTHSCHILD, V. *et al.* Clinical experience with total Thermoplastic lower limb prostheses. **Journal of Prosthetics and Orthotics**, v. 3, n. 1, p. 51–54, 1990.

SAM, M. *et al.* The “Shape & Roll” Prosthetic Foot: I. Design and Development of Appropriate Technology for Low-Income Countries. **Medicine, Conflict and Survival**, v. 20, n. 4, p. 294–306, 2004.

SCHOLZ, M. S. *et al.* The use of composite materials in modern orthopaedic medicine and prosthetic devices: A review. **Composites Science and Technology**, v. 71, n. 16, p. 1791–1803, 2011.

SCHWARZE, M. *et al.* Loads on the prosthesis-socket interface of above-knee amputees during normal gait: Validation of a multi-body simulation. **Journal of Biomechanics**, v. 46, n. 6, p. 1201–1206, 2013.

SHASMIN, H. N.; ABU OSMAN, N. A.; ABD LATIF, L. Economical tube adapter material in below knee prosthesis. **IFMBE Proceedings**, v. 21 IFMBE, n. 1, p. 407–409, 2008.

SHASMIN, N. *et al.* A new pylon materials in transtibial prosthesis: A preliminary study. **Journal of Biomechanics**, v. 40, n. July, p. S297, 2007.

SILVEIRA, M. E.; FANCELLO, E. A. O uso de otimização numérica no projeto de blanks soldados. **Ciencia y Engenharia/ Science and Engineering Journal**, v. 24, n. 1, p. 9–19, 2015.

SILVERMAN, A. K.; NEPTUNE, R. R. Muscle and prosthesis contributions to amputee walking mechanics: A modeling study. **Journal of Biomechanics**, v. 45, n. 13, p. 2271–2278, 2012.

SINITSKI, E. H.; HANSEN, A. H.; WILKEN, J. M. Biomechanics of the ankle-foot system during stair ambulation: Implications for design of advanced ankle-foot prostheses. **Journal of Biomechanics**, v. 45, n. 3, p. 588–594, 2012.

SORRENTINO, L. *et al.* Design and manufacturing of an isogrid structure in composite material: Numerical and experimental results. **Composite Structures**, v. 143, p. 189–201, 2016.

STRONG, A. B. **Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications**. p. 683, Second Edition, 2008.

TOTARO, G. Local buckling modelling of isogrid and anisogrid lattice cylindrical shells with triangular cells. **Composite Structures**, v. 94, p. 446–452, 2012.

TOTARO, G.; DE NICOLA, F.; CARAMUTA, P. Local buckling modelling of anisogrid lattice structures with hexagonal cells: An experimental verification. **Composite Structures**, v. 106, p. 734–741, 2013.

TOTARO, G.; VASILIEV, V. V.; DE NICOLA, F. **Optimized design of isogrid and anisogrid lattice structures**. Proceedings of the 55th international astronautical congress. Vancouver, Canada: 2004

TSAI, S. W.; WU, E. M. A General Theory of Strength for Anisotropic Materials. **Journal of Composite Materials**, v. 5, n. 1, p. 58–80, 1971.

VALENTI, T. Experience with Endoflex: A Monolithic Thermoplastic for Below-Knee Amputees. **Journal of Prosthetics and Orthotics**, v. 3, n. 1, p. 43–50, 1990.

VASILIEV, V. V.; BARYNIN, V. A.; RASIN, A. F. Anisogrid lattice structures – survey of development and application. **Composite Structures**, v. 54, n. 2–3, p. 361–370, 2001.

VASILIEV, V. V.; RAZIN, A. F. **Optimal design of filament-wound anisogrid composite lattice structures**. Proceedings of the 16th annual technical conference of American society for composites. Blacksburg USA: 2001

VASILIEV, V. V.; BARYNIN, V. A.; RAZIN, A. F. Anisogrid composite lattice structures - Development and aerospace applications. **Composite Structures**, v. 94, n. 3, p. 1117–1127, 2012.

VASILIEV, V. V.; RAZIN, A. F. Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications. **Composite Structures**, v. 76, n. 1–2, p. 182–189, 2006.

VILAGRA, J.; SGANZERLA, C.; WALCKER, L. Próteses transtibiais: itens de conforto e segurança. **Revista Thema et Scientia**, v. 1, n. 2, p. 107–112, 2011.

WILSON, M. **Composite Pylon for a prosthetic device**. **United States Patent Application Publication**, 2015.

WINTER, D. A.; SIENKO, S. E. Biomechanics of below-knee amputee gait. **Journal of Biomechanics**, v. 21, n. 5, p. 361–367, 1988.

ZHANG, M. *et al.* Clinical investigation of the pressure and shear stress on the trans-tibial stump with a prosthesis. **Medical engineering & physics**, v. 20, n. 3, p. 188–198, 1998.

ZHENG, Q. *et al.* Analysis of failure loads and optimal design of composite lattice cylinder under axial compression. **Composite Structures**, v. 131, p. 885–894, 2015.

ZHU, L. **Damage Resistance of Aircraft Wing Structure Using Low Cost Carbon Fibre Composite Materials**. [s.l.] Cranfield University, 2010.