



**Universidade
Federal de Itajubá**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Otimização de Um Tubo Para Prótese de
Membro Inferior de Estruturas de Travessas
Rígidas**

Autor:

Matheus Brendon Francisco

**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Itajubá, Fevereiro de 2020

Minas Gerais - Brasil

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Otimização de Um Tubo Para Prótese de Membro Inferior de Estruturas de Travessas Rígidas

Autor: **Matheus Brendon Francisco**

Orientador: **Guilherme Ferreira Gomes**

Co-orientador: **Sebastião Simões da Cunha Jr.**

Curso: **Mestrado em Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: **Projeto, Materiais e Processos**

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

Itajubá, Fevereiro de 2020

Minas Gerais - Brasil

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Otimização de Um Tubo Para Prótese de Membro Inferior de Estruturas de Travessas Rígidas

Autor:

Matheus Brendon Francisco

Banca Examinadora:

Dr. Ricardo Mello Di Benedetto - UNESP

Prof. Dr. Bruno Silva de Souza - IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Sebastião Simões da Cunha Jr. - IEM/UNIFEI (Co-orientador)

Prof. Dr. Guilherme Ferreira Gomes - IEM/UNIFEI (Orientador)

Dedicatória

*A Deus, acima de todas as coisas e
aos meus pais, Teresinha e Nelson,
que fizeram com que eu chegasse até aqui ...*

Agradecimentos

Nesta simples página é o momento em que quebramos formalidades e ficamos livres para dar reconhecimento a todos aqueles que o merecem.

Primeiramente dedico este trabalho e agradeço aos meus pais e às minhas irmãs por todo amor incondicional, carinho, dedicação e suporte que me deram durante toda minha jornada. Sem eles, seria impossível que estivesse chegado até este ponto em minha vida. A minha namorada Brenda, por me incentivar, apoiar e me encorajar a cada dia. Você é a pessoa que renova minhas energias, fazendo meu mundo muito melhor.

Agradeço meu orientador, Prof. Dr. Guilherme Ferreira Gomes, por de fato me orientar sempre para o melhor caminho a seguir, sendo um espelho para mim e um exemplo de profissional. Ao Prof. Dr. Sebastião Simões da Cunha Jr., meu co-orientador, que sempre esteve disponível e de prontidão a me ajudar no que fosse preciso.

Aos amigos do Grupo de Pesquisa em Mecânica Computacional e Otimização (GEMEC) pela amizade e diversas discussões proveitosas que contribuíram para a evolução deste trabalho. Vocês tiveram papel fundamental em meu crescimento profissional.

Muita dedicação, esforço, finais de semana e noites de trabalho foram necessários para que este trabalho chegasse ao seu fim. Apesar de toda dificuldade enfrentada para que a defesa da dissertação fosse realizada, um aprendizado muito importante foi sentido na prática, de que ao final de tudo, o bem sempre prevalece.

À Capes pelo apoio financeiro.

A todos estes, e aqueles que não pude citar em apenas uma página, meus sinceros agradecimentos.

Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado.

Roberto Shinyashiki

Resumo

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 aço 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 otimizar um novo conceito de tubo, fabricado em material compósito, que faz uso de estrutura de travessas rígidas e camada interna de suporte estrutural. Para o desenvolvimento do trabalho, foi utilizado uma técnica de Superfície de Resposta (RSM), sendo esta, utilizada para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletados durante um determinado experimento, buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo. Após a análise inicial da RSM, foi utilizado o método de elementos finitos para os cálculos estruturais e validação do tubo para cada condição do experimento gerado pela RSM, sendo que para validar o tubo são necessárias análises de compressão e torção. Com os resultados obtidos, foi possível encontrar equações que regem o problema. Posteriormente, obtendo as equações do meta-modelo, foi possível otimizar os parâmetros das equações que traduzem as respostas estruturais do tubo de travessas rígidas por meio do algoritmo de enxame de partículas (PSO) e do algoritmo genético (GA). Estas configurações ótimas foram analisadas computacionalmente e verificadas que são viáveis para utilização. Partindo de um modelo existente e otimizando a configuração para o melhor coeficiente de Tsai-Wu, quando a estrutura está submetida a compressão, conseguiu-se diminuí-lo aproximadamente 83%. Já otimizando a massa, foi possível diminuí-la em 14% e ter um coeficiente de Tsai-Wu 22% menor. Na otimização multi-objetivo, reduziu-se o Tsai-Wu de compressão em 63%. Sendo assim, o objetivo de se obter uma configuração ótima para um novo conceito de tubo para próteses de membros inferiores foi alcançado.

Palavras-chave: Tubo Protético, *Isogrid*, Superfície de Resposta, Enxame de Partículas, Elementos Finitos.

Abstract

Prosthetic tubes are generally tubular structures without joints or moving parts. In lower limb amputations replaces 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 composite. Therefore, the main objective of this work is to optimize a new tube concept, made of composite material, which makes use of lattice structure and internal layer. For the development of the work, a Response Surface Methodology (RSM) technique was used to define in what quantity, under what conditions and which data should be collected during a given experiment, seeking to satisfy two objectives: the highest possible statistical precision in the response and the lowest cost. After the initial RSM analysis, finite element method was used for the structural calculations and tube validation for each condition of the experiment generated by RSM. With the results obtained, it was possible to find equations that governs the problem. Later, by obtaining as meta-model equations, it was possible to optimize the parameters of the equations that were translated as responses applied to a lattice structure tube by the particle swarm algorithm (PSO) and genetic algorithm (GA). These optimal configurations have been computationally analyzed and found to be viable for use. By optimizing the Tsai Wu coefficient, when the structure is subjected to compression, it was able to decrease it approximately 83 %. Optimizing the mass, it was possible to decrease it by 14 % and have a lower Tsai Wu coefficient 22 %. In multi-objective optimization, the compression Tsai Wu was reduced by 63 %. Therefore, the objective of obtaining an optimal configuration for a new concept of tube for prosthesis of lower limbs was reached.

Keywords: Pylon, Isogrid, Response Surface, Particle Swarm, Finite Elements.

Sumário

Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	vii
Lista de Símbolos	ix
Lista de Abreviaturas	xi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos e Escopo do Trabalho	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
1.4 Estado da Arte	3
2 Materiais Compósitos	8
2.1 Generalidades	8
2.2 Próteses	10
2.2.1 Próteses biomecânicas	10
2.2.2 Tubo protético	12
2.2.3 Estrutura de travessas rígidas	14
3 Otimização	18
3.1 Generalidades	18
3.1.1 Definição matemática do problema de otimização	19
3.2 Otimização por Enxame de Partículas	22
3.2.1 Estrutura do enxame de partículas padrão	25
3.2.2 Modificações do algoritmo PSO	27
3.3 Otimização por Algoritmo Genético	30
3.3.1 Operadores genéticos	30
3.3.2 Definições básicas	32
3.3.3 Um algoritmo genético simples	32
3.3.4 Parâmetros do algoritmo genético	33
3.3.5 Algoritmo genético via MATLAB	34

3.3.6	Tratamento das restrições	34
3.4	Planejamento de Experimentos	35
3.4.1	Fatores	36
3.4.2	Níveis	36
3.4.3	Respostas	36
3.4.4	Efeitos	37
3.4.5	Interação	37
3.4.6	Características gerais do DOE	37
3.4.7	Metodologia de superfície de resposta	39
4	Metodologia	44
4.1	Materiais	44
4.2	Projeto dos Tubos de Travessas Rígidas e Camada Interna	45
4.3	Seleção das Configurações das Estruturas de Travessas Rígidas	46
4.4	Modelagem da Estrutura	48
4.5	Planejamento Experimental	52
4.5.1	Definição dos objetivos do experimento.	53
4.5.2	Definição dos fatores do experimento.	53
4.5.3	Seleção dos níveis dos fatores de controle	54
4.5.4	Seleção das variáveis de resposta	54
4.5.5	Seleção da matriz experimental	54
5	Resultados e Discussão	58
5.1	Validação do Modelo Numérico	58
5.1.1	Análise de compressão	60
5.1.2	Análise de flambagem em compressão	70
5.1.3	Análise de torção	73
5.1.4	Análise de flambagem em torção	81
5.1.5	Análise modal	84
5.1.6	Comparação dos resultados	87
5.2	Planejamento de Experimentos	88
5.2.1	Análise para o <i>isogrid</i> com reforço interno	90
5.2.2	Análise para o <i>isogrid</i> sem reforço interno	99
5.3	Otimização do Tubo Protético	108
6	Conclusões	115
6.1	Conclusões	115
6.2	Recomendações Para Trabalhos Futuros	117

Referências Bibliográficas

118

Lista de Figuras

2.1	Tipos de reforços dos materiais compósitos. Fonte: Adaptado de Kaw (2005)	8
2.2	Matriz reforçada com fibras contínuas e descontínuas. Fonte: Adaptado de Senkov e Miracle (2001)	9
2.3	Empilhamento das camadas de um material compósito laminado. Fonte: Mendonça (2005)	10
2.4	Perna protética proposta por Ambroise Paré e Le Petit Lorrain. Fonte: Benhamou (1994)	11
2.5	Próteses de corrida: (A) Cheetah, (B) flex-sprint, (C) flex-run, (D) sprinter e (E) C-sprint. Fonte: Nolan (2008)	12
2.6	Prótese modular para amputações de membros inferiores: a) Tubo protético, b) Suporte, c) Pé protético. Fonte: Junqueira <i>et al.</i> (2019)	13
2.7	Estrutura de travessas rígidas. Fonte: Adaptado de Sorrentino <i>et al.</i> (2016)	15
2.8	Veículo espacial Proton-M. Fonte: Vasiliev <i>et al.</i> (2001)	16
3.1	Componentes de um problema de otimização. Fonte: Adaptado de Mirjalili (2016)	19
3.2	Exemplo de um espaço de busca com duas variáveis e várias restrições. Fonte: Adaptado de Mirjalili (2016)	22
3.3	Regras encontradas na natureza que compõe a inteligência de enxame. Fonte: Adaptado de Eberhart e Kennedy (1995)	23
3.4	Simulação de movimento utilizando as regras de Reynolds (1987). Fonte: Adaptado de Eberhart e Kennedy (1995)	24
3.5	Fluxograma do algoritmo de PSO. Fonte: Adaptado de Jiao <i>et al.</i> (2008).	26
3.6	Operadores genéticos. Fonte: Lopes (2010).	30
3.7	Fluxograma do GA. Fonte: Lopes (2010).	33
3.8	Modelo geral de um processo. Fonte: Adaptado de (Montgomery <i>et al.</i> , 2000)	38
3.9	Superfície de resposta tridimensional não plana. Fonte: (Comparini <i>et al.</i> , 2012)	41
3.10	Arranjo CCD com três variáveis Fonte: (Montgomery, 2017)	43
4.1	Representação da estrutura com ângulo das travessas helicoidais igual a a) 26°, b) 30° e c) 40°. Fonte: Junqueira <i>et al.</i> (2019)	48

4.2	Geometria do elemento utilizado neste trabalho. Fonte: Mandal e Ray (2015)	49
4.3	Direção das fibras. Fonte: Autor.	49
4.4	Camada interna da estrutura. Fonte: Autor.	50
4.5	Parâmetros geométricos de estrutura de travessas rígidas. Fonte: Adaptado de Vasiliev e Razin (2006)	53
5.1	Análise de falha pelo critério de Tsai-Wu feita por Junqueira <i>et al.</i> (2019). Fonte: Junqueira <i>et al.</i> (2019)	59
5.2	Região de falha da estrutura após o ensaio de compressão. Fonte: Junqueira <i>et al.</i> (2019)	60
5.3	Resultados numéricos obtidos pela análise de compressão do <i>isogrid</i> sem a presença de reforço interno. Fonte: Autor.	61
5.4	Variação do Tsai-Wu ao longo das travessas circulares do <i>isogrid</i> sem reforço interno sob esforços de compressão. Fonte: Autor.	63
5.5	Variação do Tsai-Wu ao longo das travessas helicoidais do <i>isogrid</i> sem reforço interno sob esforços de compressão. Fonte: Autor.	64
5.6	Resultados numéricos obtidos pela análise de compressão do <i>isogrid</i> com reforço interno. Fonte: Autor.	65
5.7	Variação do Tsai-Wu ao longo das travessas circulares do <i>isogrid</i> com reforço interno sob esforços de compressão. Fonte: Autor.	67
5.8	Variação do Tsai-Wu ao longo das travessas helicoidais do <i>isogrid</i> com reforço interno sob esforços de compressão. Fonte: Autor.	68
5.9	Análise de Von Mises aplicado ao reforço interno sob esforços de compressão (Pa). Fonte: Autor.	69
5.10	Análise pelo critério de falha de Tsai-Wu utilizando a carga máxima de compressão encontrada por Junqueira <i>et al.</i> (2019). Fonte: Autor.	70
5.11	Modos de flambagem do <i>isogrid</i> sem reforço interno sob esforços de compressão. Fonte: Autor.	71
5.12	Modos de flambagem do <i>isogrid</i> com reforço interno sob esforços de compressão. Fonte: Autor.	72
5.13	Resultados numéricos obtidos pela análise do <i>isogrid</i> sem reforço interno sob esforços de torção. Fonte: Autor.	73
5.14	Análise pelo critério de falha de Tsai-Wu do <i>isogrid</i> sem reforço interno sob esforços de torção. Fonte: Autor.	74
5.15	Variação do Tsai-Wu ao longo das travessas circulares do <i>isogrid</i> sem reforço interno sob esforços de torção. Fonte: Autor.	75
5.16	Variação do Tsai-Wu ao longo das travessas helicoidais do <i>isogrid</i> sem reforço interno sob esforços de torção. Fonte: Autor.	76
5.17	Resultados numéricos obtidos pela análise de torção do <i>isogrid</i> com reforço interno sob esforços de torção. Fonte: Autor.	77
5.18	Variação do Tsai-Wu ao longo das travessas circulares do <i>isogrid</i> com reforço interno sob esforços de torção. Fonte: Autor.	79

5.19	Variação do Tsai-Wu ao longo das travessas helicoidais do <i>isogrid</i> com reforço interno sob esforços de torção. Fonte: Autor.	80
5.20	Análise pelo critério de Von Mises aplicado ao reforço interno sob esforços de torção (Pa). Fonte: Autor.	81
5.21	Modos de flambagem do <i>isogrid</i> sem reforço interno sob esforços de torção. Fonte: Autor.	82
5.22	Modos de flambagem do <i>isogrid</i> com reforço interno sob esforços de torção. Fonte: Autor.	83
5.23	Modos de vibrar do <i>isogrid</i> sem o reforço interno. Fonte: Autor.	85
5.24	Modos de vibrar do <i>isogrid</i> com reforço interno. Fonte: Autor.	86
5.25	Análise residual e Análise de pareto para a massa e para a frequência natural do <i>isogrid</i> com reforço interno utilizando Arranjo Fatorial Completo . Fonte: Autor.	93
5.26	Curva de superfície e curva de contorno para massa e para frequência natural do <i>isogrid</i> com reforço interno. Fonte: Autor.	94
5.27	Análise de Pareto para as respostas (a) Tsai-Wu _C (b) λ_{crC} (c) Tsai-Wu _T (d) λ_{crT} do <i>isogrid</i> com reforço interno utilizando RSM. Fonte: Autor.	96
5.28	Análise de efeitos principais para as respostas (a) Tsai-Wu _C (b) Tsai-Wu _T (c) λ_{crC} (d) λ_{crT} do <i>isogrid</i> com reforço interno utilizando RSM. Fonte: Autor.	97
5.29	Superfícies de respostas para (a) Tsai-Wu _C (b) Tsai-Wu _T (c) λ_{crC} (d) λ_{crT} do <i>isogrid</i> com reforço interno. Fonte: Autor.	99
5.30	Análise residual e Análise de Pareto para a massa do <i>isogrid</i> sem a presença do reforço interno utilizando Arranjo Fatorial Completo. Fonte: Autor.	101
5.31	Gráfico de superfície e de contorno para a resposta massa do <i>isogrid</i> sem reforço interno. Fonte: Autor.	102
5.32	Análise de pareto para as respostas (a) Tsai-Wu _C (b) λ_{crC} (c) Tsai-Wu _T (d) λ_{crT} (e) Frequência natural do <i>isogrid</i> sem reforço interno utilizando RSM. Fonte: Autor.	104
5.33	Análise de efeitos principais para as respostas (a) Tsai-Wu _C (b) Tsai-Wu _T (c) λ_{crC} (d) λ_{crT} (e) Frequência natural do <i>isogrid</i> sem reforço interno utilizando RSM. Fonte: Autor.	105
5.34	Superfícies de respostas para (a) Tsai-Wu _C (b) λ_{crC} (c) Tsai-Wu _T (d) λ_{crT} (e) Frequência natural do <i>isogrid</i> sem a presença de reforço interno. Fonte: Autor.	107
5.35	Análise pelo critério de falha de Tsai-Wu das configurações otimizadas mono-objetivamente. Fonte: Autor.	109
5.36	Análise de flambagem das estruturas otimizadas mono-objetivamente. Fonte: Autor.	110
5.37	Modo de vibrar da configuração otimizada mono-objetivamente para frequência natural. Fonte: Autor.	111
5.38	Análise pelo critério de falha de Tsai-Wu das configurações otimizadas multi-objetivamente. Fonte: Autor.	113
5.39	Análise de flambagem e Análise modal das estruturas otimizadas multi-objetivamente. Fonte: Autor.	114

Lista de Tabelas

3.1	Modificações realizadas ao algoritmo do PSO.	29
3.2	Comparação dos arranjos para o planejamento de experimentos. Fonte: (Júnior, 2003)	39
4.1	Propriedades mecânicas do ABS pelo processo de impressão 3D. Fonte: (Cantrell <i>et al.</i> , 2017)	44
4.2	Propriedades do compósito de fibra de carbono T300 Unidirecional/resina epóxi LY556/HT972. Fonte: Adaptado de (Madhavi, 2009)	45
4.3	Condições de carga para o nível A100 da norma. Fonte: Autor.	45
4.4	Parâmetros para a construção do tubo protético. Fonte: Autor.	47
4.5	Níveis de testes dos fatores de controle. Fonte: Autor.	54
4.6	Matriz de experimentos para o <i>isogrid</i> com reforço interno. - Arranjo Fatorial Completo	55
4.7	Matriz de experimentos para o <i>isogrid</i> sem reforço interno - Arranjo Fatorial Completo	55
4.8	Matriz de experimentos para o <i>isogrid</i> com reforço interno - Arranjo de Superfície de Resposta	56
4.9	Matriz de experimentos para o <i>isogrid</i> sem reforço interno - Arranjo de Superfície de Resposta	57
5.1	Resultados experimentais de falha em compressão do tubo com reforço interno. Fonte: Junqueira <i>et al.</i> (2019)	60
5.2	Comparação entre os resultados encontrados para validação da estrutura de travessas rígidas com e sem reforço interno. Fonte: Autor.	87
5.3	Matriz de experimentos para o <i>isogrid</i> com reforço interno - Arranjo Fatorial Completo. Fonte: Autor.	88
5.4	Matriz de experimentos para o <i>isogrid</i> sem reforço interno - Arranjo Fatorial Completo. Fonte: Autor.	89
5.5	Matriz de experimentos para o <i>isogrid</i> com reforço interno- Arranjo de Superfície de Resposta. Fonte: Autor.	89
5.6	Matriz de experimentos para o <i>isogrid</i> sem reforço interno - Arranjo de Superfície de Resposta. Fonte: Autor.	90

5.7	Indicador R^2 da ANOVA para o modelo utilizando Arranjo Fatorial Completo. Fonte: Autor.	91
5.8	Resumo do modelo da ANOVA para o modelo utilizando Arranjo Fatorial Completo. Fonte: Autor.	91
5.9	Respostas de curvatura da ANOVA para o modelo utilizando Arranjo Fatorial Completo. Fonte: Autor.	92
5.10	Resumo das respostas utilizando RSM. Fonte: Autor.	95
5.11	Indicador R^2 da ANOVA utilizando Arranjo Fatorial Completo para o <i>isogrid</i> sem a presença de reforço interno. Fonte: Autor.	100
5.12	Resumo do modelo da ANOVA utilizando Arranjo Fatorial Completo para o <i>isogrid</i> sem a presença de reforço interno. Fonte: Autor.	100
5.13	Respostas de curvatura da ANOVA utilizando Arranjo Fatorial Completo para o <i>isogrid</i> sem a presença de reforço interno. Fonte: Autor.	101
5.14	Resumo das respostas utilizando RSM. Fonte: Autor.	102
5.15	Otimização mono-objetivo da estrutura com reforço. Fonte: Autor.	108
5.16	Otimização mono-objetivo da estrutura sem reforço. Fonte: Autor.	108
5.17	Otimização multi-objetivo da estrutura com reforço. Fonte: Autor.	111
5.18	Otimização multi-objetivo da estrutura sem reforço. Fonte: Autor.	112

Lista de Símbolos

Símbolos Latinos

E	Módulo de elasticidade [GPa]
G	Módulo de cisalhamento [GPa]
f	Função matemática
g	Função matemática de restrição de desigualdade
h	Função matemática de restrição de igualdade
k	Número de variáveis independentes do modelo
x	Variáveis independentes do modelo
y	Resposta de interesse
z	Variáveis de ruído
N	Número total de experimentos

Símbolos Gregos

α	Distância entre dos pontos axiais em relação aos pontos centrais
β	Coefficientes de regressão dos modelos linear e quadrático
ϵ	Índice das restrições de igualdade
τ	Índice das restrições de desigualdade
\mathbb{R}	Números reais
ω_n	Frequência natural
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Massa específica do material
Ω	Subconjunto dos reais
Φ	Ângulo entre travessas helicoidais
λ	Autovalor associado a carga de flambagem
σ	Tensão
δ	Largura das travessas
ξ	Fator de constrição
\sum	Somatório

Subscritos/Sobrescritos

<i>h</i>	Helicoidal
<i>c</i>	Circular
1	Longitudinal
2	Transversal
<i>T</i>	Tração
<i>C</i>	Compressão
<i>min</i>	Mínimo
<i>it</i>	Representa uma iteração
<i>cr</i>	Crítica

Lista de Abreviaturas

MEF	<i>Método dos Elementos Finitos</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
CCD	<i>Central Composite Design</i>
OLS	<i>Ordinary Least Square</i>
BA	<i>Bat Algorithm</i>
ABC	<i>Artificial Bee Colony</i>
BFO	<i>Bacterial Foraging Optimization</i>
ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
FSS	<i>Fish School Search</i>
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
PMMA	<i>PoliMetacrilato de Metila</i>
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
FEM	<i>Finite Element Model</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
SR	<i>Superfície de Resposta</i>
MSC	<i>Mode Shape Curvature</i>
VARTM	<i>Vacuum Assisted Resin Transfer Molding</i>
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
DOE	<i>Design Of Experiments</i>
BIM	<i>Bladder Inflation Molding</i>
RNA	<i>Rede Neural Artificial</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
FRP	<i>Fiber Reinforced Plastic</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

O objetivo do desenvolvimento de próteses para amputados de membros inferiores é fazer com que o usuário volte a ter uma vida normal, isto é, fazer com que ele possa voltar a caminhar e realizar tarefas normais do seu cotidiano (Shasmin *et al.*, 2008). Estas próteses geralmente são constituídas dos seguintes componentes estruturais: pé protético, suporte para o tubo protético e tubo protético. Este, que é a parte da prótese estudada neste trabalho, é definido por Martins (2015) como estruturas tubulares sem juntas ou partes móveis. O tubo quando conectado a um conjunto soquete/pé substitui o papel dos ossos tíbia e fíbula como estrutura de suporte durante a caminhada ou corrida.

Segundo Shasmin *et al.* (2008), é comum encontrar tubos protéticos fabricados em materiais metálicos, tais como: aço inox, alumínio ou titânio. A massa destes tubos geralmente é elevada em comparação com os tubos fabricados em compósito. Martins (2015) relata que, 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. Alguns processos atualmente utilizados para a manufatura de tubos protéticos são: enrolamento filamentar, pultrusão, uso do pré-impregnados com moldagem por *bladder* e moldagem por infusão de resina assistida à vácuo (*Vacuum assisted resin transfer molding - VARTM*).

No trabalho realizado por Junqueira *et al.* (2019), o processo de manufatura utilizado para a confecção do tubo protético de travessas rígidas foi por meio da VARTM. De acordo com Grujicic *et al.* (2005), este processo consiste em posicionar uma pré-forma sobre um molde rígido, posicionar os canais de vácuo e de injeção de resina e fechar a bolsa de vácuo. Após o fechamento da bolsa flexível, a bomba de vácuo é acionada, e assim o ar entre as fibras da pré-forma é removido, promovendo uma pré-compactação do reforço para aumentar a fração volumétrica de fibras. Finalmente, a resina flui através da pré-forma devido à diferença de pressão entre o canal de injeção e o ponto de vácuo.

Silveira e Fancello (2015) relata que as análises por elementos finitos são largamente utilizadas para obtenção de soluções aproximadas para modelagem e validação de problemas de engenharia. No presente estudo, 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 do tubo. Ademais, para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado uma técnica de Superfície de Resposta (Response Surface Method - RSM), sendo esta, utilizada para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletados durante um determinado experimento, buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo. Após a análise inicial da RSM, é utilizado um *software* de elementos finitos para os cálculos estruturais e validação do tubo para cada condição do experimento gerado pela RSM. Posteriormente, utilizando um *software* matemático, é possível otimizar a configuração do tubo.

O primeiro estudo com tubos protéticos para amputados de membros inferiores utilizando estrutura de travessas rígidas foi feito em 2019 por Junqueira *et al.* (2019). Porém, não há nenhum estudo que mostre a configuração ótima desse tipo de estrutura para utilização em tubos protéticos. Em adição, tubos fabricados em compósito trazem uma alternativa aos tubos fabricados em materiais metálicos. Estes são mais pesados e, do ponto de vista do usuário, um tubo mais leve e resistente implica diretamente em maior conforto e segurança para caminhar e realizar as tarefas do cotidiano. Este trabalho 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.

1.2 Objetivos e Escopo do Trabalho

Como alternativa para tubos de próteses de membros inferiores disponíveis no mercado e na literatura, o trabalho tem como objetivo geral modelar numericamente uma prótese de travessas rígidas fabricada em material compósito proposta, primeiramente, por Junqueira *et al.* (2019) e otimizar sua configuração estrutural. Os objetivos específicos são:

- Modelar a estrutura numericamente por meio dos métodos dos elementos finitos .
- Criar um planejamento de experimento por meio de *design of experiments* (DOE) utilizando metodologia de superfície de resposta para a obtenção de um meta-modelo.
- Otimizar e validar o modelo obtido.

- Verificar os tipos de configurações de estrutura de travessas rígidas propostas por este trabalho, analisando sua viabilidade em aplicação como tubo protético.

1.3 Estrutura da Dissertação

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, suas justificativas e o estado da arte.

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 os conceitos de próteses biomecânicas, próteses transtibiais, tubos protéticos e estruturas de travessas rígidas.

O Capítulo 3 apresenta alguns conceitos sobre as ferramentas que serão utilizadas no trabalho. Será abordado sobre planejamento de experimentos (arranjo fatorial completo e superfície de resposta), sobre método dos elementos finitos e sobre otimização utilizando o algoritmo enxame de partículas e o algoritmo genético.

O Capítulo 4 apresenta informações das metodologias utilizadas para a otimização dos tubos. É explicado sobre o método de simulação utilizado neste trabalho, é mostrado o planejamento do experimento utilizando o arranjo fatorial completo e a superfície de resposta e é relatado sobre o algoritmo de otimização implementado.

O Capítulo 5 mostra os resultados obtidos pela otimização do tubo. Apresenta também uma discussão sobre a utilização de estruturas de travessas com e sem camada interna de suporte estrutural e sua aplicação como tubo para próteses transtibiais.

O Capítulo 6 apresenta a conclusão geral deste trabalho bem como as conclusões específicas baseadas nos resultados obtidos no Capítulo 5. Além disso, traz sugestões para trabalhos futuros.

1.4 Estado da Arte

Com o crescente número de estudos realizados nos últimos anos, foi possível desenvolver próteses muito mais funcionais e mais confortáveis. Pacientes com uma prótese poderão realizar diversas atividades. Por exemplo, alguns mergulham, escalam montanhas, correm em maratonas, participam de triatlons, participam completamente em esportes ou retornam a empregos exigentes ou para o serviço militar ativo. Eles vivem a vida sem limitações. E se uma

pessoa usar uma prótese só para fazer atividades em casa ou para uma maratona, a prótese pode oferecer profundos benefícios psicológicos.

Um dos estudos relevantes no desenvolvimento de próteses foi feito por Martins (2015) que utilizou simulação numérica pelo método dos elementos finitos para aperfeiçoar a seqüência de empilhamento do material pré-impregnado e construiu tubos compósitos para próteses transtibiais pelo processo de moldagem por *bladder* (*Bladder Inflation Molding* - BIM). O material utilizado na construção foi um pré-impregnado unidirecional em fibras de carbono/epoxy com o intuito de se obter um tubo protético mais barato e com boas propriedades mecânicas. Após a construção do tubo, o autor realizou ensaios de certificação (compressão e torção) referenciados pela norma NBR ISO 10328, os resultados atingiram todos os requisitos técnicos da norma, demonstrando ser viável sua fabricação e comercialização. Por outro lado, quando analisado o custo do processo, os tubos protéticos fabricados por BIM são mais caros que os fabricados por VARTM e o mesmo custo dos fabricados por enrolamento filamentar.

No mesmo período do estudo realizado por Martins (2015) , Dos Santos Viana *et al.* (2016) apresentou um modelo numérico para análise estrutural de uma prótese tipo *flex run* para pessoas com amputação transtibial, analisando a viabilidade do uso de materiais compósitos de fibras naturais. O modelo numérico, utilizando o método dos elementos finitos, leva em consideração a geometria da prótese, bem como os esforços que ela sofre durante a corrida. As simulações foram realizadas com as mesmas cargas aplicadas na prótese durante uma situação real de trabalho e foi coletado sua resposta para diferentes tipos de materiais compósitos quando ela estiver sob estes carregamentos. Os resultados obtidos para o uso das fibras regionais mostraram comportamento equivalente quando comparadas aos compósitos já utilizados.

Olewi e Ahmed (2016) também utilizaram materiais compósitos na fabricação de tubos protéticos. Corpos de prova de polimetacrilato de metila (PMMA) na função de matriz com camadas constantes de Perlon e número diferente de camadas de fibras híbridas (carbono + vidro) como materiais de reforço na orientação ($\pm 45^\circ$ e $0^\circ/90^\circ$) em relação à carga aplicada. O método dos elementos finitos foi utilizado para criar um modelo de tubo protético e aplicar carga compressiva no passo do golpe do calcanhar do ciclo da marcha para conhecer o estresse crítico da flambagem. Os resultados experimentais e numéricos mostraram que a resistência à tração, módulo de elasticidade e tensão crítica de flambagem aumentam com o aumento do número de camadas de fibras híbridas, iguais a (145 MPa, 6,25 GPa e 670 MPa), respectivamente, e a porcentagem de aumento em resistência à tração, módulo de elasticidade e tensão crítica de flambagem para amostras com três camadas híbridas (carbono + vidro) e camadas de Perlon em resina PMMA em comparação com amostras de PMMA puro foram (302,7%, 300% e 257,22%), respectivamente, em ($0^\circ / 90^\circ$) orientação das fibras em relação à força de tração.

Outro estudo de grande relevância foi realizado por Gomes *et al.* (2017). Foi utilizado um procedimento de otimização para minimizar o valor máximo de Tsai-Wu de tubos compostos laminados sujeitos a carga axial. O autor fez uso de redes neurais artificiais e algoritmos

genéticos como ferramenta de otimização. O ANN-GA foi utilizado para gerar a estrutura tubular oca apropriada formada a partir de um material compósito carbono/epóxi de acordo com o critério de falha de Tsai-Wu. Este critério de falha foi utilizado como entrada da rede neural e como função objetivo. As orientações do laminado final foram a resposta de saída desejada. Nesse sentido, a rede neural artificial é desenvolvida para realizar uma inversão no *design* do material composto, onde a entrada da rede neural é o critério de falha desejado. O GA provou ser um excelente método de otimização, ainda apresentando rápida convergência com a configuração utilizada. Melhores desenhos foram obtidos com o objetivo de aumentar a confiabilidade mecânica da prótese. Os resultados da RNA treinada produziram bons resultados e, uma vez treinados, podem gerar dados rápidos e confiáveis. Além disso, os resultados da rede foram comparados com os obtidos pelo método de otimização heurística. O método testado por Gomes *et al.* (2017) provou ser confiável e prático para projetos iniciais de tubos.

Mais recentemente, Junqueira *et al.* (2019) estudou 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 ele, 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 por meio 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 pelo 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 ele 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.

Já Santos (2018), buscando atender a demanda existente no Brasil por próteses de preço acessível para população de baixa renda, desenvolveu um estudo que propõe o desenvolvimento de um produto alternativo aos convencionais através do desenvolvimento e a avaliação experimental de um protótipo de prótese transtibial fabricado com materiais sustentáveis de baixo custo. Por serem provenientes de fonte renovável, o emprego destes biocompósitos resultantes da junção de bambu e resina poliuretana à base de óleo de mamona, contribuiu para a redução do impacto ambiental e também para a redução do preço final do produto. Para as etapas de Projeto do Produto, foram adotadas metodologias específicas do *design* de produtos centrado no usuário, bem como metodologias para processamento de materiais e avaliação de protótipos. A adoção dessas metodologias e o emprego de *softwares* CAD e CAE durante toda a fase de

projeto contribuiu para um desenvolvimento eficiente das etapas, auxiliando na prevenção de falhas e redução no tempo de produção. A qualidade dos compósitos e dos produtos resultantes da metodologia proposta pode ser notada nos resultados dos ensaios mecânicos que, mesmo preliminares, confirmaram a viabilidade de aplicação dos compósitos naturais na fabricação de próteses.

No último ano foi realizado por Córdova (2019) um estudo para analisar uma prótese transtibial fabricada em material composto reforçado com fibras naturais. Foi analisado a biomecânica do ser humano para calcular as forças geradas durante a marcha humana e foi feita uma caracterização virtual do material compósito por meio de uma análise micromecânica e simulação por elementos finitos. Na análise estrutural em escala macro, quatro configurações de projeto com diferentes números e orientação de laminado foram propostas, a validação das tensões e deformações de cada protótipo foi realizada com um *software* comercial de elementos finitos. Por fim, foi realizada uma análise biomecânica para cada configuração. Foi determinado que o projeto ideal da prótese transtibial que reduzia as ativações musculares durante a marcha humana era o modelo com uma espessura de 9,5 mm, 10 laminados de material bio-composto, rigidez de 252 N / mm e deflexão máxima de 3,65 mm.

No mesmo período, Tavangarian *et al.* (2019) realizou um estudo em que o tubo protético para próteses de membros inferiores foi fabricada pela técnica de fabricação aditiva. O polímero de ácido polilático foi utilizado como filamento para impressão 3D. Os tubos impressos em 3D foram testados para avaliar sua conformidade com os padrões estabelecidos pela ISO 1038: 2016 (Protéticos - Ensaios estruturais de próteses de membros inferiores - Requisitos e métodos de teste). Um teste de torção e um teste de compressão foram aplicados nos tubos para avaliar seu desempenho. Os resultados mostraram que os tubos impressos em 3D têm resistência suficiente sob estresse e excedem os requisitos das normas e, portanto, podem substituir os tubos metálicos nas próteses de membros inferiores. O uso de impressoras 3D como uma técnica alternativa de fabricação pode abrir um novo horizonte para aumentar a acessibilidade de próteses de membros inferiores para populações de baixa renda.

Ainda no mesmo período, Monroy *et al.* (2019) fez um estudo comparativo por elemento finitos do projeto da prótese transtibial modular. O autor utilizou o material comercial aço inoxidável AISI 304, bem como o material econômico da resina epóxi. O estudo é complementado com um novo material compósito de resina de poliéster e reforços de fibras de juta, de vidro e pós de nozes. A análise estática da prótese utilizou um peso de 90 kg considerado para um adulto e equivalente a uma força de 1600 N, com a qual procurou um resultado de deformação inferior ao estabelecido na ISO 10328, que é de 15 mm. Os resultados entre o material comercial e os materiais de estudo são comparados, e o material proposto possui valores semelhantes aos da resina epóxi e oferece um fator de segurança de 1,23.

Dessa forma, o estudo do tubo protético no presente trabalho foi motivado 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.

Por fim, objetivou-se nesta seção relevar sobre alguns trabalhos presentes na literatura relacionados com a temática desta dissertação, a fim de se fundamentar a relevância deste trabalho que tem como objetivo a otimização de um tubo protético construído com travessas rígidas. É evidente que a necessidade pela busca e concepção de uma prótese com bom desempenho e baixo custo é grande. Técnicas que serão utilizadas neste trabalho como planejamento de experimentos, simulação numérica por elementos finitos e otimização por enxame de partículas e algoritmo genético já são utilizadas em grande escala no meio acadêmico e industrial. Em adição, observa-se que as pesquisas correlatas sobre o tema são recentes e de elevado interesse científico em todo o globo. Logo, neste trabalho, será dada continuidade às contribuições já existentes por diversos pesquisadores da área.

Capítulo 2

Materiais Compósitos

2.1 Generalidades

A necessidade de melhoria dos produtos existentes gerou numerosos estudos na área de novos materiais e fez com que um novo tipo de material fosse desenvolvido: o material compósito. Segundo Gay (2014), um material compósito é a junção de dois ou mais materiais distintos que são combinados visando obter propriedades que nenhum dos materiais isoladamente apresenta. Os compósitos não naturais são definidos por duas fases: matriz e reforço. A matriz tem a função de unir fibras e transmitir as tensões, enquanto o reforço tem a função de suportar os carregamentos mecânicos (Goh *et al.*, 2019).

A classificação dos materiais compósitos geralmente se dá pelo tipo de matriz e a geometria do reforço. A Figura 2.1 mostra os tipos de reforços nos materiais compósitos.

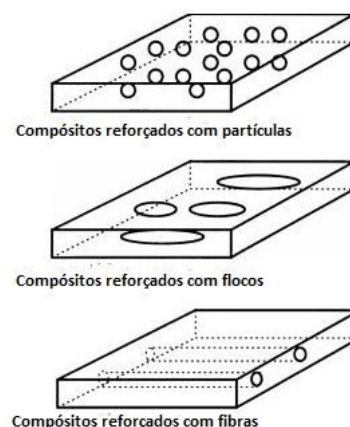


Figura 2.1: Tipos de reforços dos materiais compósitos. Fonte: Adaptado de Kaw (2005)

Kaw (2005) fez a classificação dos compósitos considerando os seguintes tipos de matriz: metálica, cerâmica e polimérica; E os seguintes tipos de reforço: partículas, flocos ou fibras. No compósito reforçado com partículas, as mesmas são imersas na matriz de forma aleatória, consistindo em um material com vantagens como resistência superior e melhor resistência à oxidação. O reforço em flocos proporciona um alto módulo de flexão fora do plano e tem um baixo custo, porém este tipo de reforço apresenta uma restrição, sua orientação é bem trabalhosa. Já o reforço em fibras, constitui-se em matrizes reforçadas com fibras longas (contínuas) ou curtas (descontínuas), como é visto na Figura 2.2.

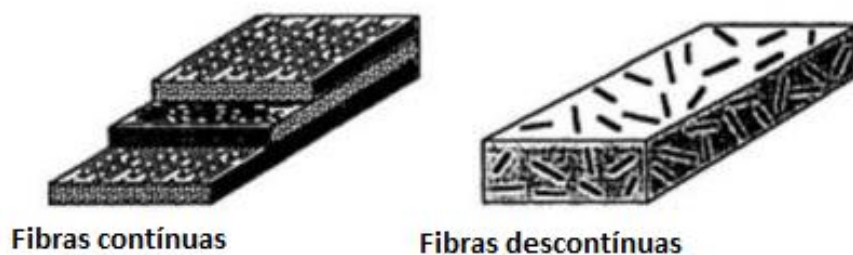


Figura 2.2: Matriz reforçada com fibras contínuas e descontínuas. Fonte: Adaptado de Senkov e Miracle (2001)

As matrizes mais usadas são as poliméricas feitas com resina epóxi, uretano ou poliéster. Sendo divididas em termorrígidas e termoplásticas, onde as termorrígidas após o resfriamento não conseguem voltar a sua forma original, sendo mais rígidas, enquanto que as termoplásticas são muito sensíveis às altas temperaturas, sendo facilmente maleáveis. A matriz polimérica também está presente nos impregnados reforçados com fibras contínuas, chamados de *prepregs*, que consistem em fitas ou tecidos que são impregnados através do calor e compressão por uma resina, sendo muito usados para aplicações estruturais.

Gay (2014) descreve um tipo de material compósitos denominado laminado. Este é um tipo de material composto que é formado por duas ou mais camadas finas empilhadas onde a resistência varia de acordo com a orientação das fibras em cada lâmina, tendo uma das direções de maior índice de resistência. Assim, para desenvolver propriedades em várias direções é necessário variar as orientações das fibras. Já em compósitos unidirecionais as fibras determinam as propriedades longitudinais e a matriz as transversais. Os laminados podem ter formato plano (placas) ou curvo (cascas). Na Figura 2.3 é possível observar o empilhamento das lâminas formando um laminado.

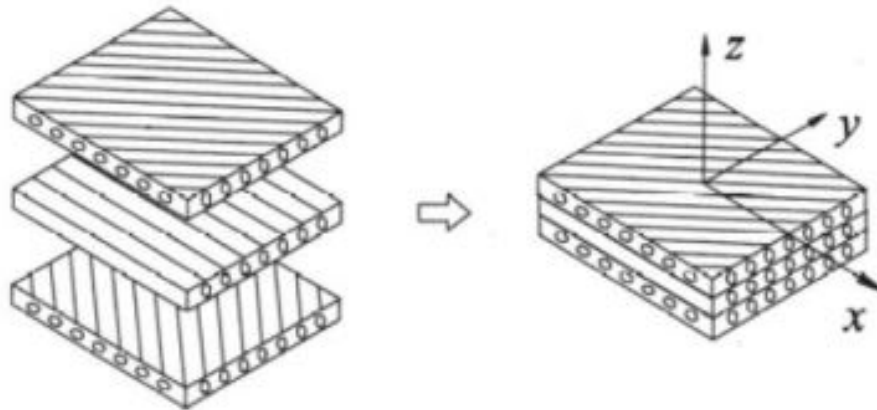


Figura 2.3: Empilhamento das camadas de um material compósito laminado. Fonte: Mendonça (2005)

No estudo realizado por Panosso *et al.* (2011), ele afirmou que o material compósito laminado é considerado como sendo um único componente, ou seja, as camadas empilhadas são consideradas como uma única estrutura e o contato entre elas é considerado perfeito, não sofrendo nenhum deslocamento entre as mesmas. É necessário conhecer muito bem o comportamento do material e como fazer sua formulação matemática para realizar uma perfeita análise do laminado.

2.2 Próteses

2.2.1 Próteses biomecânicas

Segundo Bliquez (1983), a perda de membros corporais é um acontecimento inesperado que pode acontecer por meio de guerras, acidentes automobilísticos, doenças e etc. isso acontece desde os primórdios da humanidade e a utilização das próteses é uma alternativa para a reposição dos membros perdidos. O termo "prótese" tem origem do verbo grego "prostithenai" cujo significado é "colocar no lugar".

A primeira prótese que se tem registro foi construída por egípcios (Norton, 2007). Elas tinham configurações rudimentares e, devido a isso, 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.

A Figura 2.4 ilustra uma prótese projetada em 1560 pelo cirurgião francês Ambroise Paré e o artesão francês Le petit Lorrain. Esta perna protética funcional foi feita de metal, couro,

papel e cola e faz uso de um mecanismo de acionamento por cordão garantindo certa mobilidade ao usuário.

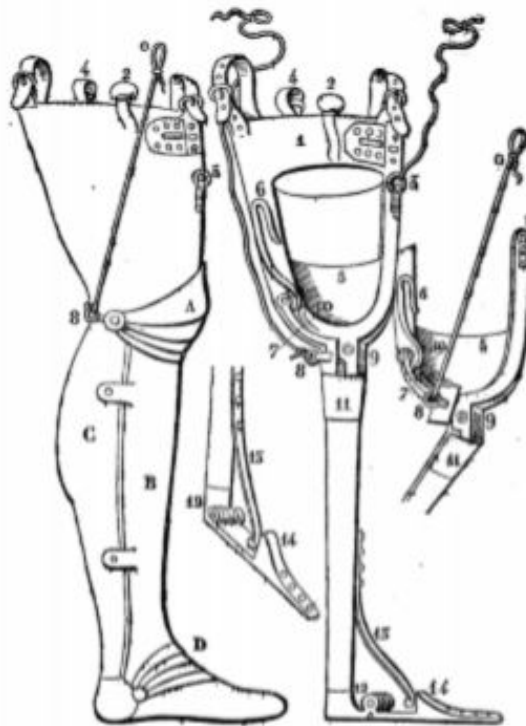


Figura 2.4: Perna protética proposta por Ambroise Paré e Le Petit Lorrain. Fonte: Benhamou (1994)

Entre os séculos dezessete e dezenove, conforme relatado por Norton (2007), o desenvolvimento de próteses cresceu bastante. Alguns conceitos foram criados, como o caso de Pieter Verduyn que projetou a primeira prótese com juntas móveis em 1696, tornando referência para futuras próteses com juntas que possibilitam graus de liberdade ao usuário. Já em 1800, James Potts, Londrino, construiu uma prótese em madeira para membros inferiores que ficou conhecida como "*Anglesey leg*". Willian Selpho levou a prótese de Potts para os Estados Unidos e desenvolveu a prótese que foi denominada por "*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.

Phillips (1985) desenvolveu a primeira prótese para amputações transtibiais fabricada completamente em material compósito. Esse modelo proposto por ele engloba a junção de um pé protético com extensão até o coto. O grande diferencial que ele iniciou o uso de materiais compósitos de alta resistência para a fabricação de próteses de alto desempenho e conforto para o usuário, enquanto Ambroise Paré e Le Petit Lorrain utilizavam materiais compósitos de baixa resistência.

Scholz *et al.* (2011) relata que foi possível grande avanço no projeto de novas próteses

e aparelhos ortopédicos com o avanço dos estudos sobre desenvolvimento de novos materiais compósitos, principalmente com o uso de fibra de carbono e de resinas termorrígidas. Um grande marco histórico aconteceu nos jogos olímpicos de 1988, quando, pela primeira vez, foi utilizado um pé protético flexível em uma corrida esportiva. Já 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 2.5.

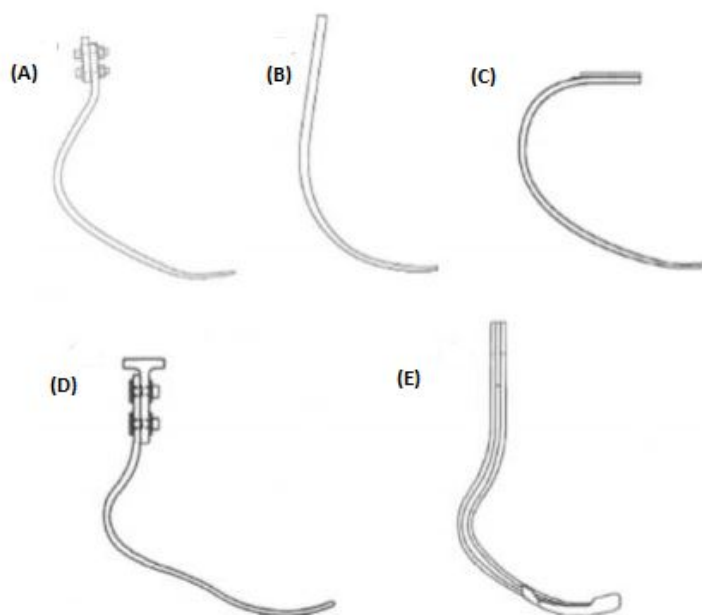


Figura 2.5: Próteses de corrida: (A) Cheetah, (B) flex-sprint, (C) flex-run, (D) sprinter e (E) C-sprint. Fonte: Nolan (2008)

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

2.2.2 Tubo protético

Existe dois grupos de próteses biomecânicas: próteses convencionais (exoesqueléticas) e próteses modulares (endoesqueléticas). Segundo Bocolini (2000), a primeira possui estrutura rígida, sendo fabricadas em plástico e/ou madeira. Já as próteses modulares possuem vários componentes ajustáveis e intercambiáveis entre si, sendo fabricados em aço, alumínio, titânio e fibra de carbono. As próteses endoesqueléticas são melhores que as exoesqueléticas, pois permitem um melhor alinhamento por possuírem componentes ajustáveis (Vilagra *et al.*, 2011). A figura 2.6 ilustra uma prótese modular com os seguintes componentes: pé protético, o tubo protético e o suporte para o tubo protético.



Figura 2.6: Prótese modular para amputações de membros inferiores: a) Tubo protético, b) Suporte, c) Pé protético. Fonte: Junqueira *et al.* (2019)

Segundo Ancelotti Jr (2006), tubos protéticos fabricados em materiais compósitos possuem elevada rigidez mecânica associado ao baixo peso além de longa vida em fadiga. Assim, tubos para próteses de membros inferiores fabricados em materiais compósitos passaram a ser objeto de estudo por alguns autores como Lebrao (2007), Martins (2015) e Gomes *et al.* (2017). Principalmente os tubos fabricados em matrizes poliméricas reforçadas com fibras de carbono (CFRP) que trouxeram ganhos significativos em termos de desempenho mecânico e eficiência estrutural.

Jia *et al.* (2005) construiu um tubo protético pelo processo de temoformagem a vácuo utilizando homopolímero de polipropileno. Após a fabricação, eles realizaram ensaios de fadiga e concluíram que o tubo teria uma vida útil de um ano para um amputado que ande cerca de 1300 passos por dia, isto é, o tubo suportou 500.000 ciclos de carregamento sem falhar.

Outro estudo relevante envolvendo tubo protético foi feito por Shasmin *et al.* (2008). Ele estudou a viabilidade de utilizar bambu na fabricação de tubo para prótese de membro inferior para tentar diminuir o custo de fabricação de próteses transtibiais. Os resultados obtidos experimentalmente mostraram uma tensão de compressão de 88MPa e módulo de elasticidade de 44GPa. Ademais, ele comparou os resultados obtidos no ensaio com as tensões de compressão de um alumínio no estado recozido (48MPa) e o módulo plástico reforçado com fibras (12GPa) constatando que o bambu é duas vezes mais resistente que o alumínio e três vezes mais que o plástico reforçado com fibras (FRP). Com base nos resultados, o autor 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.

Já Lebrao (2007) desenvolveu um estudo para projetar um tubo que possuísse boas condições de resistência mecânica, aliado a leveza e, principalmente, baixo custo de fabricação. Para chegar nos objetivos, o autor construiu o tubo protético por dois processos de fabricação em materiais compósitos: Enrolamento filamentar e moldagem por infusão de resina assistida a vácuo. Com os tubos em mãos, o autor realizou ensaios de compressão e comparou os resultados obtidos com os de um tubo protético comercial feito em 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.

Por fim, diversos autores, (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.*, 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 (Jia *et al.*, 2005); (Rothschild *et al.*, 1990); (Shasmin *et al.*, 2008); (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 (Lebrao, 2007); (Martins, 2015); (Shasmin *et al.*, 2008) 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.

2.2.3 Estrutura de travessas rígidas

Cada vez mais a necessidade de materiais e estruturas de alto desempenho tem se tornado comum. Isto é, setores industriais de tecnologia avançada em engenharia como, por exemplo, o setor aeroespacial, apresenta uma crescente demanda por estruturas que conciliam baixo peso, alta resistência mecânica e que sejam capazes de resistir a carregamentos muito elevados. Algumas das razões que fazem esses materiais serem tão necessários são: diminuição do consumo de combustíveis (com conseqüente redução na emissão de poluentes), melhor desempenho estrutural e mecânico das aeronaves, maior segurança e conforto aos usuários, além de maior economia para as empresas (Jia *et al.*, 2005). Outro setor com elevado crescimento na busca por materiais compósitos e estruturas mais leves e resistentes é o de biomecânica. Essa busca deve-se a biocompatibilidade de alguns materiais e elevada resistência mecânica associado ao baixo peso. Uma solução 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*, possuem a forma cilíndrica ou cônica (Totaro, 2012). 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). A Figura 2.7 ilustra a composição de uma estrutura fechada de travessas rígidas fabricada de fibra de carbono e resina epóxi.



Figura 2.7: Estrutura de travessas rígidas. Fonte: Adaptado de Sorrentino *et al.* (2016)

Quando a estrutura consiste somente de travessas circulares e helicoidais sem o uso da camada externa, ela é denominada de estrutura de travessas rígidas aberta. É este tipo de estrutura que será estudada neste trabalho, contendo, também, uma camada interna de polímero com função de estabilização e reforço estrutural.

O termo *isogrid* é comumente usado para se referir a qualquer estrutura de treliças cujos reforços formam triângulos equiláteros (Kanou *et al.*, 2013). 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 (Akl *et al.*, 2008).

A NASA (sigla em inglês de *National Aeronautics and Space Administration* - Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço) foi uma das pioneiras no estudo de estruturas de travessas rígidas 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 objetivo do estudo foi encontrar estruturas mais leves, econômicas e estruturalmente eficientes do que as que existiam na época. Estas seriam aplicadas no setor 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 foi o primeiro a desenvolver e aplicar estruturas de travessas rígidas

em foguetes e veículos espaciais, como o Russo Proton-M, mostrado na Figura 2.8.



Figura 2.8: Veículo espacial Proton-M. Fonte: Vasiliev *et al.* (2001)

Vasiliev *et al.* (2001) desenvolveu um projeto utilizando estruturas de travessas rígidas para aplicá-las em fuselagens de aeronaves, interestágios de foguetes e adaptadores de cargas. Inicialmente, para o projeto estrutural, fez uso de simulações numérica pelo método dos elementos finitos e cálculo analítico. Após o projeto das estruturas, utilizaram filamento unidirecional de fibra de carbono e matriz polimérica para fabricar estruturas de travessas rígidas e, em seguida, realizaram 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.

Conforme Totaro (2012) 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.*, 2001).

Em virtude dos fatos mencionados, percebe-se que o desenvolvimento de próteses começou há muitos anos e continua até os dias atuais. A utilização de novos materiais e tipos de estruturas faz com que novas configurações protéticas apareçam como opção para os usuários. No presente trabalho será estudado uma configuração protética de estrutura de travessas rígidas, utilizando material compósito. Enfoque deste trabalho, não foi encontrado nenhum estudo na literatura até a presente data que tenha feito a otimização desse tipo de estrutura como solução de problemas estruturais na área da medicina moderna e biomecânica, especificamente relacionado a próteses para amputações de membros inferiores.

Capítulo 3

Otimização

3.1 Generalidades

Segundo Gill *et al.* (2019), Otimização é o processo de buscar a melhor solução (ou solução ótima) em determinado problema. Matematicamente, refere-se a minimização ou maximização de uma dada função objetivo sobre um conjunto de variáveis de decisão que satisfaçam as restrições funcionais. A função objetivo é o que se deseja otimizar (minimizar ou maximizar), como exemplo: minimizar perdas ou maximizar lucro. Ela permite fazer comparações dentre as possíveis escolhas das variáveis e então determinar a melhor. Variáveis de decisão são os parâmetros cujos valores determinam um resultado para o problema. Finalmente, as restrições são definidas como um conjunto de funções que determinam o espaço factível das soluções.

Problemas com ausência de restrições são denominados irrestritos, enquanto que os demais são referenciados como problemas de otimização restrita (Belegundu e Chandrupatla, 2019). É possível encontrar problemas sem função objetivo, onde o intuito é apenas encontrar decisões que sejam viáveis. Há, também, problemas com múltiplas funções. Estes, geralmente são reduzidos a apenas um objetivo, combinando-se os múltiplos problemas em apenas um, ou escolhendo um objetivo e introduzindo restrições. Se em um problema as variáveis são restritas a valores inteiros ou a um conjunto de possibilidades discretas, o problema é de otimização discreta. Caso não se restrinja a estes valores, podendo assumir valores reais, o problema é conhecido como otimização contínua. A Figura 3.1 mostra os diferentes componentes de um problema de otimização.

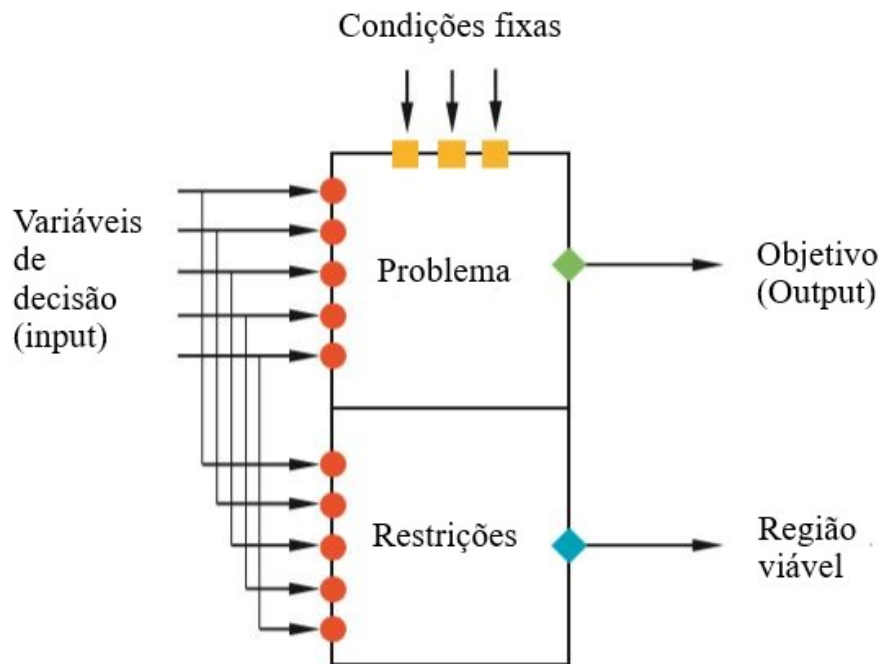


Figura 3.1: Componentes de um problema de otimização. Fonte: Adaptado de Mirjalili (2016)

Atualmente, existem inúmeros estudos em otimização, sempre com o objetivo de encontrar os melhores métodos para representar de maneira eficiente o problema analisado. Neste contexto, o conhecimento da forma que um problema de otimização se apresenta e como este deve ser solucionado é um fator relevante de sucesso. A seguir, os principais modelos de problemas de otimização são descritos.

3.1.1 Definição matemática do problema de otimização

Dada uma função $f(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ e um conjunto $S \subset \mathbb{R}^n$, deve-se encontrar um $x^* \in \mathbb{R}^n$ que resolva a Equação 3.1.

$$\begin{aligned} \min_x f(x) \\ x \in S \end{aligned} \tag{3.1}$$

Sendo f considerada a função objetivo e S como uma região factível.

Se S é vazio, o problema é chamado infactível. Se é possível encontrar uma sequência $x^k \in S$ onde $f(x^k) \rightarrow -\infty$ e $k \rightarrow +\infty$ então o problema é ilimitado. Se o problema não é infactível nem ilimitado, em muitos casos é possível encontrar uma solução $x^* \in S$ que satisfaça a Equação 3.2:

$$f(x^*) \leq f(x), \forall x \in S \quad (3.2)$$

Sendo x^* um minimizador global do problema 3.1. Já se

$$f(x^*) < f(x), \forall x \in S, x \neq x^*, \quad (3.3)$$

Dizemos que se trata de um minimizador global restrito.

Em muitos casos, um conjunto factível S é descrito usando restrições funcionais de igualdade e desigualdade. Por exemplo, S pode ser dado por:

$$S = \{x : g_i(x) = 0, i \in \epsilon \text{ e } g_i(x) \geq 0, i \in \tau\} \quad (3.4)$$

Sendo ϵ e τ índices dos conjuntos das restrições de igualdade e desigualdade. A Equação 3.5 mostra a forma genérica do problema de otimização.

$$\begin{aligned} \min_x f(x) \\ g(x) = 0 \\ h(x) \geq 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Muitos fatores que afetam os problemas de otimização podem ser solucionados eficientemente. O número n de variáveis de decisão e o número total de restrições $|\epsilon| + |\tau|$ são geralmente bons indicadores para analisar a dificuldade da solução de determinados problemas. Outros fatores estão relacionados às propriedades das funções f e g .

Sabe-se que problemas com a função objetivo linear e restrições lineares são mais fáceis de resolver, outros já não são triviais. Por esta razão, pesquisadores têm desenvolvido diferentes algoritmos com características cada vez mais específicas para cada caso. A seguir uma breve descrição dos principais tipos de otimização.

Otimização linear

Um dos problemas mais comuns de otimização é a programação linear (PL). Em um problema de PL a função objetivo e as restrições, sejam elas de igualdades ou desigualdades,

são lineares. Caso as funções f e g_i apresentadas pela Equação 3.5 sejam todas lineares, a forma padrão é dada pela Equação 3.6.

$$\begin{aligned} \min_x c^T x \\ Ax = b \\ x \geq 0 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Onde $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $b \in \mathbb{R}^m$, $c \in \mathbb{R}^n$ são valores constantes conhecidos, e $x^* \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de variáveis a ser determinado. Existem diferentes métodos para programação linear, os melhores e mais conhecidos são os métodos de pontos interiores e o simplex.

Otimização não-linear

Na programação não linear (PNL), os problemas têm ou a função objetivo ou algumas das restrições não lineares. Caso f , ou alguma das funções de g apresentadas pela Equação 3.5 for não linear, o problema é de PNL. Estes podem ser solucionados utilizando técnicas de pesquisa pelo gradiente, bem como métodos baseados em Newton, métodos de pontos interiores, métodos programação quadrática, dentre outros. Podem ser irrestritas ou restritas.

Otimização sem restrições (irrestrita): classe de problemas que possuem função objetivo não linear e não possuem restrições. Considere o problema de minimizar uma função $f(x)$, $x \in \mathbb{R}^n$. A Equação 3.7 define o problema.

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ x \in \mathbb{R}^n \end{aligned} \tag{3.7}$$

Otimização com restrições (restrita): no problema não-linear de otimização com restrições, a função objetivo e as funções de restrições são funções não lineares gerais de x . O problema geral é dado pela Equação 3.8.

$$\begin{aligned} \min_x f(x) \\ g(x) \leq 0 \\ x \in \mathbb{R}^n \end{aligned} \tag{3.8}$$

O conjunto de variáveis, restrições e objetivos constroem o espaço de busca de um determinado problema. Infelizmente, é impossível desenhar o espaço quando o problema tem um

grande número de variáveis. Contudo, um exemplo de um espaço de busca de um problema com duas variáveis e várias restrições está mostrado na Figura 3.2

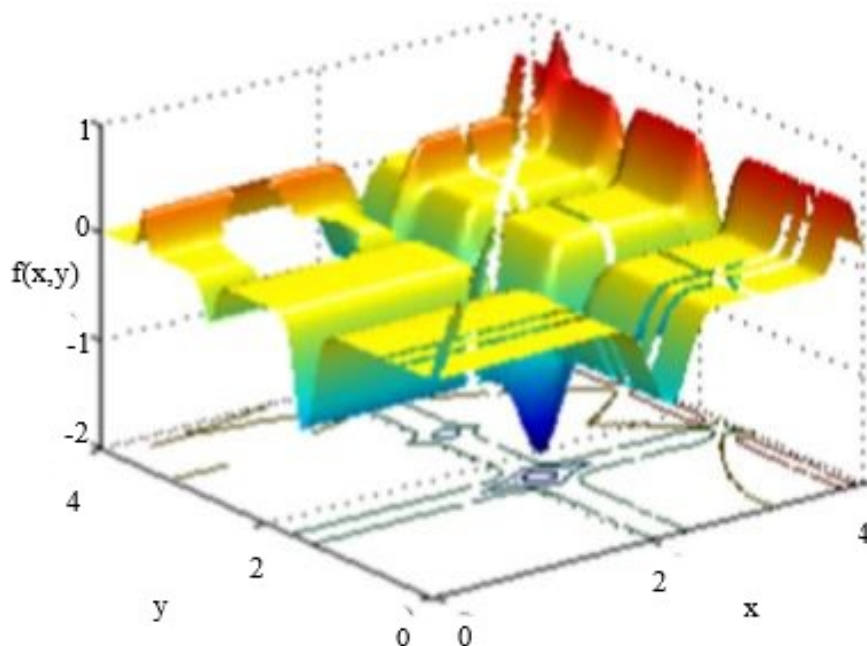


Figura 3.2: Exemplo de um espaço de busca com duas variáveis e várias restrições. Fonte: Adaptado de Mirjalili (2016)

Os algoritmos utilizados neste trabalho são: enxame de partícula (*Particle Swarm Optimization* - PSO) e algoritmo genético (*Genetic Algorithm* - GA). O primeiro é baseado no comportamento dos pássaros devido a características das aves, que se comunicam entre si, com o intuito de encontrar melhores pontos de alimentação e até mesmo de ninhos (Kennedy e Eberhart, 1995); (Bonabeau *et al.*, 2010); (Wang *et al.*, 2012). Segundo Parsopoulos e Vrahatis (2010), este método tem recebido diversas melhorias e apresentado excelentes resultados. Já o GA é uma classe particular de algoritmos evolutivos que usam técnicas inspiradas pela biologia evolutiva como hereditariedade, mutação, seleção natural e recombinação (ou *crossing over*). Ambos serão detalhados nas próximas seções.

3.2 Otimização por Enxame de Partículas

A otimização por enxame de partículas foi apresentada por Eberhart e Kennedy (1995), como uma meta-heurística estocástica que simula a interação dos pássaros e cardumes de peixes em busca de alimentos e/ou ninhos. Esta técnica foi inspirada pela natureza e surgiu de uma das grandes áreas da computação natural, conhecida como Inteligência de Enxame (De Castro, 2006). Esta abordagem vem sendo utilizada como ferramenta computacional a fim de solu-

cionar problemas de otimização de diversas áreas do conhecimento, tais como: computação, engenharias, entre outras.

De acordo com Reynolds (1987), há três regras encontradas na natureza que compõe a inteligência de enxame, são elas: alinhamento, coesão e separação. Estes três comportamentos estão mostrados na Figura 3.3. O alinhamento faz com que cada indivíduo alinhe seu caminho na direção média dos companheiros de rebanho. A coesão faz com que o movimento individual seja em direção à posição média dos companheiros vizinhos e, por fim, a separação evita que os indivíduos colidam entre si.

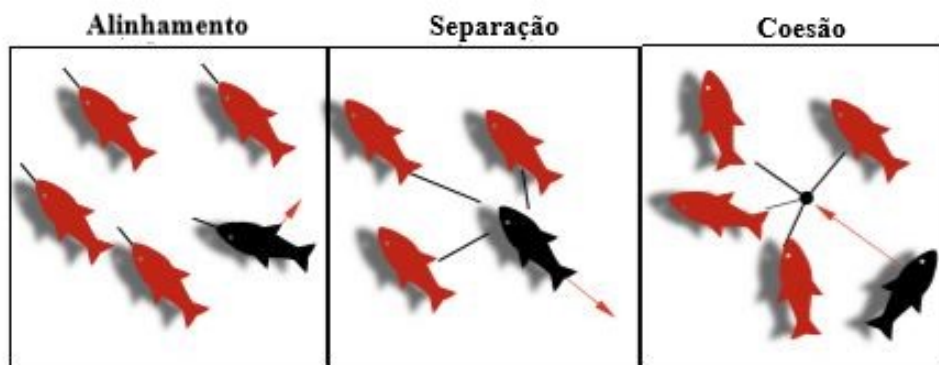


Figura 3.3: Regras encontradas na natureza que compõe a inteligência de enxame. Fonte: Adaptado de Eberhart e Kennedy (1995)

Estas regras simples levam a um complicado mecanismo de movimento para buscar alimentos ou para evitar predadores. A inteligência de cada indivíduo gera a melhor decisão usando informações locais. Tais decisões também afetam outros indivíduos vizinhos e isso leva à solução do problema. Por exemplo, quando alguns indivíduos à beira de um enxame encontram uma fonte de alimento, eles podem puxar todos os outros em sua direção simplesmente nadando na direção da comida, por outro lado, se houver alguma fonte de perigo, o indivíduo da beirada pode alertar e evitar o predador para todo o enxame. Um exemplo apenas do movimento pode ser visualizado na Figura 3.4. Percebe-se que existem grupos de peixes em cada área que alinham sua direção de movimento, mantendo uma distância segura para ter coesão e evitar colisões.



Figura 3.4: Simulação de movimento utilizando as regras de Reynolds (1987). Fonte: Adaptado de Eberhart e Kennedy (1995)

O autor Kennedy *et al.* (2007) destaca em seu trabalho o uso do algoritmo de otimização PSO em determinadas categorias, sendo elas: Antenas (Pantoja *et al.*, 2007), biomedicina (Qiu *et al.*, 2014), ajuste de controle (Chen *et al.*, 2018), redes de distribuição (Mosbah *et al.*, 2016) entre outros. Segundo Parpinelli e Lopes (2011), diversos algoritmos surgiram desta abordagem computacional inspirada pela natureza, tais como:

- Algoritmos de otimização por colônia de formigas (*Ant colony optimization* - ACO) (Dorigo e Di Caro, 1999);
- Algoritmos de cardume artificial (*Fish School Search* - FSS) (Bastos Filho *et al.*, 2008), (Neshat *et al.*, 2014);
- Algoritmo por colônia de abelhas artificiais (*Artificial bee colony* - ABC) (Akay e Karaboga, 2012);
- Algoritmos de otimização por colônia de bactéria (*Bacterial Foraging Optimization* - BFO)(Teodora *et al.*, 2010);
- Algoritmo de otimização por enxame de morcegos (*Bat algorithm* - BA) (Yang, 2013);
- Algoritmo de otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO) (Eberhart e Kennedy, 1995).
- Algoritmo baseado no movimento fototrópico (*Sunflower optimization*) (Gomes *et al.*, 2019)

Para Bansal *et al.* (2019), os algoritmos de otimização por inteligência de enxame apresentam as seguintes características: princípios da proximidade, princípio da qualidade, princípio

da resposta diversa, princípio da estabilidade, princípio da adaptabilidade. A existência destas características proporciona um importante equilíbrio e estabilidade ao método. Além destas características, os algoritmos de inteligência de enxame possuem uma abordagem populacional, onde utilizam uma população de indivíduos que pode ser denominada enxame (Panigrahi *et al.*, 2011).

De acordo com Bansal *et al.* (2019), o comportamento desta população se conduz ao ponto de solução para o problema em questão, devido a sua iteração com os demais agentes (partículas) no espaço de busca. Em uma abordagem simples, o enxame se movimenta conforme a iteração das partículas da população e a troca de informação em relação ao espaço de busca. Na próxima seção, será descrita a estrutura do algoritmo de otimização enxame de partículas.

3.2.1 Estrutura do enxame de partículas padrão

Como descrito na seção anterior, o algoritmo PSO utiliza uma população de indivíduos que se movimentam no espaço de busca para encontrar a melhor solução para o problema em questão. Segundo Xu *et al.* (2019), a direção a ser seguidas depende dos valores a serem encontrados pela iteração das partículas, tais como:

- Possuir um melhor valor para partícula individual conhecida como aprendizagem cognitiva;
- Possuir um melhor valor para partícula global do enxame, denominada como aprendizagem social;
- Possuir uma velocidade aleatória para todos os indivíduos do enxame.

Segundo De Castro (2006), as posições e velocidades das partículas se modificam a cada passo iterativo entre os indivíduos do enxame. Para Jiao *et al.* (2008), a partícula i em uma iteração k se movimenta em um espaço de busca, devido a dois fatores: velocidade e posição. Estes são representadas como $\vec{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ e $\vec{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, respectivamente. Em seguida, a posição de armazenamento da melhor partícula individual visitada é $\vec{P}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ e denominada como $pbest$. Já a melhor partícula global se destaca como $\vec{P}_G = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ denominada como $gbest$, conhecida também como a melhor partícula do enxame.

De acordo com Jiao *et al.* (2008), durante a execução do algoritmo, a avaliação da qualidade das respostas acontece a cada iteração, atualizando suas melhores partículas individuais ($pbest$) e a melhor do enxame ($gbest$). Em seguida, as partículas se destinam a suas novas posições. A Figura 3.5 mostra o fluxograma resumindo o algoritmo.

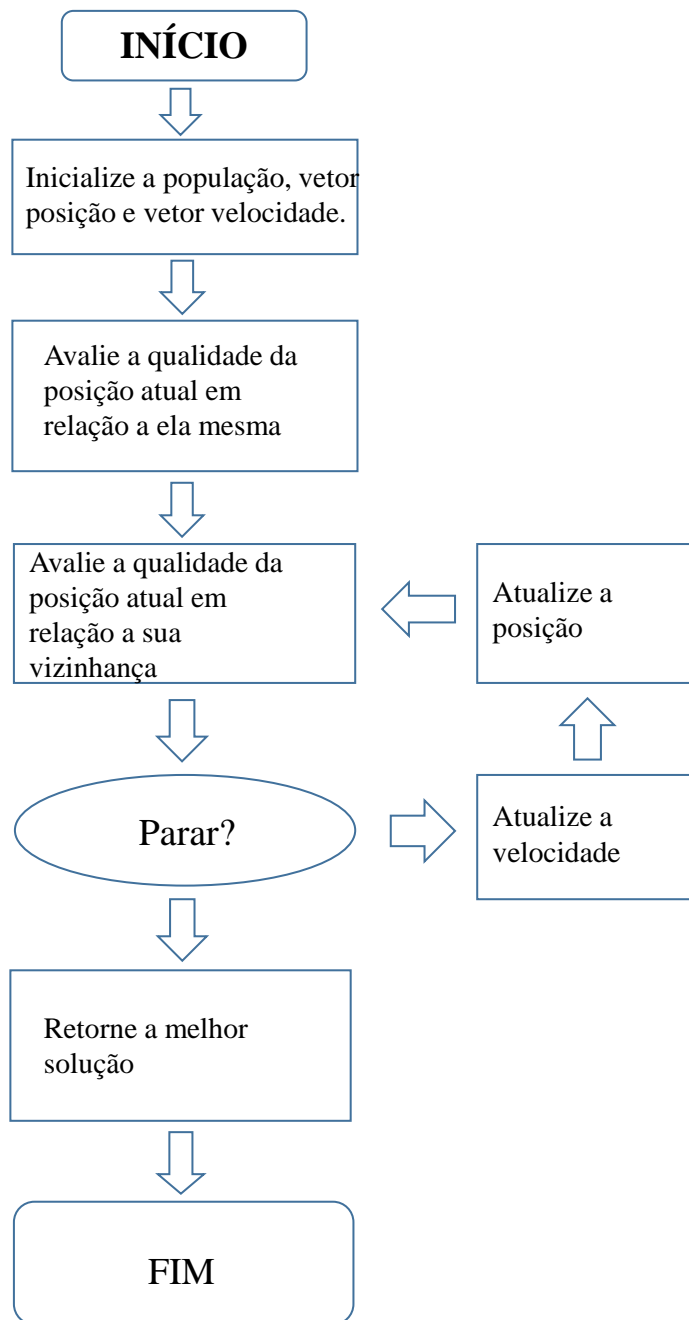


Figura 3.5: Fluxograma do algoritmo de PSO. Fonte: Adaptado de Jiao *et al.* (2008).

Segundo Bansal *et al.* (2019), as partículas i fazem suas atualizações nas k iterações, onde cada movimento destes agentes são calculados por meio de suas velocidades e posições, como apresenta as Equações 3.9 e 3.10.

$$V_{id+k} = V_{id} + C_1 \times rand() \times (P_{id} - X_{id}) + C_2 \times rand() \times (P_{gd} - X_{id}) \quad (3.9)$$

$$X_{id+k} = V_{id+k} + X_{id} \quad (3.10)$$

Sendo V_{id+k} representa a velocidade de cada partícula i na sua iteração k , V_{id} é a velocidade atual da partícula naquele instante. As variáveis c_1 e c_2 são duas constantes positivas conhecidas como parâmetros de confiança e possui valores iguais a 2, que influenciam os componentes cognitivos e sociais respectivamente (Eberhart e Kennedy, 1995). A variável conhecida como $rand()$ utiliza uma função aleatória distribuída uniformemente entre 0 e 1. P_{id} é a melhor posição individual visitada pela partícula i e, por fim, P_{gd} é a melhor posição global visitada pela partícula i .

A seção a seguir, descreve algumas modificações que o algoritmo de otimização enxame de partículas (PSO) passou durante os anos.

3.2.2 Modificações do algoritmo PSO

Como descrito por Xu *et al.* (2019), o algoritmo de otimização por enxame de partículas surgiu com intuito de solucionar problemas de otimização de diferentes áreas do conhecimento. Com o passar dos anos, alguns autores propuseram algumas modificações no algoritmo de otimização para que ele apresente melhores resultados na resolução de problemas complexos de otimização (Onwubolu e Babu, 2013). Inicialmente, Shi e Eberhart (1998) apresentaram um novo parâmetro para uma obtenção de uma nova concepção do algoritmo PSO. Este parâmetro se denomina peso da inércia (w), com esta modificação o algoritmo melhoraria sua velocidade de convergência, equilibrando também a velocidade de cada partícula do enxame. A partir desta nova abordagem, As Equações 3.11 e 3.12 constituem o algoritmo principal:

$$V_{id+k} = w \times V_{id} + C_1 \times rand() \times (P_{id} - X_{id}) + C_2 \times rand() \times (P_{gd} - X_{id}) \quad (3.11)$$

$$X_{id+k} = V_{id+k} + X_{id} \quad (3.12)$$

Os autores afirmam que se utilizarem os valores de w próximos a 1, estariam encorajando os agentes (partículas) a explorarem mais o espaço de busca, ou seja, explorarem a amplitude da região. Por outro lado, se utilizarem valores abaixo de 1.0, incentivariam as partículas a explorar um espaço de profundidade, ou seja, fazendo com que os agentes se esforcem a encontrar uma área melhor. O uso deste novo parâmetro, proporcionou uma melhora no desempenho do algoritmo, além de desaparecer como mecanismos de controle da velocidade das partículas.

Além da modificação feita pelos autores Shi e Eberhart (1998), outra contribuição que modificou significativamente o algoritmo foi implementada por Clerc (1999), que teve o intuito de avaliar as características de convergência e estabilidade. Após diversas análises realizadas pelo autor, ele conseguiu confirmar que ao utilizar este novo parâmetro o enxame do algoritmo pode chegar a uma convergência mais rápida em uma região de ótimo. Além desta confirmação, outra comprovação pode ser consolidada: o ajuste da velocidade dos agentes (partículas) do enxame acontece de forma equilibrada, ou seja, a velocidade de locomoção dos indivíduos do enxame ocorre de maneira estável.

O fator de constrição proposto por Clerc (1999), apresenta uma estrutura de execução semelhante ao algoritmo original e ao algoritmo proposto por Shi e Eberhart (1998), com uma pequena alteração demonstrada nas Equações 3.13 a 3.16.

$$V_{id+k} = \zeta \times [V_{id} + C_1 \times rand() \times (P_{id} - X_{id}) + C_2 \times rand() \times (P_{gd} - X_{id})] \quad (3.13)$$

$$X_{id+k} = V_{id+k} + X_{id} \quad (3.14)$$

$$\phi = c_1 + c_2 \quad (3.15)$$

$$\zeta = \frac{2}{|2 - \phi - \sqrt{\phi^2 - 4\phi}|} \quad (3.16)$$

Sendo o fator de constrição ζ calculado pelas Equações 3.15 e 3.16, respectivamente. A

nova velocidade de atualização das partículas é dada pela Equação 3.13 com o fator adicionado. Já a Equação 3.14 é posição que a partícula vai permanecer no instante k . Para Clerc e Kennedy (2002) e Clerc (1999), só se tem convergência em um ponto quando $\phi > 4$. Por outro lado, se ϕ for menor ou igual a 4, as partículas se movimentarão de maneira vagarosa, fazendo com que não haja possibilidade de convergência no ponto, seja ele ponto de mínimo ou ponto de máximo. Ainda segundo Clerc (1999), os valores das variáveis c_1 e c_2 devem ser semelhantes e iguais a 2,05, enquanto que ϕ deverá ser igual ou maior que 4,1 e ζ , o fator de constrição, deverá ser 0,7298.

Além destas duas novas concepções, existem outras maneiras capazes de melhorar o desempenho deste algoritmo de otimização. A Tabela 3.1, mostra uma seleção de trabalhos realizados que propuseram outras modificações para este otimizador de problemas complexos.

Tabela 3.1: Modificações realizadas ao algoritmo do PSO.

Tipo de ajuste	Parâmetros	Referência
Adaptação do parâmetro utilizando função linear.	w	(Niknam e Farsani, 2010)
Ajuste do parâmetro utilizando um método de decremento linear.	w	Shi e Eberhart (1998)
Adaptação do peso de inércia através de uma função não linear utilizando um método determinístico.	w	(Jiao <i>et al.</i> , 2008)
Ajuste do parâmetro peso de inércia de forma constante	w constante	Shi e Eberhart (1998)
Ajuste dos parâmetros w utilizando o decremento linear em função ao número de iteração, c_1 com ajuste através das informações de P_{best} e G_{best} , c_2 incrementando através de uma função linear com base no número de iterações.	w, c_1 e c_2	(Ren e Wang, 2011)
Ajuste através de autômatos de aprendizagem para os parâmetros.	w, c_1 e c_2	(Hashemi e Meybodi, 2011)
Ajuste por meio de função linear	w, c_1 e c_2	(Yasuda e Iwasaki, 2004)

3.3 Otimização por Algoritmo Genético

O algoritmo genético é um método de buscas baseado nos processos de evolução natural. Este método trabalha com um conjunto de possíveis soluções para um dado problema, constituindo a população inicial. As variáveis do problema são representadas como genes em um cromossomo, também denominado indivíduo. Partindo de uma população inicial, os indivíduos com características genéticas melhores adaptadas possuem maiores chances de sobreviverem e de se reproduzirem.

Segundo Linden (2008), os GAs são métodos que não dependem da escolha do ponto inicial, aumentando as chances de se obter um ótimo global do sistema. Para que a população se diversifique e mantenha determinadas características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores, os operadores genéticos seleção, cruzamento e mutação são utilizados. Estes operadores transformam a população através de sucessivas gerações, estendendo a busca até chegar a um resultado satisfatório. A Figura 3.6 mostra de modo geral como estes operadores genéticos podem ser empregados.

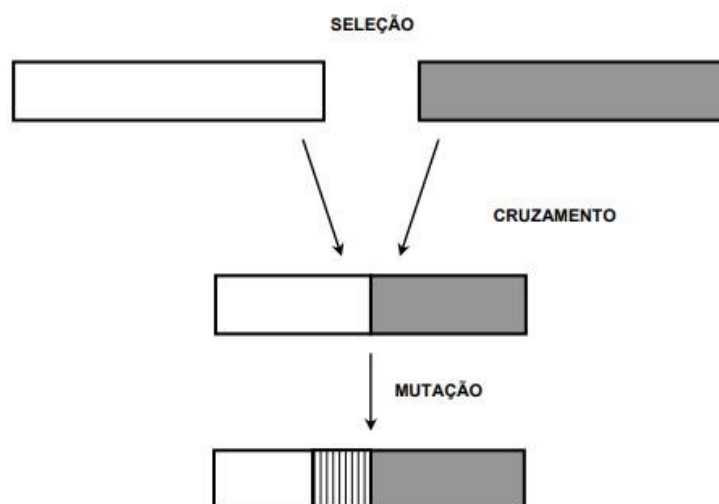


Figura 3.6: Operadores genéticos. Fonte: Lopes (2010).

3.3.1 Operadores genéticos

Seleção

O operador seleção é uma versão artificial do processo de seleção natural (Goldberg, 1989). Neste tipo de operador há a seleção dos indivíduos mais aptos da geração atual que são escolhidos para a próxima geração. A função que calcula a aptidão de cada indivíduo na população é conhecida como função de avaliação ou função *fitness*. Cada indivíduo da população atual de cromossomos é selecionado para ser usado como pais das próximas gerações.

Existem diversas técnicas de seleção, dentre elas há a seleção do tipo roleta (amostragem estocástica com substituição) que é a técnica mais difundida e utilizada (Spall, 2005). Neste tipo de seleção uma das seções da roleta (correspondendo a um indivíduo) é selecionada com uma probabilidade igual à área da seção. Outra técnica de seleção utilizada é a estocástica uniforme, onde os indivíduos da geração atual são escolhidos de forma aleatória para a reprodução. Existem ainda as técnicas de torneio que podem ser utilizadas na seleção dos indivíduos.

Uma forma de melhorar a convergência do GA é utilizando uma técnica denominada elitismo. Esta consiste em manter um dado número de indivíduos em cada geração que são passados diretamente para a próxima, garantindo a preservação deles (Spall, 2005).

Para Mirjalili (2019), o processo de seleção deve ser combinado com os processos de cruzamento e de mutação. Estes dois operadores estão descritos a seguir.

Cruzamento

Considerado o operador genético dominante, o cruzamento é utilizado para gerar uma nova população por meio da combinação de soluções (cromossomos). Um par de indivíduos é dividido em locais escolhidos aleatoriamente e seus materiais genéticos são recombinados formando novos indivíduos que, novamente, são avaliados e recebem um novo valor de aptidão individual.

Dentre as técnicas de cruzamento, tem-se: o cruzamento de um ponto, o de dois pontos, o espalhado (*scattered*) e o de heurísticas. Na primeira técnica um ponto de cruzamento é escolhido aleatoriamente (maior que zero e menor que o número de genes) e a partir deste, as informações genéticas dos pais são trocadas, formando dois filhos. O cruzamento de dois pontos corresponde a uma generalização da técnica explicada anteriormente. Nesta técnica, dois ou mais pontos são escolhidos aleatoriamente e as informações contidas entre esses pontos de corte são trocadas pelo casal, formando assim dois novos filhos. No cruzamento espalhado, um vetor aleatório binário é selecionado, atribuindo ao primeiro pai o valor 1 e ao segundo o valor 0. No cruzamento por heurística, um único filho é produzido de dois pais (Linden, 2008).

A escolha de qual técnica de cruzamento é utilizada depende do problema que está sendo analisado. Uma determinada técnica pode ser eficiente a um problema e ineficiente a outro.

Mutação

Este operador é utilizado para fornecer novas informações para as populações, ou seja, o operador mutação promove uma diversidade genética uma vez que a população inicial pode ser insuficiente de informações para encontrar a solução (Spall, 2005). Com o uso deste operador, uma maior varredura do espaço de busca é feita, evitando-se assim a convergência do algoritmo genético para os mínimos locais.

Existem as técnicas de mutação uniforme onde cada gene de um cromossomo possui exatamente a mesma chance de sofrer mutação, e a mutação gaussiana (normal) onde um número aleatório de uma distribuição normal com média zero é adicionada a entrada do vetor de indivíduos usados para gerar as próximas gerações.

3.3.2 Definições básicas

- **Função de avaliação (fitness):** Função que avalia a aptidão de cada indivíduo em cada geração do processo;
- **Gene:** Representação de cada parâmetro (variável) da solução. Registram as características dos indivíduos e são responsáveis por transmiti-las a seus descendentes;
- **Genótipo:** Constituição genética do indivíduo. Nos algoritmos genéticos, ele é responsável pela distribuição dos genes num cromossomo;
- **Fenótipo:** Cromossomo codificado;
- **Cromossomo:** Formado por um conjunto de genes, representando uma possível solução para o problema;
- **População:** Conjunto de cromossomos ou soluções no espaço de busca;
- **Operação genética:** Operações que o GA realiza sobre cada um dos cromossomos;
- **Geração:** Iteração completa do GA que gera uma nova população;
- **Espaço de busca (Região viável):** Compreende as possíveis soluções do problema a ser otimizado e é caracterizado pelas restrições impostas ao problema.

3.3.3 Um algoritmo genético simples

Existem diversas abordagens a respeito de como um GA pode ser implementado. Mitchell (1998), em seu livro, apresenta como um GA simples trabalha:

1. Gerar aleatoriamente uma população de cromossomos (possíveis soluções para o problema);
2. Calcular a aptidão de cada indivíduo na população, utilizando a função de avaliação;
3. Selecionar os cromossomos da população atual que formarão os descendentes da próxima geração. Aplicar os operadores cruzamento e mutação sobre os cromossomos selecionados para criar a próxima geração de cromossomos;
4. Substituir a população atual pela nova população gerada;
5. Se o método convergir, termine o processo e retorne ao melhor indivíduo gerado. Caso não convirja, volte ao passo 2.

A cada iteração, uma nova população é criada e esta deve representar uma melhor aproximação da solução do problema de otimização. O algoritmo converge quando algum critério de parada é verificado. O fluxograma na Figura 3.7 representa o GA simples.

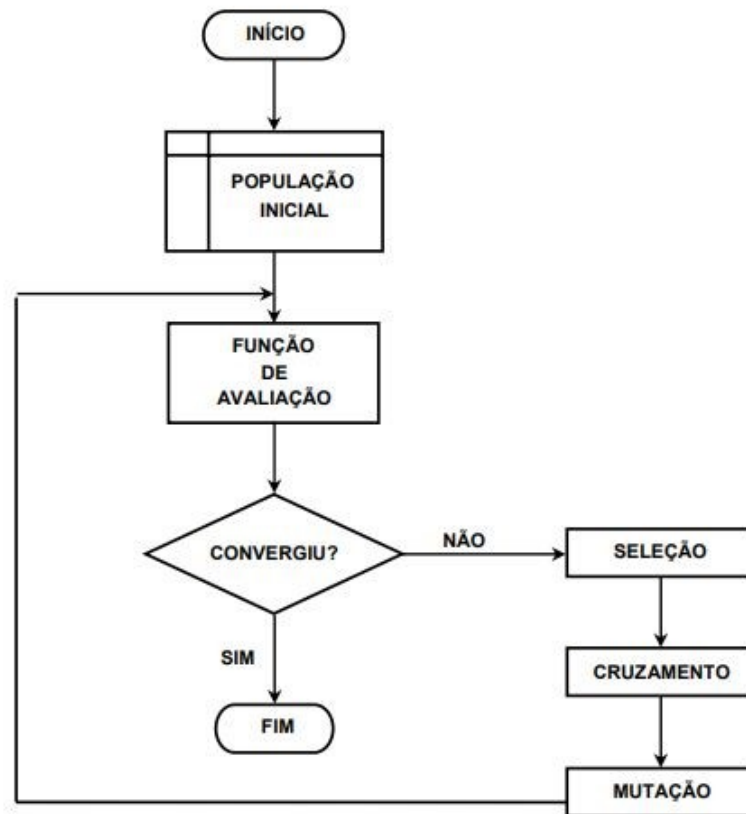


Figura 3.7: Fluxograma do GA. Fonte: Lopes (2010).

3.3.4 Parâmetros do algoritmo genético

Um cromossomo pode ser representado como uma cadeia de *bits*, um vetor com números de dupla precisão (*double*) ou outro tipo de representação que dependerá do problema em estudo. Existem vários parâmetros do GA que influenciam no comportamento do método. Os parâmetros mais importantes são: o tamanho da população, o número de gerações, a probabilidade de cruzamento (*crossover*) e a probabilidade de mutação. A influência de cada parâmetro no desempenho do algoritmo também dependerá do problema de aplicação. A tarefa de escolha da melhor configuração para os parâmetros é árdua e dependerá da realização de um grande número de experimentos e testes.

O tamanho da população indica o número de cromossomos que há em cada população, definindo o espaço de busca do problema, dessa forma, influenciando diretamente o desempenho global do método. Quando este parâmetro é alto, mais o espaço de busca do problema é

varrido, mas apresentará um alto custo computacional para realizar muitas avaliações da função de aptidão. Por outro lado, quando o parâmetro é pequeno, o desempenho do algoritmo diminui.

3.3.5 Algoritmo genético via MATLAB

O *software* Matlab possui a *Genetic Algorithm and Direct Search toolbox* que tem a função "ga" responsável por encontrar o mínimo de uma função usando algoritmo genético. A configuração dos parâmetros do GA pode ser fornecida por meio da função *gaoptimset*. Então, diferentes opções de configuração podem ser feitas de forma a adequá-las a cada problema.

Alguns critérios de parada disponíveis para o GA são:

- Máximo número de gerações;
- Tempo máximo para o GA rodar antes de parar;
- Parada do GA quando não há melhoramento do melhor valor de aptidão para o número de gerações; ou
- Parada do GA quando não há melhoramento do melhor valor de aptidão para um dado intervalo de tempo

Existem outros parâmetros que podem ser configurados, tais como: a função de cruzamento (*CrossoverFcn*), a função de mutação (*MutationFcn*), a taxa de cruzamento (que se relaciona com a taxa de mutação, sendo esta última de valor menor), a população inicial, o número de gerações, o tamanho da população, entre outras. A função *gaoptimset* fornece também os tipos de populações (*PopulationType*), ou seja, o tipo de dados de entrada que o GA suporta, tais como, *double*, *bit*, ou algum outro tipo de população definido pelo usuário. Enfim, a configuração dos parâmetros do GA depende do problema sob estudo.

3.3.6 Tratamento das restrições

Embora o algoritmo genético seja um método irrestrito, problemas restritos podem ser transformados em problemas sem restrição por meio de métodos de penalização. Existem dois métodos de penalização: o método das barreiras e o método das penalidades. O primeiro impõe uma penalidade para o alcance do contorno de uma restrição de desigualdade, enquanto o segundo impõe uma penalidade para a violação de uma restrição. Ao contrário do método das barreiras, no método das penalidades, o ponto de partida do método não tem necessidade de estar na região viável do problema (Nash, 1996).

O método das penalidades transforma problemas restritos em outros irrestritos pela adição de uma função penalidade com as restrições violadas, sendo estas restrições de igualdade ou desigualdade. O problema geral de otimização (restrita) é dado conforme a Equação 3.17:

$$\begin{aligned} \min f(x), x \in \mathbb{R}^n \\ g_j(x) \leq 0, j = 1, \dots, n \\ h_i(x) = 0, i = 1, \dots, l \end{aligned} \quad (3.17)$$

Transformando o problema apresentado na Equação 3.17 em um problema irrestrito, a nova função objetivo do problema penalizado possui a forma da Equação 3.18.

$$F(x, \rho) = f(x) + 0,5\rho P(x) \quad (3.18)$$

onde ρ corresponde ao fator de penalização imposto a violação das restrições do problema e $P(x)$ a função de penalização, dada conforme a Equação 3.19.

$$P(x) = \sum_{j=1}^n \{\min[0 - g_j(x)]\}^2 + \sum_{i=1}^l [h_i(x)]^2. \quad (3.19)$$

O primeiro somatório indica que deve ser levado em conta o menor valor entre 0 e $-g_j(x)$. Se há a violação da restrição imposta ao problema, ou seja, $g_j(x) > 0$, a restrição violada é penalizada por um fator de $0,5\rho$. O segundo somatório corresponde a violação das restrições de igualdade.

No presente trabalho, o algoritmo de enxame de partículas será utilizado para realizar otimizações mono-objetivas, enquanto o algoritmo genético será utilizado para otimização multi-objetivo.

3.4 Planejamento de Experimentos

Segundo Montgomery (2017), experimento é um ou vários testes onde são feitas modificações nas variáveis de entrada de um processo a fim de observar as mudanças que ocorrem na resposta. Ou seja, é analisado como uma mudança na variável de entrada influencia na resposta final. O autor relata que para entender as relações de causa e efeito em um sistema, devem-se executar mudanças nos *inputs* para que seja possível observar o comportamento dos *outputs*.

O processo de planejar experimentos de forma que seja possível colher dados apropriados e, posteriormente, realizar uma análise estatística, resultando em conclusões válidas e objetivas é denominado planejamento de experimentos (*Design of Experiments* - DOE). Deste modo, tem-se duas etapas fundamentais para o DOE: Planejamento de experimentos e análise de dados; estes estão intimamente relacionados, visto que o método de análise depende diretamente do projeto utilizado (Montgomery, 2017).

Alguns conceitos sobre planejamento de experimentos serão abordados nos próximos itens para facilitar o entendimento das seções subsequentes.

3.4.1 Fatores

O fator é um parâmetro ou uma variável de entrada que será alterado durante os experimentos de acordo com um arranjo pré-definido pelo DOE (Kleijnen, 1998).

Existem dois tipos de fatores: controlável ou incontrolável. Fatores controláveis estão sob controle do experimentador, nos experimentos deste trabalho foram utilizados esse tipo de fator. Já os fatores incontroláveis, segundo Dean *et al.* (2015), podem ser analisados por meio da análise de covariância, usado frequentemente para compensar seus efeitos. Um exemplo de fator incontrolável é o ruído que tem interferência no processo, mas não faz parte do arranjo experimental.

Os fatores controláveis, nos experimentos utilizando simulação, são mais relevantes para as decisões que devem ser feitas sobre a implementação de sistemas. Os fatores também podem ser classificados como quantitativos e qualitativos. Os fatores quantitativos são os que têm valores numéricos. Já os qualitativos representam considerações estruturais que não são normalmente quantificadas (Montgomery, 2017).

3.4.2 Níveis

Segundo Dean *et al.* (2015), dentro de um mesmo fator pode haver variações denominadas níveis. Ou seja, quais valores podem assumir um mesmo fator no arranjo experimental. Quando os níveis de todos os fatores são combinados tem-se um cenário. Se a quantidade de fatores é elevada, usa-se, normalmente, apenas dois níveis, sendo um positivo e outro negativo, a fim de se diminuir a quantidade de experimentos.

3.4.3 Respostas

A variável resposta é conseguida com a realização do experimento para uma determinada combinação de fatores. Ou seja, ela é a variável que descreve o comportamento do sistema para cada configuração.

3.4.4 Efeitos

Segundo Montgomery (2017), o efeito é a mudança na resposta produzida pela mudança no nível do fator. Sendo que, existem os efeitos principais que são referidos aos efeitos dos fatores individualmente e os efeitos combinados que são os efeitos das interações entre os fatores. Dentro da simulação, os efeitos devem ser medidos por métodos estatísticos, a fim de definir os efeitos matemáticos de cada fator (Montgomery *et al.*, 2000).

3.4.5 Interação

Interação é quando a modificação de um fator interfere na resposta de outro fator, ou seja, a resposta do sistema tem certa dependência de como ambos fatores estão configurados. Algumas definições são listadas a seguir:

- A interação acontece quando um fator falha em produzir o mesmo efeito na resposta quando se varia o outro fator em diferentes níveis (Montgomery, 2017).
- A interação ocorre quando há sinergia entre os fatores, levando ao fenômeno de que o efeito da soma dos fatores que tem interação pode ser maior que a soma do efeito de cada fator isoladamente (Dean *et al.*, 2015).
- A interação acontece quando os efeitos de dois fatores não são apenas a soma dos efeitos de cada fator. Nos casos onde há uma forte interação, os efeitos principais ou isolados apresentam pouco significado, uma vez que estes estão mascarados. Contudo o que terá um maior efeito é, justamente, a interação entre esses dois fatores (Montgomery *et al.*, 2000).

3.4.6 Características gerais do DOE

Para utilizar o DOE é necessário que o experimentador conheça profundamente o fenômeno ou modelo que se pretende estudar, como os dados serão coletados, sendo também necessário conhecimento sobre as ferramentas de análise estatística utilizadas. Para uma melhor condução do DOE, Montgomery *et al.* (2000) sugere que o planejamento de experimentos seja dividido nas seguintes etapas:

- Definição do problema;
- Escolha dos fatores e definição dos níveis de trabalho;
- Seleção das variáveis de resposta;

- Escolha do projeto experimental;
- Execução dos experimentos;
- Análise estatística dos dados;
- Conclusão e recomendações.

Segundo Dean *et al.* (2015), os elementos básicos que compõem o planejamento de experimentos são:

- Fatores controlados: variáveis que podem ser modificadas durante os experimentos para determinar a influência nas saídas;
- Fatores não controlados: variáveis que deveriam permanecer constantes durante os experimentos, mas de alguma forma variam alterando as saídas;
- Respostas: saídas que deverão ser otimizadas;
- Modelo: consiste na equação que relaciona as respostas com as variáveis do processo.

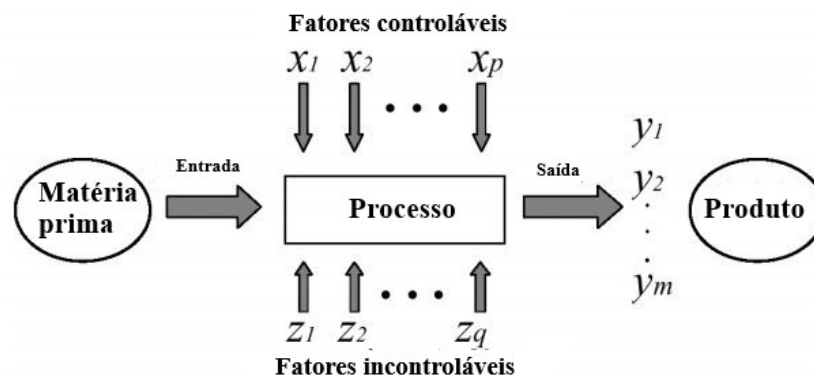


Figura 3.8: Modelo geral de um processo. Fonte: Adaptado de (Montgomery *et al.*, 2000)

O planejamento de experimento engloba diversos arranjos, dentre eles: Arranjo Fatorial Fracionado, Arranjo Fatorial Completo, Arranjo de Taguchi e Arranjo de Superfície de Resposta. Diante disso, Júnior (2003), baseado nos autores (Box e Draper, 1987) e (Montgomery *et al.*, 2000), resumiu as características dessas técnicas principais, como pode ser visto na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Comparação dos arranjos para o planejamento de experimentos. Fonte: (Júnior, 2003)

Arranjo	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Taguchi	Permite a análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos.	Fornecer uma ideia do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis.	Processos em que há pouco ou quase nenhum conhecimento sobre o processo.
Fatorial Fracionado	Permite uma pré-análise do processo com um número reduzido de experimentos.	Não promove a varredura completa da região experimental.	Processos em que se deseja um pré-conhecimento e em que a literatura é limitada.
Fatorial Completo	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis.	Não identifica variação intermediária e necessita de um alto número de experimentos para problemas com grande número de variáveis.	Processos em que já se tem um prévio domínio e em que a realização dos experimentos não demanda maior tempo ou custo.
Superfície de Resposta	Permite a verificação de variações intermediárias do processo.	Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos axiais, já que são realizadas poucos experimentos nesses níveis.	Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão.

Dentre os arranjos experimentais apresentados acima, o presente trabalho utilizou o Arranjo de superfície de resposta.

3.4.7 Metodologia de superfície de resposta

Segundo Anderson e McLean (2018), Montgomery (2017) e Dean *et al.* (2015), Metodologia de Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology - RSM*) é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas para desenvolver, melhorar e otimizar processos, especialmente, em situações em que a resposta de interesse é influenciada por muitas variáveis de entrada.

De acordo com Anderson e McLean (2018), na maioria dos problemas analisados, a relação entre a resposta e as variáveis independentes é desconhecida. Sendo assim, o primeiro passo é encontrar uma aproximação adequada para representar a resposta de interesse em função do conjunto de variáveis independentes. Geralmente, uma função polinomial de ordem mais baixa é apropriada para descrever tais relações; se a resposta for devidamente modelada por uma função linear, então a relação aproximada pode ser representada por um modelo de primeira ordem,

mostrado na Equação 3.20.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (3.20)$$

Sendo:

y - Resposta de interesse;

x_i - Variáveis independentes;

β_i - Coeficientes a serem estimados;

k - Número de variáveis independentes;

ϵ - Erro experimental;

Com frequência, de acordo com Montgomery (2017), o sistema apresenta curvatura tal que o modelo de primeira ordem se torna inadequado. Deste modo, um polinômio de maior grau é necessário para representar a relação entre a resposta e as variáveis independentes, como o modelo de segunda ordem apresentado pela Equação 3.21.

$$y = \beta_0 + \sum_i^k \beta_i x_i + \sum_i^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3.21)$$

Quase todos os problemas de superfície de resposta utilizam um ou ambos os modelos apresentados anteriormente. É improvável que um modelo polinomial se constitua em uma aproximação adequada para todo o espaço experimental coberto pelas variáveis independentes; todavia, para uma região específica, estes modelos funcionam muito bem (Montgomery, 2017). A Figura 3.9 mostra a imagem de uma superfície de resposta.

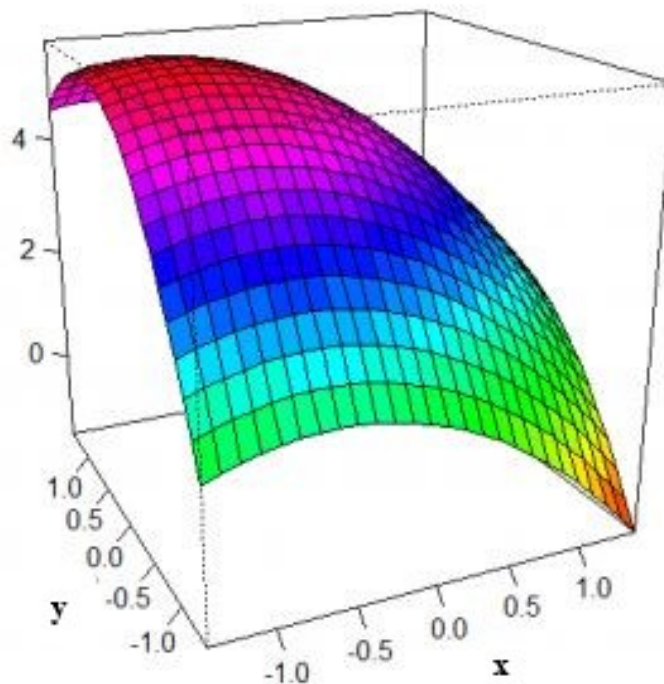


Figura 3.9: Superfície de resposta tridimensional não plana. Fonte: (Comparini *et al.*, 2012)

Por meio da Figura 3.9, é evidente que, tomando um nível baixo de x e um nível alto de y , são obtidas respostas mais otimizadas. Além disso, o ponto ótimo está na parte superior esquerda.

O método dos Mínimos Quadrados Ordinários (Ordinary Least Squares - OLS) é geralmente empregado para a estimação dos coeficientes definidos pelos modelos das Equações 3.20 e 3.21 (Dean *et al.*, 2015). A análise da superfície de resposta é então feita através de uma superfície ajustada; se a superfície ajustada for uma aproximação adequada do modelo real, a análise dessa superfície será aproximadamente equivalente à análise da superfície real. É necessário utilizar um arranjo experimental adequado para coletar os dados a fim de se estimar os coeficientes do modelo da melhor maneira.

Segundo Anderson e McLean (2018), quando se está em uma região experimental distante do ponto de ótimo, a curvatura do sistema é bem pequena, sendo o modelo de primeira ordem adequado para representar a relação entre a resposta e as variáveis independentes. Deve-se, portanto, caminhar em direção à região de ótimo e, uma vez encontrada tal região, um modelo quadrático deve ser utilizado.

Estrutura de uma Metodologia de Superfície de Resposta

O objetivo primordial de uma Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é determinar as condições ótimas de operação para um sistema ou determinar a região na qual os requisitos

operacionais são satisfeitos. Montgomery (2017) e Dean *et al.* (2015) explicam que, em um primeiro momento, geralmente se tem pouco conhecimento acerca do processo que está sendo modelado; sendo assim, é necessário conduzir experimentos exploratórios, chamados de experimentos de *Screening*, com a finalidade de investigar quais são as variáveis que influenciam a resposta e eliminar aquelas que não são consideradas importantes; deste modo, reduz-se a lista de variáveis que podem ser significativas para que os experimentos subsequentes possam ser mais eficientes e exigir menos testes. Os autores se referem aos experimentos de *Screening* como a Fase Zero de um estudo de superfície de resposta.

Geralmente, utiliza-se o Arranjo Fatorial Completo tanto para confirmar as variáveis independentes importantes quanto para, através da adição de pontos centrais, investigar a região de curvatura em que se encontra o ponto ótimo. De acordo com Selvamuthu e Das (2018), os pontos centrais são pontos intermediários aos níveis dos fatores e são utilizados para avaliar a existência de curvatura.

Um estudo de superfície de resposta começa quando o processo está configurado para ser executado na região de ótimo. Objetiva-se a obtenção de um modelo que será uma aproximação precisa do modelo real dentro de uma região relativamente pequena em torno do ponto de ótimo. Devido ao fato de que a superfície de resposta real apresenta curvatura próximo ao ponto de ótimo, um modelo de segunda ordem será usado. Uma vez definido um modelo polinomial adequado, este deve ser analisado para determinar a condição ótima para a operação do processo (Selvamuthu e Das, 2018).

Uma das maneiras para a obtenção da superfície de resposta propriamente dita é o emprego de um Arranjo Composto Central (*Central Composite Design - CCD*). De acordo com Dean *et al.* (2015), este é o arranjo mais amplamente utilizado para ajustar uma superfície de resposta. Geralmente, o CCD para k fatores é uma matriz composta por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo (2^k) ou fracionado (2^{k-p}), sendo p a fração desejada do experimento; um grupo de pontos axiais ($2k$); e um conjunto de pontos centrais (m). O número de pontos axiais em um CCD é igual ao dobro do número de fatores e representa seus valores extremos. De acordo com o posicionamento dos pontos axiais, o CCD pode ser circunscrito, inscrito ou de face centrada. Na Figura 3.10, encontra-se um exemplo de um Arranjo Composto Central circunscrito.

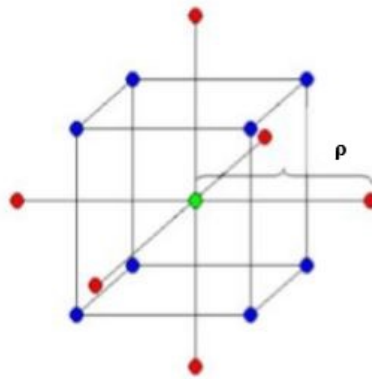


Figura 3.10: Arranjo CCD com três variáveis Fonte: (Montgomery, 2017)

O Arranjo Composto Central circunscrito corresponde ao CCD original; é aquele em que os pontos axiais se encontram a uma distância α dos centrais. Este tipo de arranjo explora o maior espaço experimental possível. Segundo Montgomery (2017), o valor de α depende do número de experimentos da porção fatorial do CCD; por conseguinte, $\alpha = \sqrt[4]{2^k}$, em que k é o número de fatores analisados.

Após a obtenção do modelo, deve-se proceder a avaliação da adequação do mesmo ao sistema real através de uma Análise de Variância (ANOVA). A ANOVA, além de avaliar se o modelo é estatisticamente significativo, permite verificar quais os termos deste modelo são significativos e quais podem ser removidos. Para testar a significância do modelo e de seus termos, pode-se utilizar a abordagem do p - *value* para se fazer testes de hipóteses; rejeita-se a hipótese nula de que o modelo ou termos específicos não são significantes caso p - *value* seja menor que o nível de significância escolhido (geralmente, $\alpha = 0,05$). Além disso, o ajuste dos modelos é dado através do coeficiente de determinação (R^2), que representa o percentual de variação na resposta que é explicado pelo modelo conceitual. Entretanto, um alto valor de R^2 não implica necessariamente em um bom modelo, visto que a adição de variáveis ao modelo sempre irá aumentar tal coeficiente de determinação, independentemente de a variável adicionada ser ou não estatisticamente significativa. Devido a esse fato, na maioria das vezes, opta-se pelo uso do coeficiente R^2 ajustado (R_{adj}^2), que não aumenta sempre que uma variável é adicionada ao modelo; se um termo desnecessário é adicionado, o valor de R_{adj}^2 diminui (Dean *et al.*, 2015). Com o modelo de superfície de resposta ajustado, é possível prosseguir para a otimização do processo e validação dos resultados.

O presente trabalho fará uso da técnica de superfície de resposta para encontrar um modelo que represente as respostas para uma estrutura de travessas rígidas e, posteriormente, utilizará o PSO e o GA para achar configurações ótimas do tubo protético. Será aplicado o método tradicional do PSO (sem nenhuma modificação), por se tratar de um abordagem mais comum utilizada pela literatura.

Capítulo 4

Metodologia

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 planejamento de experimentos e simulação numérica até chegar ao processo de otimização.

4.1 Materiais

Os materiais utilizados para construir o modelo numérico foram baseados nos ensaios experimentais realizados por Junqueira *et al.* (2019). Dessa forma, o material utilizado para a construção da camada interna estrutural dos tubos protéticos de travessas rígidas foi o polímero ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) e este encontra-se comercialmente em forma de filamento para impressora 3D. O filamento possui diâmetro de 2,85 mm 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 4.1.

Tabela 4.1: Propriedades mecânicas do ABS pelo processo de impressão 3D. Fonte: (Cantrell *et al.*, 2017)

Propriedades	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^3	0,80 ± 0,35

Para realizar a simulação numérica da estrutura de travessas rígidas foi necessário o levantamento das propriedades do material compósito. Assim, utilizou-se propriedades mecânicas de

um material, similar ao utilizado neste trabalho, obtidas pelo estudo de Madhavi (2009), mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Propriedades do compósito de fibra de carbono T300 Unidirecional/resina epóxi LY556/HT972. Fonte: Adaptado de (Madhavi, 2009)

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

4.2 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 três etapas: seleção dos tipos de configurações das travessas rígidas, projeto das estruturas e modelagem computacional para simulação numérica pelo método dos elementos finitos.

As condições de carregamento para a validação do projeto baseiam-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 4.3. Neste trabalho foram realizadas análises estáticas (Compressão, torção e flambagem) e dinâmicas (análise modal).

Tabela 4.3: Condições de carga para o nível A100 da norma. Fonte: Autor.

Ensaio estático	Comprovação	Falha
Compressão	2240 N	4480 N
Torção		7,1 N·m

4.3 Seleção das Configurações das Estruturas de Travessas Rígidas

A seleção dos tipos de configurações das travessas rígidas e consequente aplicação destas estruturas como tubos para próteses de membros inferiores basearam-se na literatura. Alguns autores (Sorrentino *et al.*, 2016); (Vasiliev *et al.*, 2001); (Vasiliev e Razin, 2006); (Junqueira *et al.*, 2018) estudaram as estruturas de travessas rígidas em função do ângulo ϕ das travessas helicoidais. Em virtude destes estudos, o presente trabalho buscou variar o ângulo numa região próxima a que já foi estudada por outros autores.

Vasiliev e Razin (2006) estudou uma estrutura *isogrid* e afirmou que 26° é o ângulo ótimo para estruturas de travessas rígidas sendo solicitadas por esforços predominantemente de compressão.

Sorrentino *et al.* (2016) estudou e afirmou que 30° é o ângulo ótimo para estruturas de travessas rígidas sendo solicitadas por esforços predominantemente de compressão.

Junqueira *et al.* (2019) estudou a influência de um ângulo maior nas propriedades da estrutura solicitada por multi-carregamentos e adotou uma configuração com 40° . Ele concluiu que essa configuração é mais eficiente do que a proposta por Vasiliev e Razin (2006) e por Sorrentino *et al.* (2016).

Desta forma, neste trabalho, o autor adota que o ângulo das travessas helicoidais varie de 20° a 50° quando a estrutura está com o reforço interno. Nesse intervalo está englobado os três estudos feitos anteriormente e ainda é possível avaliar o desempenho com um ângulo maior do que o de 40° adotado por Junqueira *et al.* (2019) e com ângulo menor do que 26° adotado por Vasiliev e Razin (2006). Já para o *isogrid* sem o reforço, o ângulo da helicoidal será variado entre 20° e 40° devido a maior sensibilidade da estrutura a ângulos grandes, como será mostrado mais adiante.

O único estudo até a presente data sobre estruturas de travessas rígidas, utilizando materiais compósitos, aplicadas a tubo protético foi feito por Junqueira *et al.* (2019). A largura adotada por ele corresponde à largura do filamento contínuo de fibra de carbono utilizado na construção do tubo. Segundo o autor, em virtude do pequeno diâmetro da estrutura, o aumento da largura das travessas implicaria em um aumento da superfície e consequente aumento de massa, indo contra os objetivos do trabalho. Com essa justificativa, Junqueira *et al.* (2019) adotou as larguras como sendo 4mm.

No presente trabalho, pretende-se variar a largura para avaliar qual o valor ótimo para este parâmetro. Por isso, a variação entre 2mm e 6mm será adotado pelo autor para avaliar a mudança tanto para menos quanto para mais do valor adotado por Junqueira *et al.* (2019). Alguns outros parâmetros para construir o tubo protético e suas respectivas justificativas estão mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Parâmetros para a construção do tubo protético. Fonte: Autor.

Variável	Valor	Justificativa
Diâmetro (D)	30 mm	O valor do diâmetro foi escolhido em função dos diâmetros dos tubos protético presentes comercialmente e na literatura.
Comprimento (L)	300 mm	O valor do comprimento foi escolhido baseado nos comprimentos dos tubos protético presentes comercialmente e na literatura
Ângulo na presença de reforço interno (ϕ_R)	20° a 50°	Conforme explicado anteriormente nesta seção
Ângulo na ausência de reforço interno (ϕ)	20° a 40°	Conforme explicado anteriormente nesta seção
Largura das travessas helicoidais (δ_h)	2 mm a 6 mm	Conforme explicado anteriormente nesta seção
Largura das travessas circulares (δ_c)	2 mm a 6 mm	Conforme explicado anteriormente nesta seção
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 4.2
Módulo de Elasticidade das travessas circulares (E_c)	144 GPa	Tratando-se do mesmo material utilizado para as travessas rígidas helicoidais, Idem Justificativa 5
Tensão de Ruptura (σ)	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 4.2
Massa específicas das travessas helicoidais (ρ_h)	1,35 g/cm ³	A massa específica adotada corresponde à massa específica do compósito de fibra de carbono/resina epóxi e possui referência da literatura na Tabela 4.2
Massa específicas das travessas circulares (ρ_c)	1,35 g/cm ³	Tratando-se do mesmo material utilizado para as travessas rígidas helicoidais, Idem Justificativa 9

Para todas as estruturas adotou-se o valor de 6 travessas rígidas helicoidais, sendo que cada configuração possui quantidades diferentes de travessas rígidas circulares. Isto ocorre devido ao ângulo 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 4.1, a quantidade de travessas circulares das estruturas com ângulo de 26°, 30° e 40° foram de 11, 13 e 18 respectivamente.

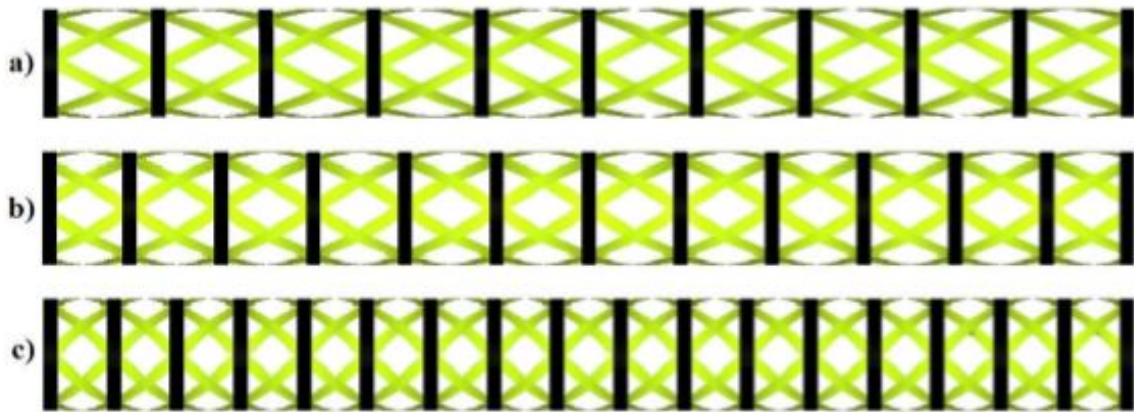


Figura 4.1: Representação da estrutura com ângulo das travessas helicoidais igual a a) 26°, b) 30° e c) 40°. Fonte: Junqueira *et al.* (2019)

4.4 Modelagem da Estrutura

A estrutura foi pré-processada, processada e pós-processada utilizando como ferramenta um *software* comercial de elementos finitos. Este consiste de um programa para modelagem em elementos finitos que engloba desde a geração da malha, passando pela criação das propriedades e materiais, chegando a aplicação das condições de contorno do projeto como os carregamentos e restrições e o cálculo dos resultados.

Inicialmente, para realizar uma análise utilizando o método dos elementos finitos, deve-se por meio de um pré-processador, criar uma parametrização, que define as dimensões geométricas, ou seja, delimitam o corpo em análise. A curva é gerada a fim de se obter um elemento geométrico de área nas dimensões do corpo de prova, ou seja, uma estrutura com travessas helicoidais e circulares.

Logo após a construção geométrica do corpo, é feita ainda no pré-processador, a escolha do tipo de elemento finito em conformidade com o material em análise, sendo que para este trabalho, define-se um elemento com oito nós, apresentado na Figura 4.2. Esse elemento é adequado para modelar estruturas de placas finas a moderadamente espessas, apresentando bons resultados nas análises de deformação.

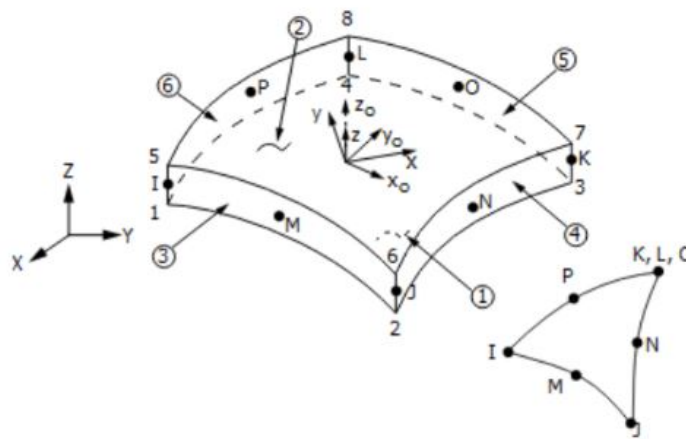


Figura 4.2: Geometria do elemento utilizado neste trabalho. Fonte: Mandal e Ray (2015)

A partir daí implementa-se as constantes de engenharia fornecidas pela Tabela 4.2. Define-se a seguir que o corpo de prova a ser estudado é composto de sete lâminas de 0,2 mm de espessura cada, perfazendo um total de 1,4 mm de espessura do laminado, bem como se define também as direções das fibras de carbono em cada lâmina. 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 4.3 mostra a direção das fibras.

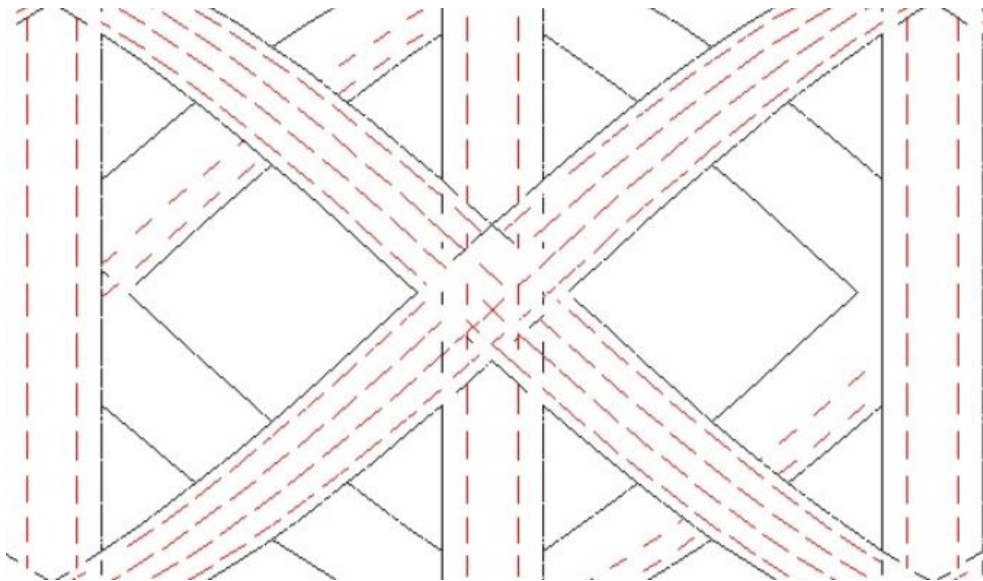


Figura 4.3: Direção das fibras. Fonte: Autor.

Para a criação das propriedades da camada interna do tubo protético, os valores inse-

ridos estão dispostos na Tabela 4.1 deste capítulo. 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. Este procedimento de modelagem foi adotado para todas as estruturas propostas por este trabalho. A Figura 4.4 mostra o reforço interno da estrutura.

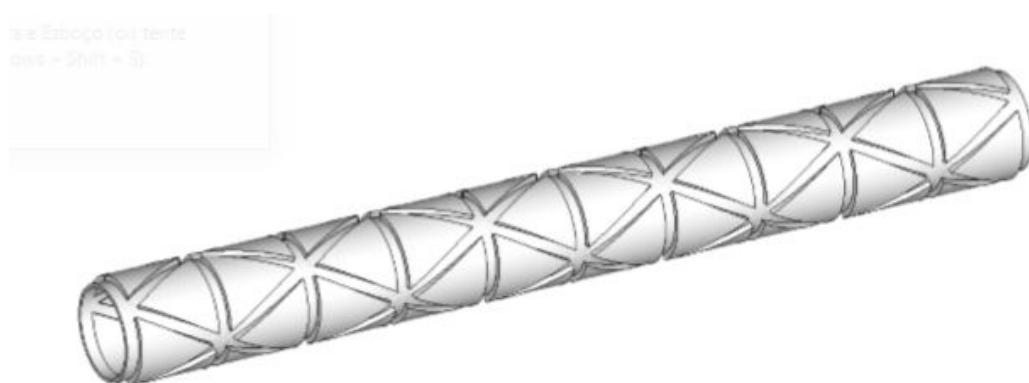


Figura 4.4: Camada interna da estrutura. Fonte: Autor.

Baseado no melhor custo/convergência, testado com vários tamanhos de malha diferentes, foi definido o tamanho médio do elemento como sendo 0,85 mm quando é só o *isogrid* e 0,9 mm para o *isogrid* e 1,2 mm para o reforço quando eles estão juntos.

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 4.3. Para a aplicação da restrição nas estruturas, em todas as análises, os nós dos elementos das duas extremidades foram restringidos em todos seus graus de liberdade tanto em translação quanto em rotação, porém, é importante ressaltar que o movimento causado pelo carregamento é liberado.

Ainda no pré-processador implementa-se no programa as tensões de resistência do material, retirados da Tabela 4.2, para posterior análise do critério de falha de Tsai-Wu. Método este largamente utilizado e indicado por diversos estudiosos na análise de falha de materiais compósitos.

Após a definição das condições de contorno, foi selecionado o critério de falha de Tsai-Wu (Tsai e 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 em materiais anisotrópicos. Resumidamente, uma laminado viria a falhar segundo a Equação 4.1.

$$F = F_1\sigma_1 + F_{11}\sigma_1^2 + F_2\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{66}\tau_{12}^2 < 1.0 \quad (4.1)$$

Os coeficientes F_{ij} do critério de falha de Tsai-Wu são relacionados aos parâmetros de resistência de material da lâmina e são determinados por experimentos. Eles são calculados a partir das seguintes fórmulas:

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{X_{1T}} - \frac{1}{Y_{1C}}; \\ F_{11} &= \frac{1}{X_{1T}Y_{1C}}; \\ F_2 &= \frac{1}{X_{2T}} - \frac{1}{Y_{2C}}; \\ F_{22} &= \frac{1}{X_{2T}Y_{2C}}; \\ F_{66} &= \frac{1}{S_{12}^2}; \\ F_{12} &= \frac{1}{2P^2} \left[1 - P \left(\frac{1}{X_{1T}} - \frac{1}{Y_{1C}} + \frac{1}{X_{2T}} - \frac{1}{Y_{2C}} \right) - P^2 \left(\frac{1}{X_{1T}Y_{1C}} + \frac{1}{X_{2T}Y_{2C}} \right) \right] \end{aligned}$$

Sendo σ_1 , σ_2 e τ_{12} as tensões principais, $P = \sigma_1 = \sigma_2$ assumindo tensões biaxiais, X_{1T} é resistência à tração do material laminado na direção da fibra, Y_{1C} é resistência à compressão do material laminado na direção da fibra, X_{2T} é a resistência à tração do material laminado transversal a direção da fibra, Y_{2C} é resistência à compressão do material laminado transversal a direção da fibra e S_{12} é a resistência ao cisalhamento do laminado (TSAI; WU, 1971).

Este critério leva em consideração a energia de esforço total (ambas as energias de distorção e de dilatação) para prever falhas. Ele é mais geral do que o critério de falha de Tsai-Hill porque distingue entre as resistências a falhas de compressão e de tensão. Junqueira *et al.* (2019) utilizou o critério de Tsai-Wu em seu projeto e, para efeito de comparação entre os resultados deste trabalho e os resultados obtidos por ele, o Tsai-Wu também será adotado no presente estudo.

Para obter a carga de flambagem linear, as estruturas foram considerados engastados na base, sendo que no topo apenas o grau de liberdade correspondente à translação no sentido longitudinal, foi liberado. Para o cálculo das tensões de flambagem foi utilizado a mesma carga que a norma recomenda para o ensaio de compressão, ou seja, 4480 N. O *software* utilizado fornece, como saída de resultados, o autovalor associado à carga de flambagem correspondente a cada configuração de tubo. Dessa maneira, o problema de flambagem linearizado é colocado na forma de um problema de autovalor mostrado na Equação 4.2.

$$[[K] - \lambda[K_G]]\{\theta\} = 0 \quad (4.2)$$

Sendo $[K]$ a matriz de rigidez global da estrutura e $[K_G]$ a matriz de rigidez geométrica global da estrutura que é proporcional à força inicial F_i . O autovetor θ define o modo de flambagem e o autovalor λ está relacionado com a carga de flambagem, C_{cr} , conforme a Equação 4.3.

$$C_{cr} = \lambda \cdot F_i \quad (4.3)$$

Foi realizado simulações numéricas para cada estrutura proposta por este trabalho e para cada tipo de carregamento de acordo com a norma. Para calcular os resultados foi utilizado o 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. Em todas as simulações foi considerado apenas o regime elástico dos materiais.

Com intuito de validar o modelo desenvolvido, foi feito um levantamento de todos os dados apresentados por Junqueira *et al.* (2019) em seu trabalho experimental. Uma discussão quanto a estes dados foi apresentada no Capítulo 5 desta dissertação.

4.5 Planejamento Experimental

Para a condução da pesquisa experimental, foram seguidos os passos recomendados por diversos autores como Antony e Frangou (1998); Haaland e Oconnell (1993); Colombari (2004) e Galdámez (2002), cujas etapas recomendadas são as seguintes:

1. Definição dos objetivos do experimento;
2. Definição dos fatores do experimento;
3. Seleção dos níveis dos fatores de controle;
4. Seleção das variáveis de resposta;
5. Seleção da matriz experimental;
6. Processamento das amostras;
7. Análise dos dados;
8. Interpretação dos resultados.

Segundo os autores citados, o cumprimento destas etapas garante ao experimento uma maior organização trazendo uma maior confiabilidade das informações e, com isso, melhores análises. A seguir, será apresentado a descrição de cada uma destas etapas, aplicados ao objeto de estudo desta pesquisa.

4.5.1 Definição dos objetivos do experimento.

O objetivo deste experimento é encontrar equações que descrevem o problema proposto e otimizá-las para encontrar a melhor configuração de um tubo protético de estrutura de travessas rígidas.

4.5.2 Definição dos fatores do experimento.

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 ϕ das travessas helicoidais em relação ao eixo axial da estrutura;
- A largura δ_c e δ_h das travessas circulares e helicoidais, respectivamente;
- A distância α_c e α_h das travessas circulares e helicoidais, respectivamente, em relação ao eixo axial da estrutura.

A Figura 4.5 ilustra a localização das oito variáveis de projeto propostas por Vasiliev e Razin (2006).

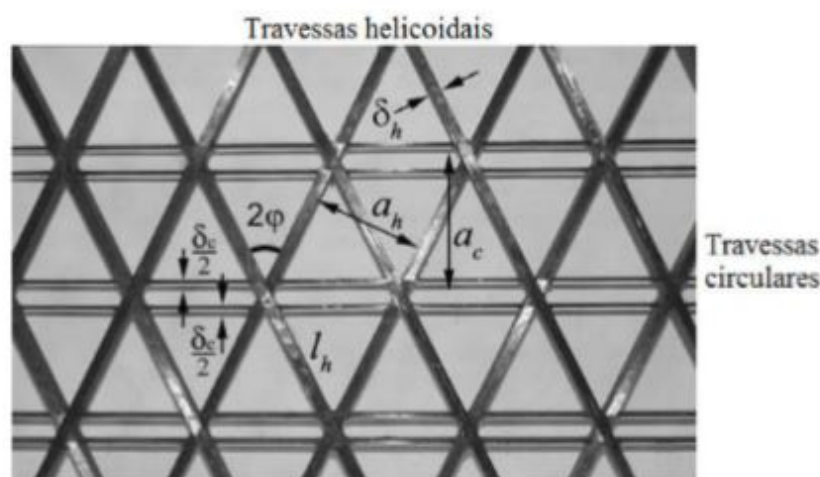


Figura 4.5: Parâmetros geométricos de estrutura de travessas rígidas. Fonte: Adaptado de Vasiliev e Razin (2006)

O diâmetro e o comprimento são fixos e baseados nos tubos que existem comercialmente. Já a distância α_c e α_h das travessas circulares e helicoidais dependem do valor do ângulo ϕ .

A espessura h das travessas helicoidais e circulares é fixa e baseada nos cálculos analíticos realizados por Junqueira *et al.* (2019).

Dessa forma, os três fatores que iremos utilizar neste trabalho são: Ângulo das travessas helicoidais, largura das travessas circulares e largura das travessas helicoidais.

4.5.3 Seleção dos níveis dos fatores de controle

Esta definição é resultado da combinação entre o conhecimento prático (experiência) e a compreensão teórica do objeto de estudo. As justificativas da escolha dos níveis de operação escolhidos estão mostrados na Tabela 4.4.

Feita a definição dos níveis máximo e mínimo dos fatores de controle é possível definir as faixas de operação mostradas na Tabela 4.5:

Tabela 4.5: Níveis de testes dos fatores de controle. Fonte: Autor.

Fator	Nível inferior (-1)	Nível superior(+1)
Ângulo das travessas helicoidas (com reforço)	20°	50°
Ângulo das travessas helicoidas (sem reforço)	20°	40°
Espessura das travessas helicoidais	2 mm	6 mm
Espessura das travessas circulares	2 mm	6 mm

4.5.4 Seleção das variáveis de resposta

De acordo com norma NBR ISO 10328:2002, as respostas dos ensaios de compressão e torção devem ser feitos. Além disso, neste trabalho, serão coletadas outras respostas, tais como: Frequência natural, Carga crítica de flambagem e massa da estrutura.

4.5.5 Seleção da matriz experimental

Como a quantidade de fatores selecionados para o experimento não era grande (3 fatores) foi simples realizar um experimento fatorial completo. Com este tipo de experimento é possível verificar tanto os fatores principais como suas interações. Como os experimentos foram feitos por simulação computacional, os experimentos não precisam ser realizados em ordem aleatória e ,na replicação dos *center points*, foi adicionado uma pequena modificação nos dados de entrada para simular um desvio na replicação do experimento, o que permite avaliar a repetibilidade do processo através da avaliação do erro experimental. Utilizando-se um experimento fatorial completo (2^n) com 5 pontos centrais obteve-se um total de 13 experimentos em um único bloco. A matriz de experimentos delineada para o *isogrid* com reforço interno está mostrada na Tabela 4.6 e para o *isogrid* sem reforço interno na Tabela 4.7.

Tabela 4.6: Matriz de experimentos para o *isogrid* com reforço interno. - Arranjo Fatorial Completo

OrdemPad	OrdemEns	TipoPt	Blocos	Ângulo	Esp circular	Esp helicoidal
1	1	1	1	20°	2 mm	2 mm
2	2	1	1	50°	2 mm	2 mm
3	3	1	1	20°	6 mm	2 mm
4	4	1	1	50°	6 mm	2 mm
5	5	1	1	20°	2 mm	6 mm
6	6	1	1	50°	2 mm	6 mm
7	7	1	1	20°	6 mm	6 mm
8	8	1	1	50°	6 mm	6 mm
9	9	0	1	35°	4 mm	4 mm
10	10	0	1	35°	4 mm	4 mm
11	11	0	1	35°	4 mm	4 mm
12	12	0	1	35°	4 mm	4 mm
13	13	0	1	35°	4 mm	4 mm

Tabela 4.7: Matriz de experimentos para o *isogrid* sem reforço interno - Arranjo Fatorial Completo

OrdemPad	OrdemEns	TipoPt	Blocos	Ângulo	Esp circular	Esp helicoidal
1	1	1	1	20°	2 mm	2 mm
2	2	1	1	40°	2 mm	2 mm
3	3	1	1	20°	6 mm	2 mm
4	4	1	1	40°	6 mm	2 mm
5	5	1	1	20°	2 mm	6 mm
6	6	1	1	40°	2 mm	6 mm
7	7	1	1	20°	6 mm	6 mm
8	8	1	1	40°	6 mm	6 mm
9	9	0	1	30°	4 mm	4 mm
10	10	0	1	30°	4 mm	4 mm
11	11	0	1	30°	4 mm	4 mm
12	12	0	1	30°	4 mm	4 mm
13	13	0	1	30°	4 mm	4 mm

Para o processo de otimização foi utilizado o arranjo de superfície de resposta com 5 pontos centrais. Utilizando-se este tipo de arranjo obteve-se um total de 20 experimentos em um único bloco. A matriz de experimentos delineada para o *isogrid* com reforço interno está mostrada na Tabela 4.8 e para o *isogrid* sem reforço interno na Tabela 4.9.

Tabela 4.8: Matriz de experimentos para o *isogrid* com reforço interno - Arranjo de Superfície de Resposta

OrdemPad	OrdemEns	TipoPt	Blocos	Ângulo	Esp circular	Esp helicoidal
1	1	1	1	20°	2 mm	2 mm
2	2	1	1	50°	2 mm	2 mm
3	3	1	1	20°	6 mm	2 mm
4	4	1	1	50°	6 mm	2 mm
5	5	1	1	20°	2 mm	6 mm
6	6	1	1	50°	2 mm	6 mm
7	7	1	1	20°	6 mm	6 mm
8	8	1	1	50°	6 mm	6 mm
9	9	-1	1	20°	4 mm	4 mm
10	10	-1	1	50°	4 mm	4 mm
11	11	-1	1	35°	2 mm	4 mm
12	12	-1	1	35°	6 mm	4 mm
13	13	-1	1	35°	4 mm	2 mm
14	14	-1	1	35°	4 mm	6 mm
15	15	0	1	35°	4 mm	4 mm
16	16	0	1	35°	4 mm	4 mm
17	17	0	1	35°	4 mm	4 mm
18	18	0	1	35°	4 mm	4 mm
19	19	0	1	35°	4 mm	4 mm
20	20	0	1	35°	4 mm	4 mm

(INTENCIONALMENTE DEIXADO EM BRANCO)

Tabela 4.9: Matriz de experimentos para o *isogrid* sem reforço interno - Arranjo de Superfície de Resposta

OrdemPad	OrdemEns	TipoPt	Blocos	Ângulo	Esp circular	Esp helicoidal
1	1	1	1	20°	2 mm	2 mm
2	2	1	1	40°	2 mm	2 mm
3	3	1	1	20°	6 mm	2 mm
4	4	1	1	40°	6 mm	2 mm
5	5	1	1	20°	2 mm	6 mm
6	6	1	1	40°	2 mm	6 mm
7	7	1	1	20°	6 mm	6 mm
8	8	1	1	40°	6 mm	6 mm
9	9	-1	1	20°	4 mm	4 mm
10	10	-1	1	40°	4 mm	4 mm
11	11	-1	1	30°	2 mm	4 mm
12	12	-1	1	30°	6 mm	4 mm
13	13	-1	1	30°	4 mm	2 mm
14	14	-1	1	30°	4 mm	6 mm
15	15	0	1	30°	4 mm	4 mm
16	16	0	1	30°	4 mm	4 mm
17	17	0	1	30°	4 mm	4 mm
18	18	0	1	30°	4 mm	4 mm
19	19	0	1	30°	4 mm	4 mm
20	20	0	1	30°	4 mm	4 mm

Para finalizar, o processamento das amostras, a análise dos dados e a interpretação dos resultados serão feitos no Capítulo 5. Ademais, encontradas as equações que modelam o problema, será utilizado o algoritmo de enxame de partículas e o algoritmo genético para otimizá-las e, dessa forma, encontrar a configuração ótima do tubo protético.

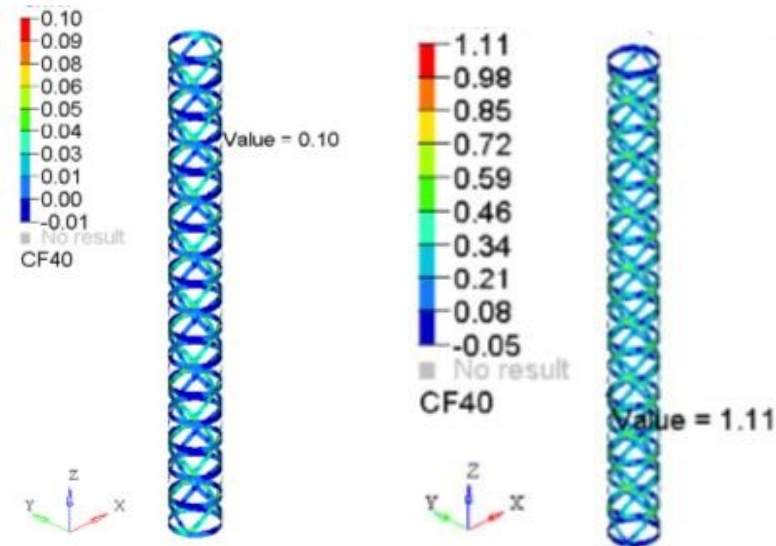
Capítulo 5

Resultados e Discussão

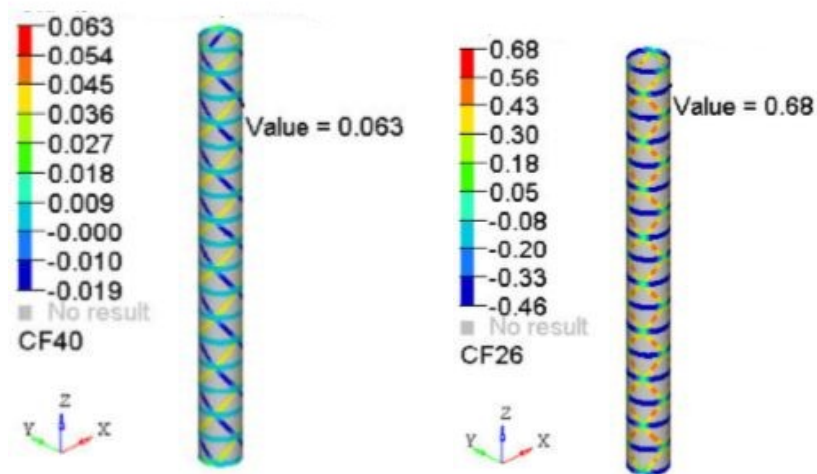
Neste capítulo serão apresentados e discutidos os principais resultados do trabalho, abordados em ordem cronológica, a saber: *i)* Validação do modelo numérico utilizado; *ii)* resultados preliminares referentes ao planejamento de experimentos e análise de variância; *iii)* resultados obtidos pela otimização mono-objetivo das respostas e *iiii)* resultados obtidos pela otimização multi-objetivo das respostas.

5.1 Validação do Modelo Numérico

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. Junqueira *et al.* (2019) analisou um tubo de estruturas de travessas rígidas, seguindo a mesma norma e com o mesmo material proposto pelo presente trabalho. Fez-se uso do MEF e utilizou o critério de Tsai-Wu para avaliar se as estruturas estão falhando. Os resultados obtidos estão mostrados na Figura 5.1.



(a) Tsai-Wu de torção para o *isogrid* sem o reforço interno. (b) Tsai-Wu de compressão para o *isogrid* sem o reforço interno.



(c) Tsai-Wu de torção para o *isogrid* com o reforço interno. (d) Tsai-Wu de compressão para o *isogrid* com o reforço interno.

Figura 5.1: Análise de falha pelo critério de Tsai-Wu feita por Junqueira *et al.* (2019). Fonte: Junqueira *et al.* (2019)

Posteriormente a análise numérica, Junqueira *et al.* (2019) realizou ensaios experimentais de compressão com o tubo na presença de camada interna. De acordo com a norma, os ensaios de compressão devem ser divididos em duas etapas: Comprovação e Falha. Dessa forma, o autor utilizou três tubos para o primeiro tipo de ensaio. Se os corpos de prova não falhassem, poderiam ser utilizados para realizar o ensaio até que isso acontecesse. Como todos os tubos suportaram ao ensaio de comprovação, as três estruturas foram submetidas ao ensaio de falha. Os resultados estão mostrados na Tabela 5.1. e a região onde a falha aconteceu está mostrada na Figura 5.2.

Tabela 5.1: Resultados experimentais de falha em compressão do tubo com reforço interno. Fonte: Junqueira *et al.* (2019)

Ensaio	Falha
Tubo 1	7900 N
Tubo 2	7800 N
Tubo 3	6800 N
Média	7500 N
Desvio padrão	608 N

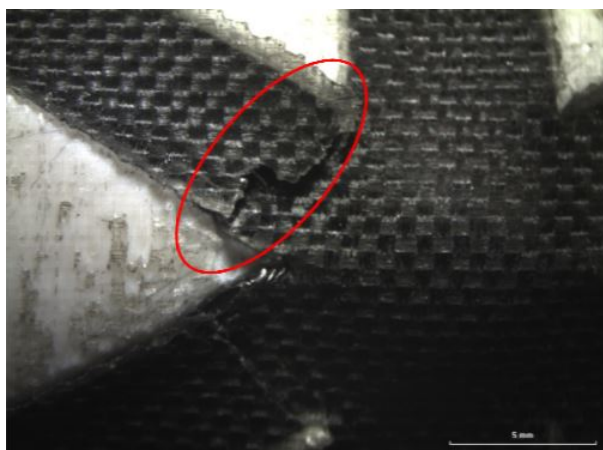
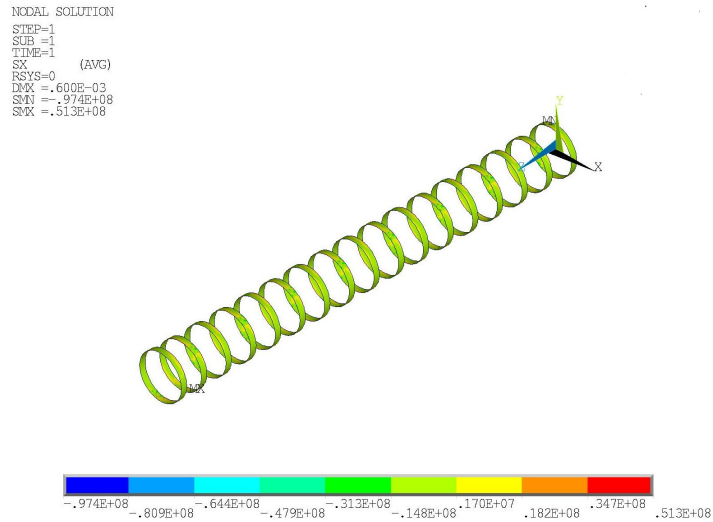


Figura 5.2: Região de falha da estrutura após o ensaio de compressão. Fonte: Junqueira *et al.* (2019)

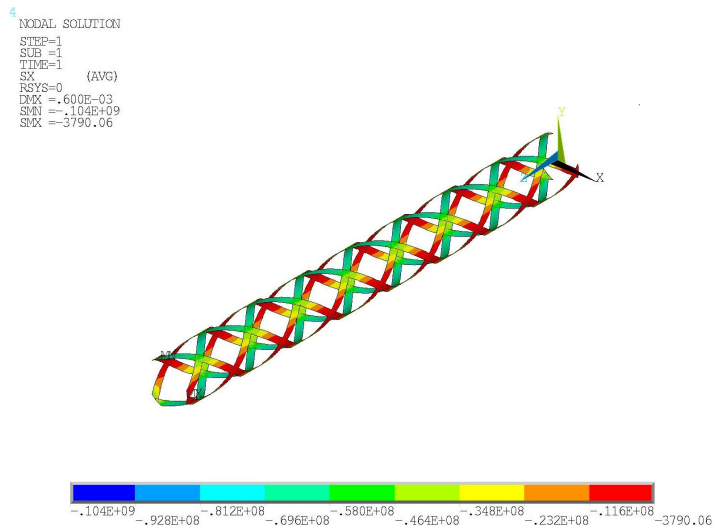
Todos os resultados mostrados anteriormente serão utilizados para validação do modelo numérico construído no presente trabalho.

5.1.1 Análise de compressão

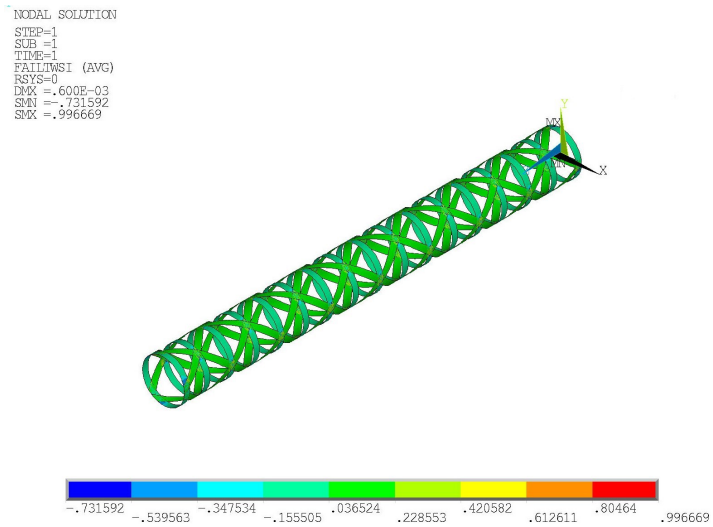
Os resultados obtidos pela análise do *isogrid* sem reforço interno estão mostrados na Figura 5.3.



(a) Tensão de compressão nas travessas circulares (Pa).



(b) Tensão de compressão nas travessas helicoidais (Pa).



(c) Análise pelo critério de falha de Tsai-Wu

Figura 5.3: Resultados numéricos obtidos pela análise de compressão do *isogrid* sem a presença de reforço interno. Fonte: Autor.

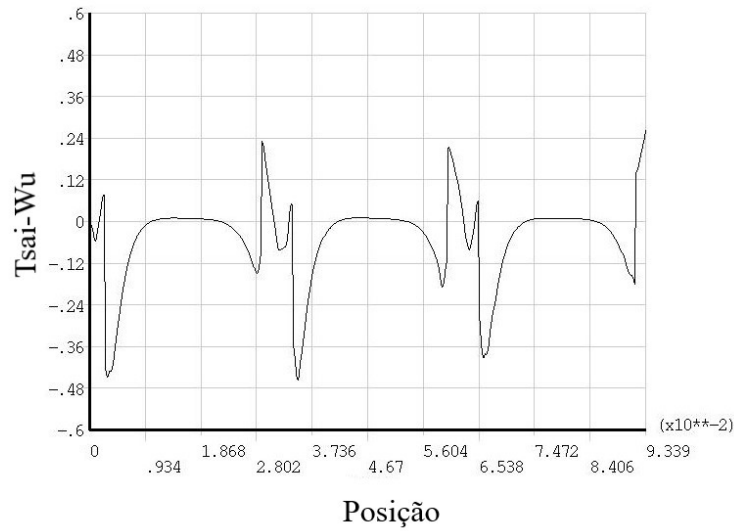
A tensão de compressão máxima encontrada na estrutura equivale a 51,26 MPa e o Tsai-Wu máximo encontrado é igual a 0,99. Esse resultado mostra que a estrutura está na iminência de falhar, pois o coeficiente de Tsai-Wu está muito próximo da unidade. Além disso, percebe-se que o valor máximo ocorre próximo as interseções das travessas, sendo esse, um local que merece maior atenção durante o projeto.

Devido aos fatos relatados anteriormente, não é recomendado a utilização da estrutura analisada. Uma mudança nos parâmetros ou a utilização de um reforço interno, como será mostrado mais a frente, seriam soluções para melhorar as propriedades estruturais do tubo.

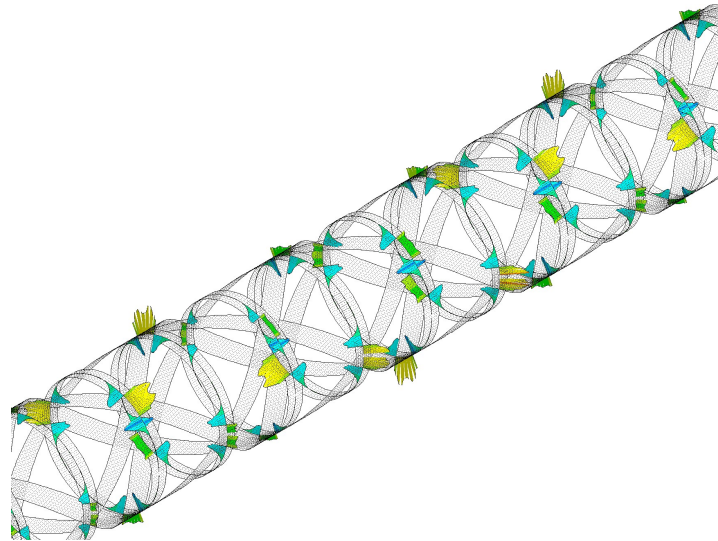
A diferença entre o resultado encontrado por Junqueira *et al.* (2019) (1,11) e pelo presente estudo (0,99) pode ser explicado por alguns motivos que estão mostrados abaixo.

- Os modelos numéricos foram construídos em *softwares* diferentes. Logo, com *solvers* e algoritmos internos diferentes;
- A parametrização da estrutura foi feita de maneira diferente.

Visto isso, pode-se concluir que os resultados de Tsai-Wu em compressão encontrados pelo modelo do presente trabalho estão coerentes. A variação do coeficiente ao longo do eixo das travessas circulares e helicoidais estão mostrados nas Figuras 5.4 e 5.5, respectivamente.



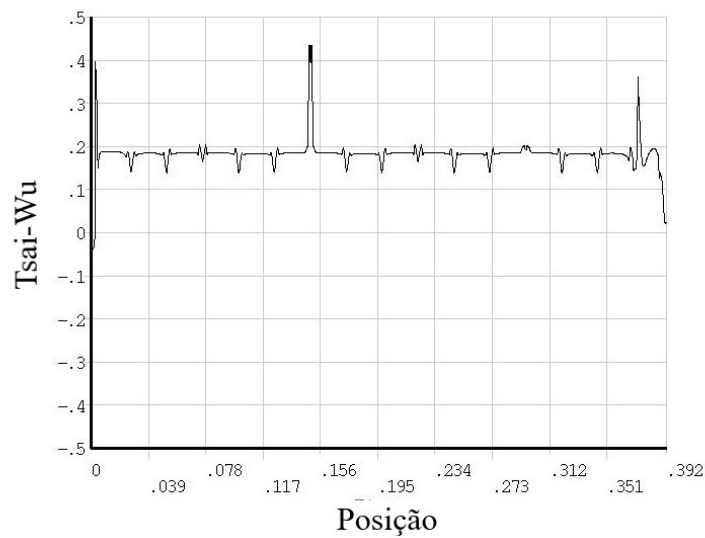
(a) Variação do Tsai-Wu ao longo do comprimento de uma travessa circular.



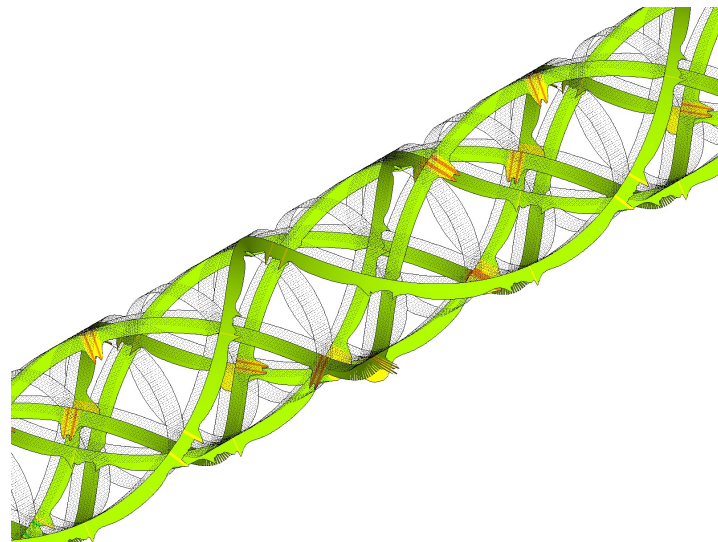
(b) Representação tridimensional da variação do Tsai-Wu ao longo das travessas circulares.

Figura 5.4: Variação do Tsai-Wu ao longo das travessas circulares do *isogrid* sem reforço interno sob esforços de compressão. Fonte: Autor.

Reforçando o que foi descrito anteriormente, os três picos de Tsai-Wu da Figura 5.4(a) são nas três interseções ao longo das travessas circulares. Isso mostra que, se houver falha, esta ocorrerá em algum destes pontos. Já nas helicoidais, mostrado na Figura 5.5(a), há 17 picos de Tsai-Wu que correspondem, exatamente, ao número de interseções que existe nessas travessas.



(a) Variação do Tsai-Wu ao longo de uma travessa helicoidal.

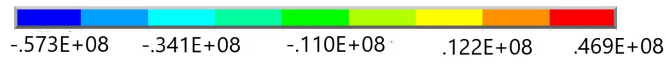
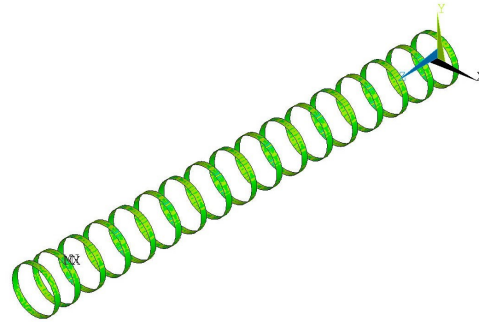


(b) Representação tridimensional da variação de Tsai-Wu ao longo das travessas helicoidais.

Figura 5.5: Variação do Tsai-Wu ao longo das travessas helicoidais do *isogrid* sem reforço interno sob esforços de compressão. Fonte: Autor.

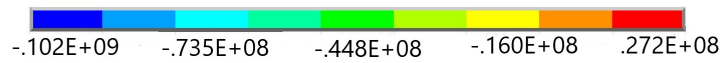
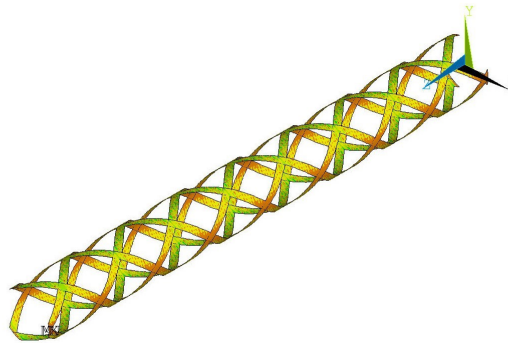
Por outro lado, na presença de reforço interno, é possível notar modificações significativas nos resultados da análise de compressão. Eles serão apresentados a seguir e será feita uma comparação com os resultados experimentais obtidos no estudo de Junqueira *et al.* (2019).

```
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SX      (AVG)
RSYS=0
DMX =.185E-03
SMN =-.573E+08
SMX =.469E+08
```



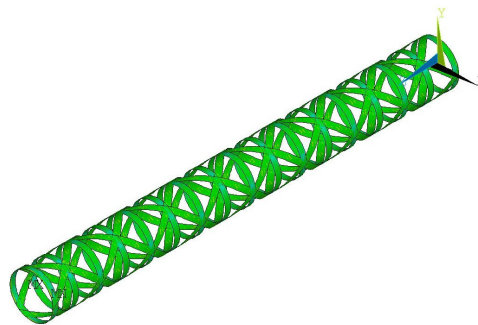
(a) Tensão de compressão nas travessas circulares (Pa).

```
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SX      (AVG)
RSYS=0
DMX =.185E-03
SMN =-.102E+09
SMX =.272E+08
```



(b) Tensão de compressão nas travessas helicoidais (Pa).

```
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
FALLTWS1 (AVG)
RSYS=0
DMX =.185E-03
SMN =-.695943
SMX =.48091
```



(c) Análise pelo critério de falha de Tsai-Wu.

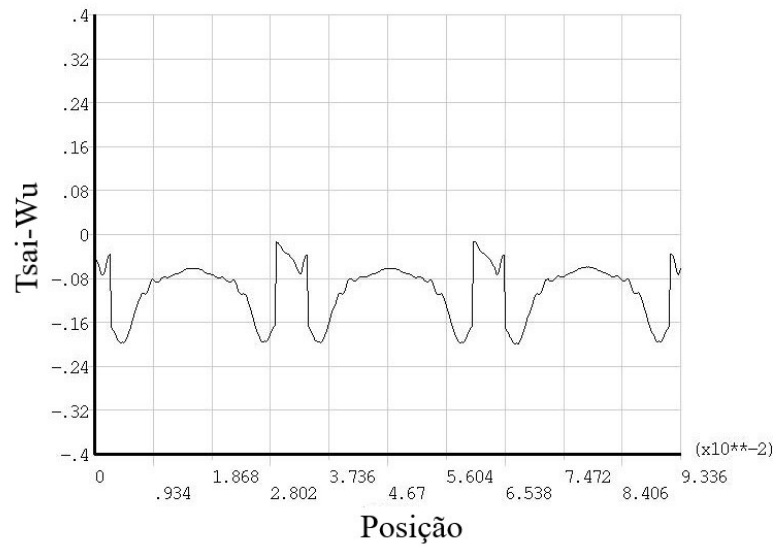
Figura 5.6: Resultados numéricos obtidos pela análise de compressão do *isogrid* com reforço interno. Fonte: Autor.

A Figura 5.6(a) mostra a tensão de compressão nas travessas circulares, o máximo valor encontrado foi de 46,9 MPa. Já a Figura 5.6(b) mostra que a tensão máxima nas travessas helicoidais é igual 27,2 MPa. Ademais, percebe-se que, em ambos os casos, o maior valor de tensão ocorre próximo as interseções. A figura 5.6(c) mostra que o coeficiente máximo de Tsai-Wu da estrutura é igual a 0,48, ou seja, o tubo não falha com o carregamento de 4480N imposto pela norma. O fator de segurança da estrutura é dado pela Equação 5.1.

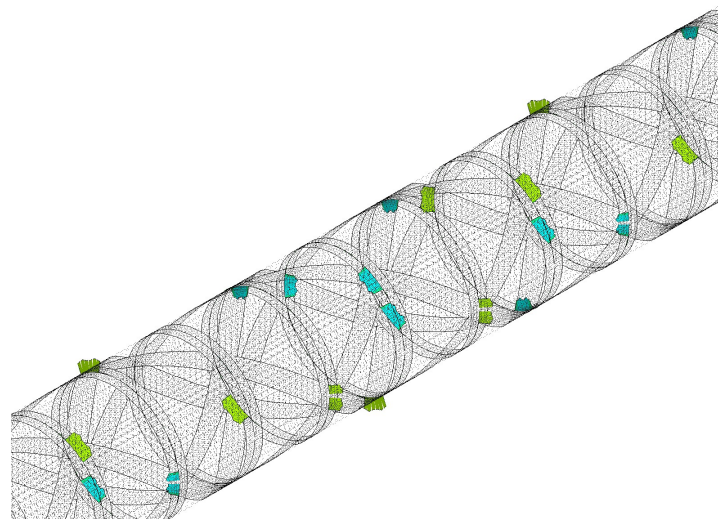
$$FS = \frac{1}{0,48} - 1 = 1,08 \quad (5.1)$$

Alguns pontos que podem ser o motivo da diferença nas respostas encontradas por Junqueira *et al.* (2019) e pelo presente estudo já foram levantados nas seções anteriores, outro ponto é que Junqueira *et al.* (2019) comparou seus resultados numéricos com os experimentais e os numéricos estão ligeiramente superestimados. Dessa forma, o resultado encontrado por este trabalho é mais compatível com a realidade, como será mostrado mais adiante. A Figura 5.7 mostra a variação do Tsai-Wu ao longo do comprimento das travessas circulares. Os valores estão relacionados ao eixo das travessas.

(INTENCIONALMENTE DEIXADO EM BRANCO)



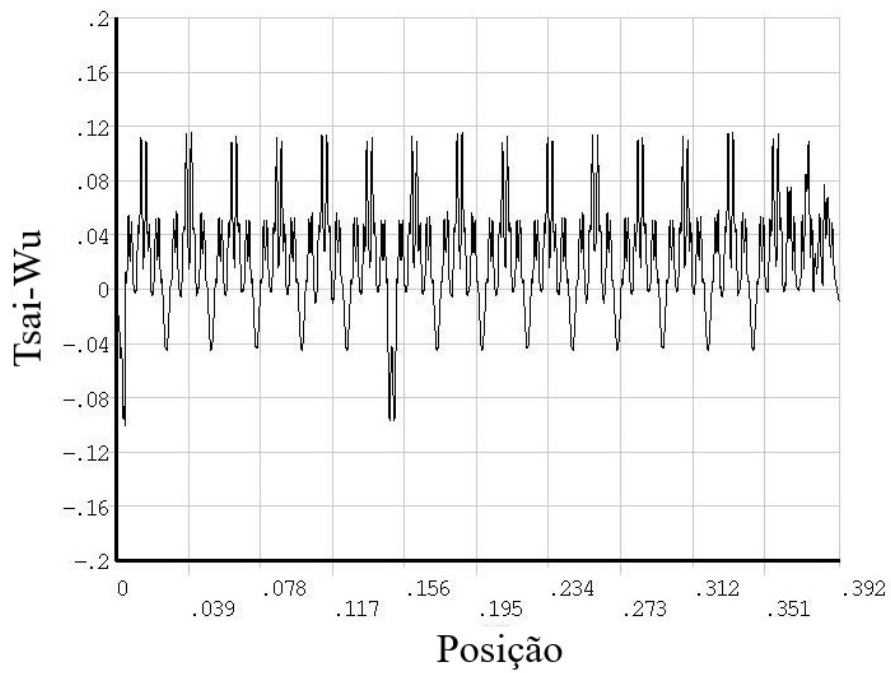
(a) Variação do Tsai-Wu ao longo do comprimento de uma travessa circular.



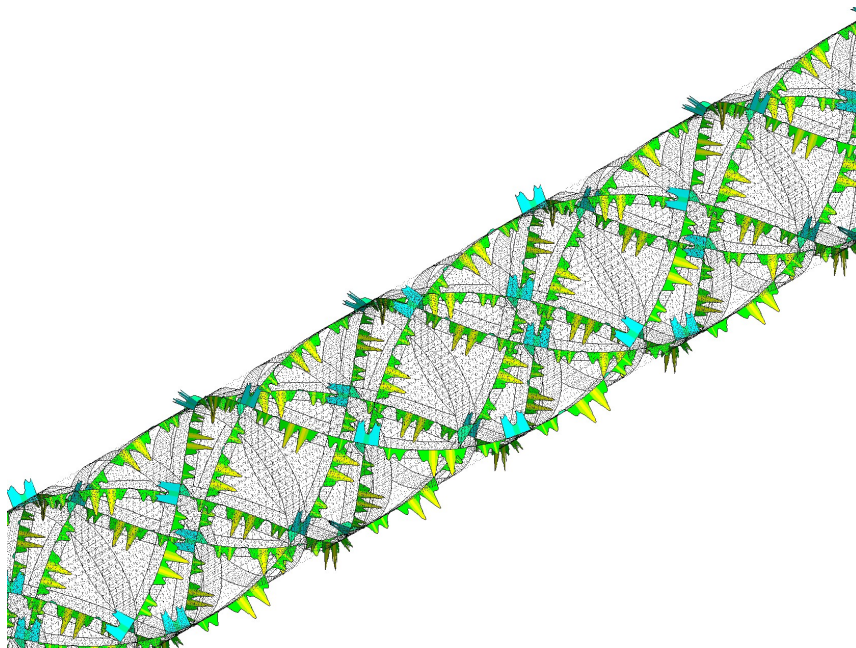
(b) Representação tridimensional da variação do Tsai-Wu ao longo das travessas circulares.

Figura 5.7: Variação do Tsai-Wu ao longo das travessas circulares do *isogrid* com reforço interno sob esforços de compressão. Fonte: Autor.

Da mesma forma, os três picos mostrados na Figura 5.7(a) são relativos às três interseções existentes nas travessas circulares. Além disso, confirma-se que a presença do reforço não altera o local onde o Tsai-Wu é máximo, ou seja, continua sendo próximo às interseções. Por outro lado, o reforço diminuiu significativamente o valor do coeficiente, fazendo com que a estrutura esteja mais longe da falha. A Figura 5.8 mostra a análise para as travessas helicoidais.



(a) Variação do Tsai-Wu ao longo do comprimento de uma travessa helicoidal.



(b) Representação tridimensional da variação do Tsai-Wu ao longo das travessas helicoidais.

Figura 5.8: Variação do Tsai-Wu ao longo das travessas helicoidais do *isogrid* com reforço interno sob esforços de compressão. Fonte: Autor.

Igualmente ao *isogrid* sem o reforço, há dezessete picos de Tsai-Wu relativos as dezessete interseções das travessas, confirmando que esse pontos são os críticos da estrutura. Já o reforço interno foi analisado pelo critério de Von Mises, obtendo tensão máxima de 6,48 MPa, como mostra a Figura 5.9. Como a tensão de escoamento do reforço é de 39 MPa, o fator de segurança da estrutura é dado pela Equação 5.2.

$$FS = \frac{39}{6,48} = 5,73 \quad (5.2)$$

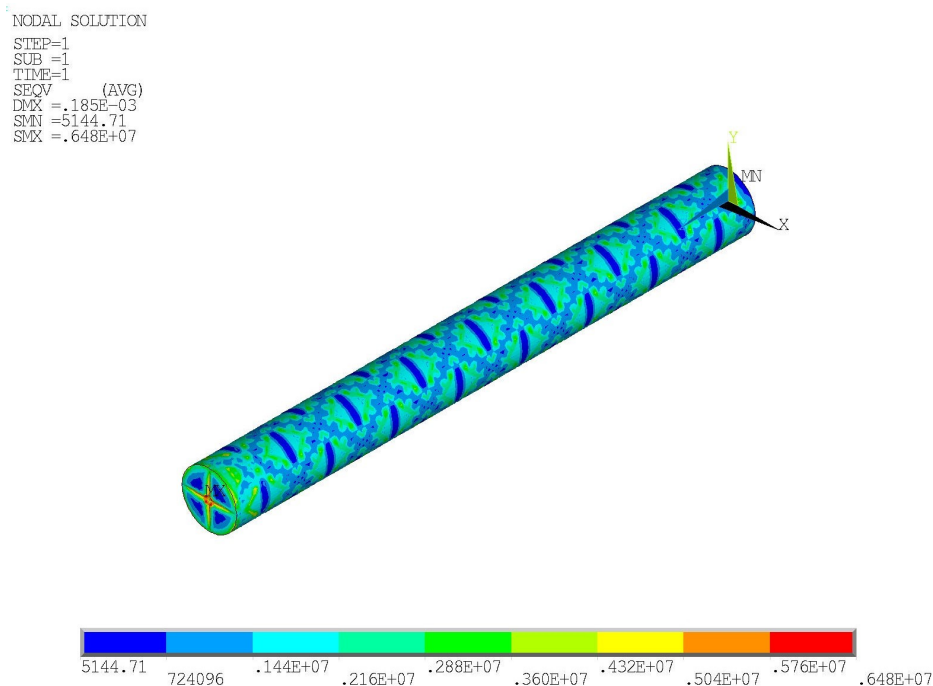


Figura 5.9: Análise de Von Mises aplicado ao reforço interno sob esforços de compressão (Pa).
 Fonte: Autor.

Dessa forma, conclui-se que o reforço interno suporta os carregamentos impostos. Em adição, nos ensaios experimentais realizados por Junqueira *et al.* (2019), foi constatado a força de falha para a estrutura. Dessa forma, é possível utilizar a carga encontrada nos experimentos como *input* no modelo numérico construído para analisar o critério de falha de Tsai-Wu. Como a estrutura falhou por compressão, só esta análise foi realizada.


```

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
FALLIWSI (AVG)
RSYS=0
DMX =.310E-03
SMN =-.731505
SMX =.978487

```

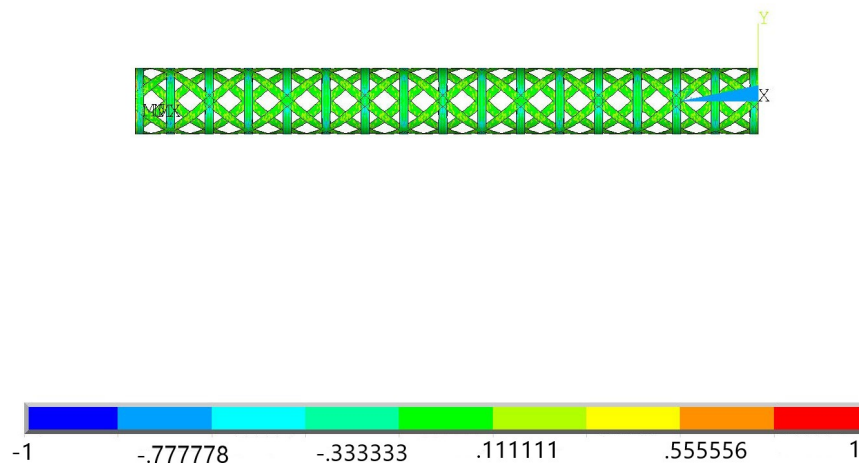


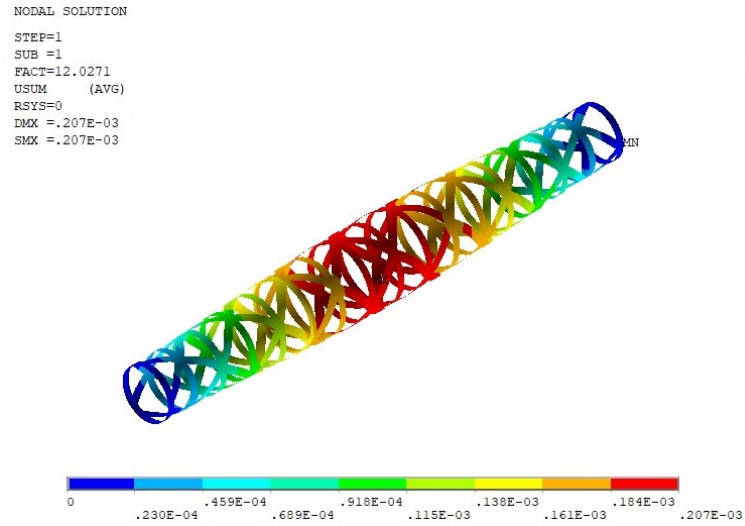
Figura 5.10: Análise pelo critério de falha de Tsai-Wu utilizando a carga máxima de compressão encontrada por Junqueira *et al.* (2019). Fonte: Autor.

O Tsai-Wu máximo encontrado foi 0,978. Comparando com o estado de falha testado experimentalmente (Tsai-Wu = 1), tem-se um erro de aproximadamente 2%. Dessa forma, conclui-se que os resultados do modelo numérico estão próximos dos experimentados por Junqueira *et al.* (2019), mostrando que o modelo está gerando bons resultados.

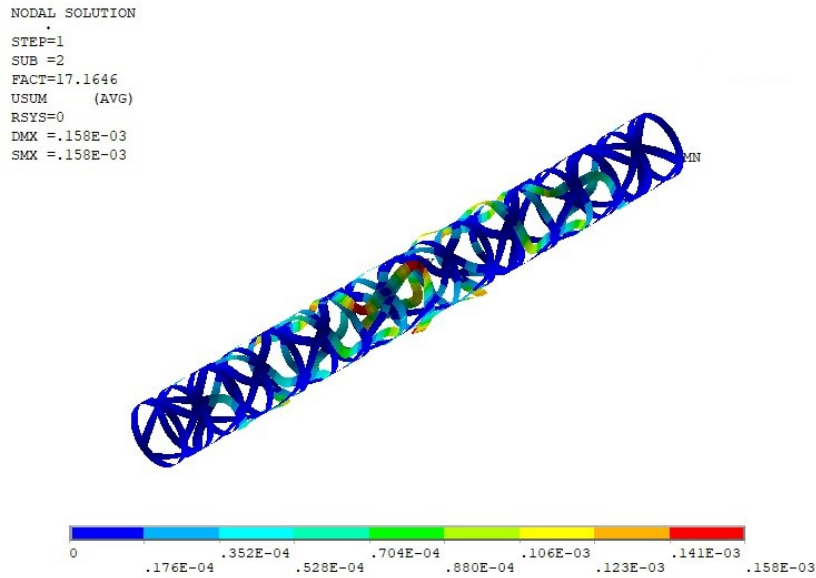
5.1.2 Análise de flambagem em compressão

Flambagem é um fenômeno que ocorre em peças esbeltas (peças onde a área de seção transversal é pequena em relação ao seu comprimento), quando submetidas a um esforço de compressão ou torção. A flambagem é considerada uma instabilidade elástica e acontece quando a peça sofre flexão transversal. Dessa forma, a peça pode perder sua estabilidade sem que o material tenha atingido a sua tensão de escoamento.

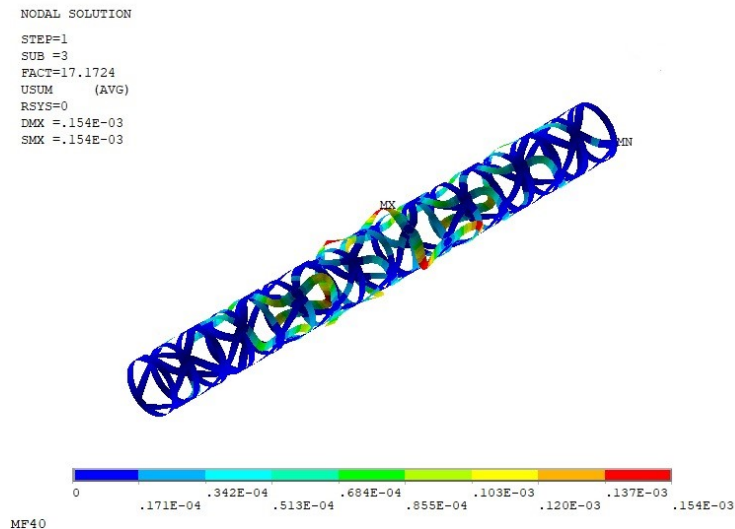
A presente análise objetiva verificar se a estrutura irá flambar sob esforços de compressão. O resultado encontrado foi uma carga crítica de flambagem aproximadamente doze vezes maior do que a aplicada, ou seja, 53,76 kN. Dessa forma, a estrutura suporta bem os esforços aplicados. A Figura 5.11 mostra os três primeiros modos de flambagem da estrutura. Já na presença do reforço interno, como era esperado, a carga crítica de flambagem aumentou. Nessa situação, a carga é cerca de vinte e nove vezes maior do que a carga aplicada, ou seja, 127,6 kN. Os três primeiros modos de flambagem da estrutura estão mostrados na Figura 5.12.



(a) 1º modo de flambagem da estrutura.

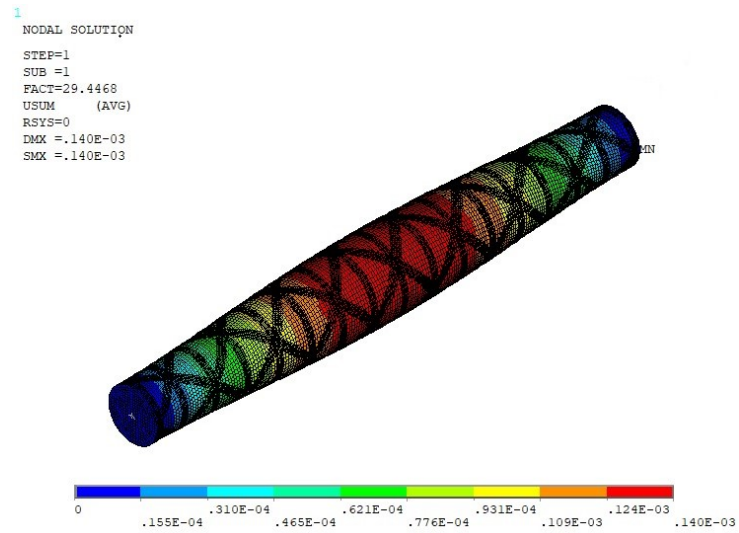


(b) 2º modo de flambagem da estrutura

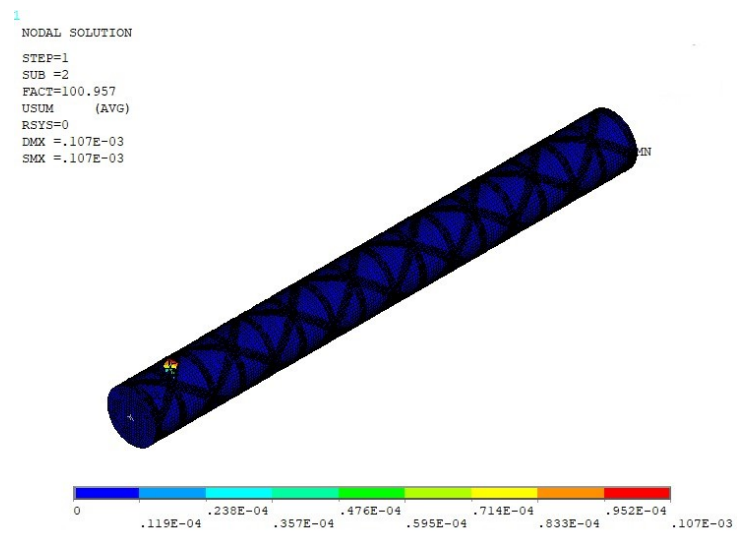


(c) 3º modo de flambagem da estrutura

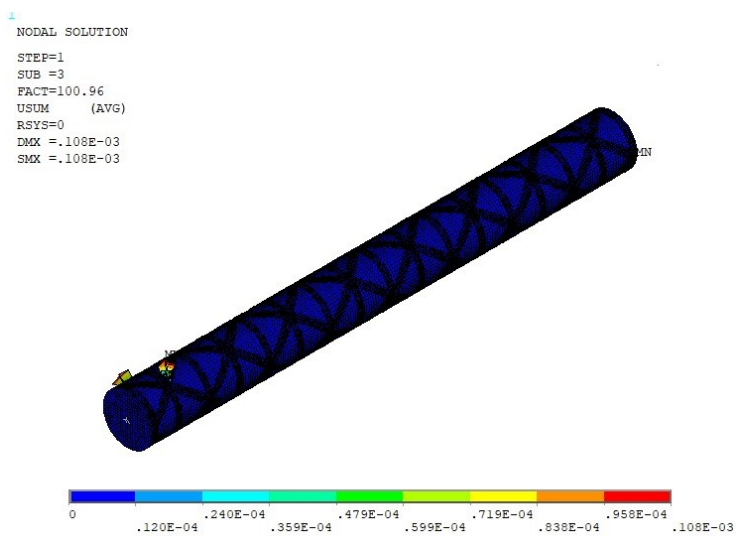
Figura 5.11: Modos de flambagem do *isogrid* sem reforço interno sob esforços de compressão.
 Fonte: Autor.



(a) 1° modo de flambagem da estrutura.



(b) 2° modo de flambagem da estrutura



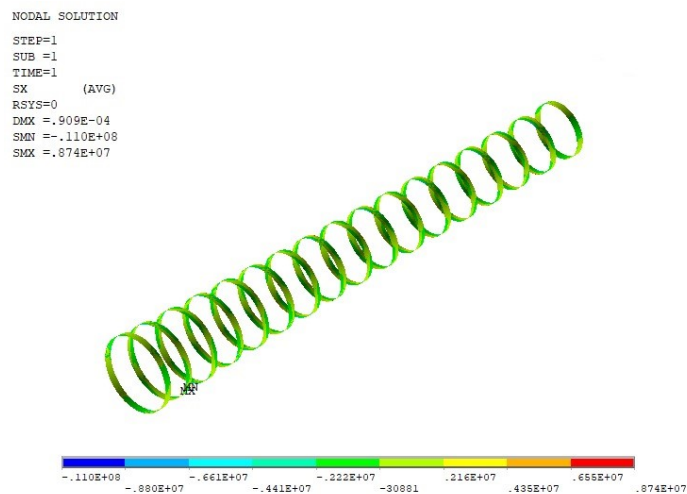
(c) 3° modo de flambagem da estrutura

Figura 5.12: Modos de flambagem do *isogrid* com reforço interno sob esforços de compressão.
Fonte: Autor.

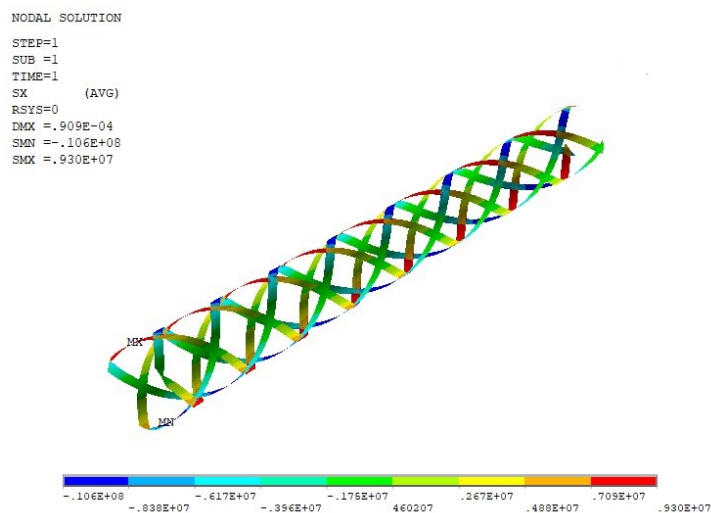
5.1.3 Análise de torção

A análise de torção é um dos requisitos da norma para validação de um tubo protético. Este ensaio consiste na aplicação de carga rotativa em um corpo de prova. Esse tipo de teste difere do ensaio de compressão porque o esforço é aplicado no sentido de rotação, ao invés de ser aplicado no sentido longitudinal. Dessa forma, o corpo tenderá a girar no sentido da força e, como a outra extremidade está engastada, ele sofrerá uma torção sobre seu próprio eixo. Se um certo limite de torção for ultrapassado, o corpo se romperá.

Esse ensaio é importante porque o usuário, na hora de movimentar o corpo, pode submeter a prótese a esforços de torção que devem ser suportados para não gerar um acidente. A análise numérica mostrando as tensões que o tubo está submetido é mostrado na Figura 5.13.



(a) Tensão de torção nas travessas circulares (Pa).



(b) Tensão de torção nas travessas helicoidais (Pa).

Figura 5.13: Resultados numéricos obtidos pela análise do *isogrid* sem reforço interno sob esforços de torção. Fonte: Autor.

Na Figura 5.13(a) é possível notar que o valor máximo de tensão encontrado nas travessas circulares é de 8,7 MPa, já na Figura 5.13(b), nota-se que a tensão máxima das travessas helicoidais é igual a 9,3 MPa.

Ademais, ressalta-se que o local de tensão máxima é o mesmo do ensaio de compressão, ou seja, próximo as interseções das travessas. Porém, como as tensões geradas por compressão são maiores, pode-se proteger a estrutura da falha apenas desses esforços que, conseqüentemente, a estrutura também estará protegida aos esforços de torção. A Figura 5.14 mostra a análise pelo critério de falha de Tsai-Wu.

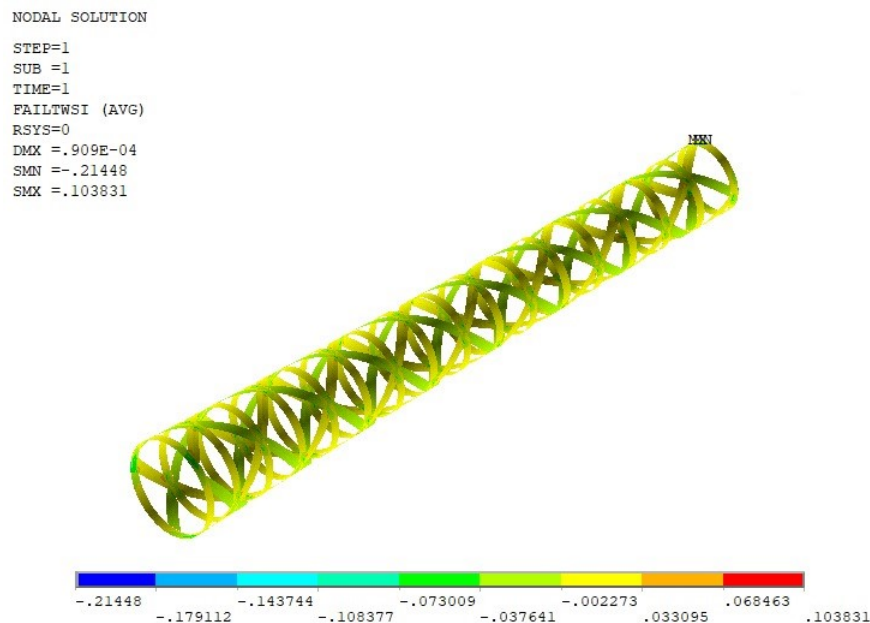


Figura 5.14: Análise pelo critério de falha de Tsai-Wu do *isogrid* sem reforço interno sob esforços de torção. Fonte: Autor.

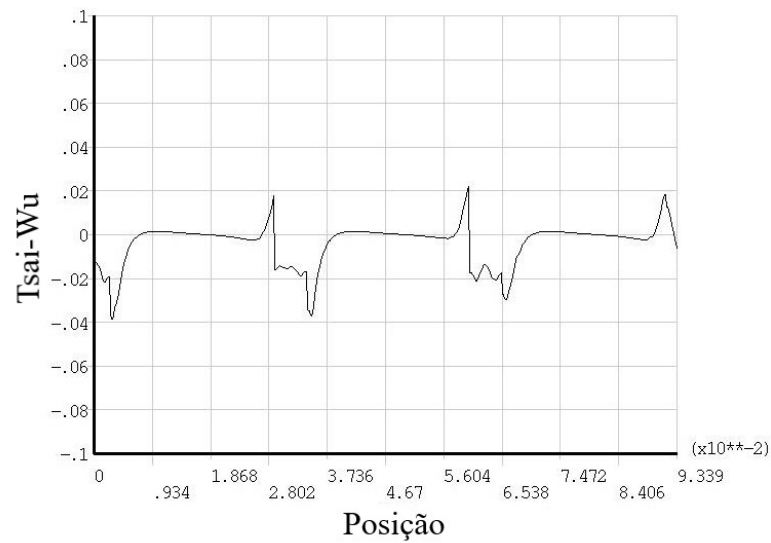
O Tsai-Wu no presente caso é de 0,1 e o fator de segurança é dado pelo Equação 5.3.

$$FS = \frac{1}{0,1} - 1 = 9 \quad (5.3)$$

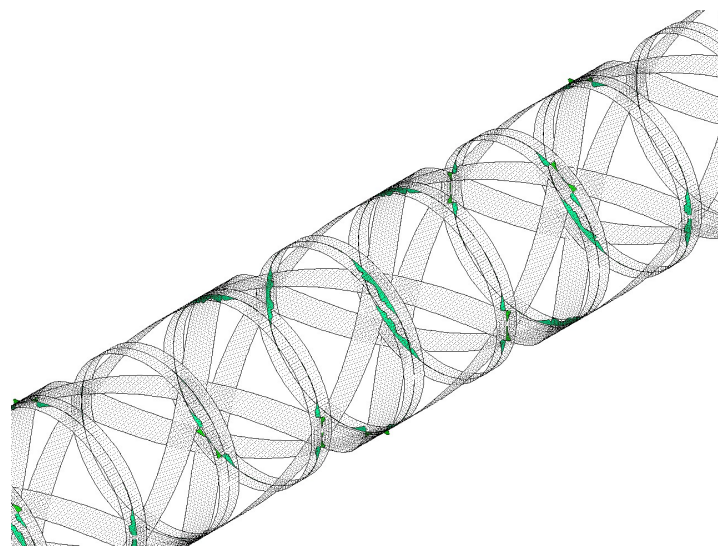
Confirma-se aqui que os esforços de tensão são menores que os esforços de compressão, pois tem-se margem de segurança maior.

Apesar das diferenças na modelagem já citadas anteriormente, o resultado do trabalho realizado por Junqueira *et al.* (2019) e do presente estudo foi o mesmo. Isso mostra que o modelo do presente trabalho está gerando bons resultados. As Figuras 5.15 e 5.16 mostram o gráfico relacionando o Tsai-Wu e o comprimento das travessas circulares e helicoidais, respectivamente. Confirma-se aqui que os picos de Tsai-Wu são nas interseções das travessas. Na Figura 5.15 há

3 picos e na Figura 5.16 há 17 picos que correspondem, exatamente, ao número de interseções nas travessas circulares e helicoidais, respectivamente.

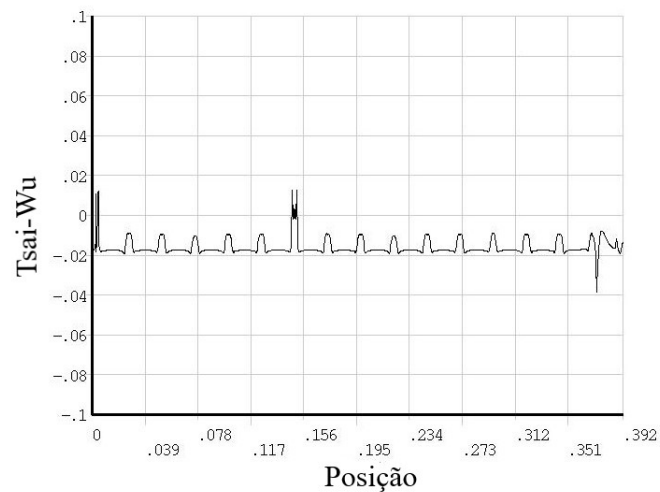


(a) Variação do Tsai-Wu ao longo do comprimento de uma travessa circular.

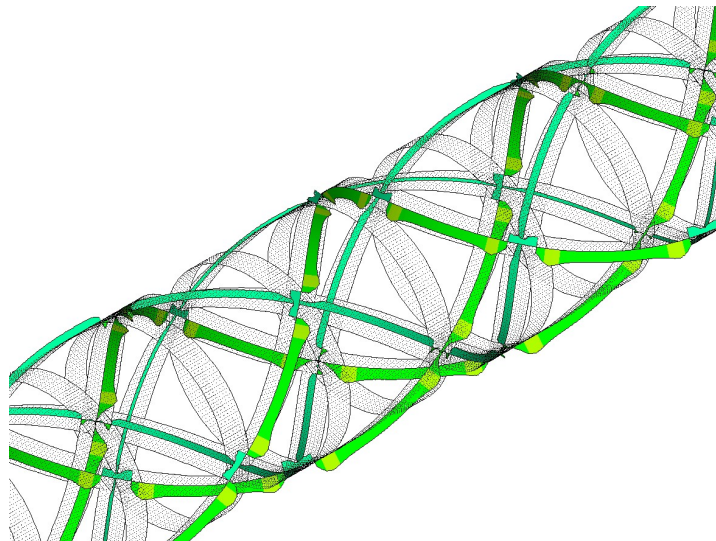


(b) Representação tridimensional da variação do Tsai-Wu ao longo do comprimento das travessas circulares.

Figura 5.15: Variação do Tsai-Wu ao longo das travessas circulares do *isogrid* sem reforço interno sob esforços de torção. Fonte: Autor.



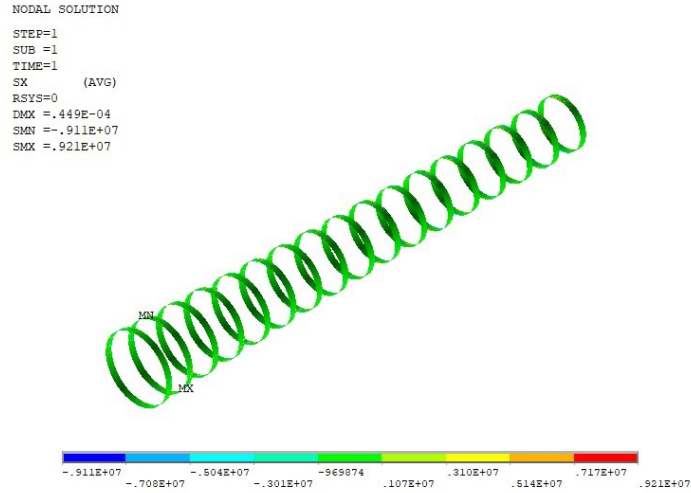
(a) Variação do Tsai-Wu ao longo do comprimento de uma travessa helicoidal.



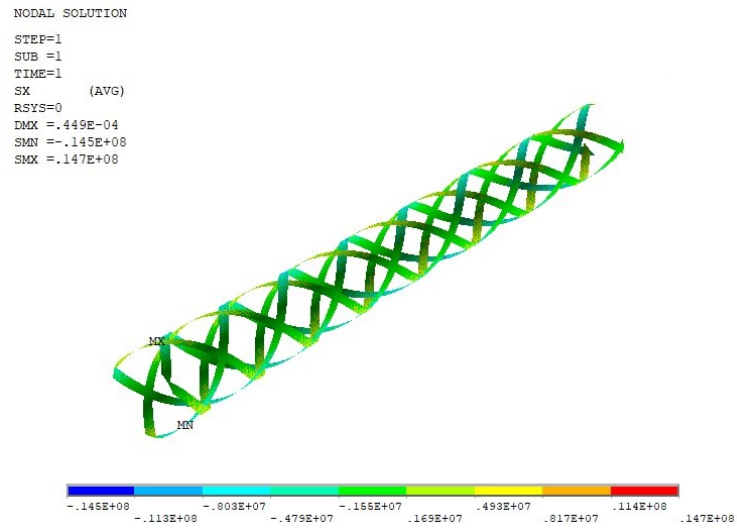
(b) Representação tridimensional da variação do Tsai-Wu ao longo do comprimento das travessas helicoidais.

Figura 5.16: Variação do Tsai-Wu ao longo das travessas helicoidais do *isogrid* sem reforço interno sob esforços de torção. Fonte: Autor.

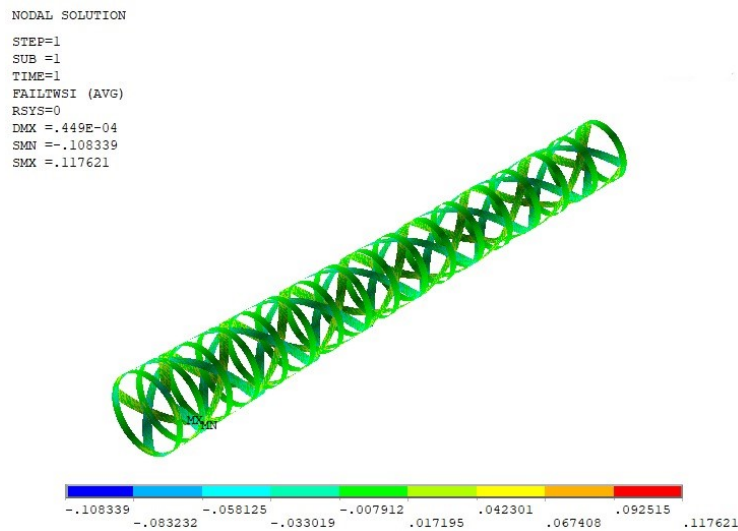
Já na presença do reforço, as propriedades do tubo mudam completamente. Os resultados das análises da estrutura estão mostrados na Figura 5.17.



(a) Tensão de torção nas travessas circulares (Pa).



(b) Tensão de torção nas travessas helicoidais (Pa).



(c) Análise pelo critério de falha de Tsai-Wu.

Figura 5.17: Resultados numéricos obtidos pela análise de torção do *isogrid* com reforço interno sob esforços de torção. Fonte: Autor.

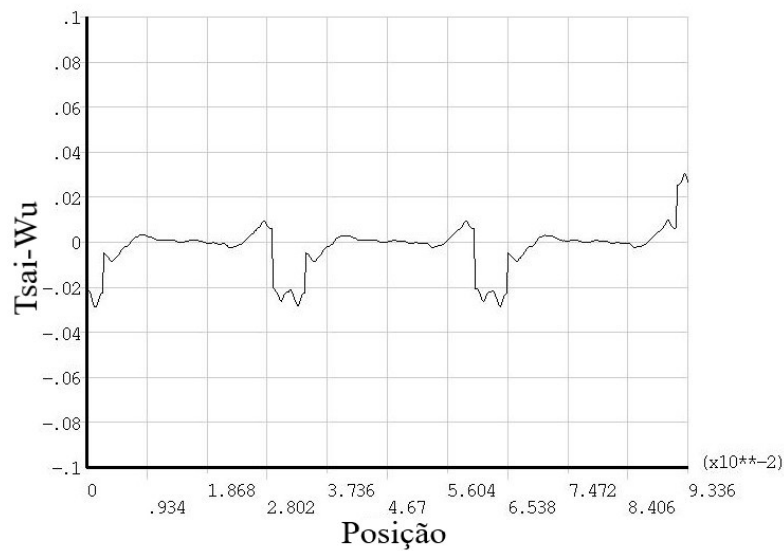
A Figura 5.17(a) mostra que a tensão de torção máxima nas travessas circulares foi de 9,2 MPa, já na Figura 5.17(b) é possível perceber que a tensão máxima nas travessas helicoidais equivale a 14,7 MPa. Dessa forma, nota-se que a tensão causada por esforços de torção são menores que as causadas por compressão, o que pode ser confirmado pelo menor coeficiente Tsai-Wu encontrado, mostrado na Figura 5.17(c). O fator de segurança da estrutura é dado pela Equação 5.4.

$$FS = \frac{1}{0,11} - 1 = 8,09 \quad (5.4)$$

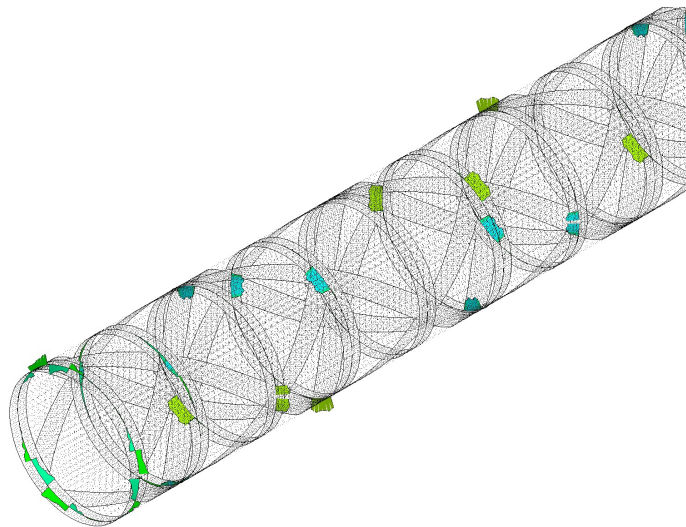
Por outro lado, percebe-se que a presença do reforço não altera significativamente o valor de Tsai-Wu quando a estrutura está submetida a esforços de torção. Já em comparação com o trabalho realizado por Junqueira *et al.* (2019), o resultado encontrado teve uma diferença de 0,047.

Ainda assim, devido aos fatos já mencionados nas seções anteriores, o resultado encontrado está dentro do aceitável. A Figura 5.18 mostra a variação de Tsai-Wu ao longo de uma travessa circular e a Figura 5.19 a variação ao longo de uma helicoidal. Como na análise de compressão, os picos de Tsai-Wu ocorrem nas intersecções das travessas. Tem-se três picos nas travessas circulares e dezessete picos nas helicoidas que são, exatamente, o número de intersecções que ocorrem nas travessas.

(INTENCIONALMENTE DEIXADO EM BRANCO)



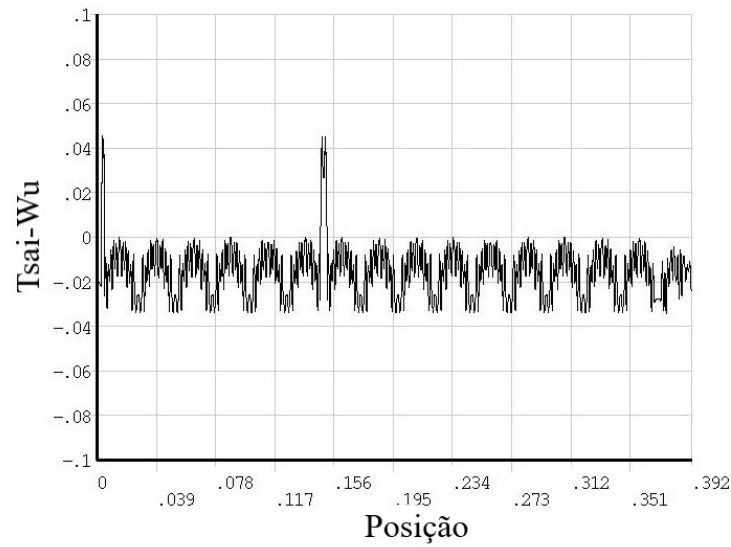
(a) Variação do Tsai-Wu ao longo do comprimento de uma travessa circular.



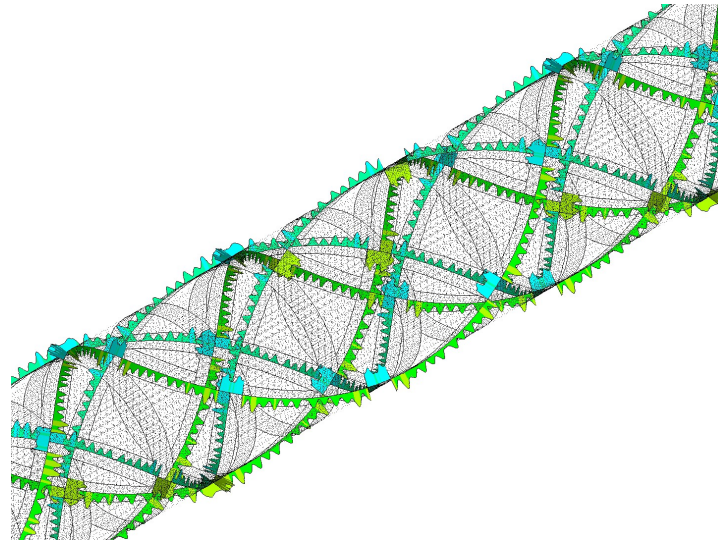
(b) Representação tridimensional da variação do Tsai-Wu ao longo das travessas circulares.

Figura 5.18: Variação do Tsai-Wu ao longo das travessas circulares do *isogrid* com reforço interno sob esforços de torção. Fonte: Autor.

É interessante ressaltar que o valor máximo de Tsai-Wu encontrado na Figura 5.18(a) é diferente do valor máximo da estrutura mostrado na Figura 5.17(c). Isso acontece devido ao gráfico gerado nas Figuras 5.18 e 5.19 serem relacionados aos valores do eixo das travessas. Dessa forma, como o valor máximo de Tsai-Wu aconteceu fora do eixo, ele não está computado no gráfico.



(a) Variação do Tsai-Wu ao longo do comprimento de uma travessa helicoidal.



(b) Representação tridimensional da variação do Tsai-Wu ao longo das travessas helicoidais.

Figura 5.19: Variação do Tsai-Wu ao longo das travessas helicoidais do *isogrid* com reforço interno sob esforços de torção. Fonte: Autor.

Além da análise da estrutura de travessas rígidas, deve-se analisar a condição do reforço interno. A tensão de escoamento do reforço equivale a 39 MPa, dessa forma, esta é uma tensão limite que, acima desse valor, a estrutura irá falhar. O critério de Von Mises foi utilizado e máxima tensão encontrada equivale a 0,6 MPa, como mostra a Figura 5.20.

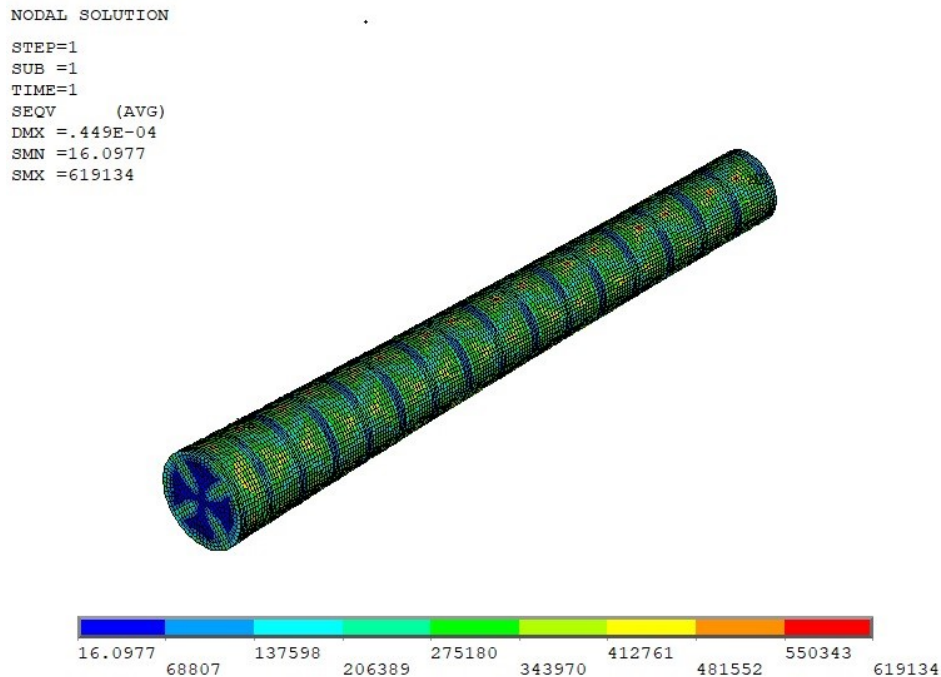


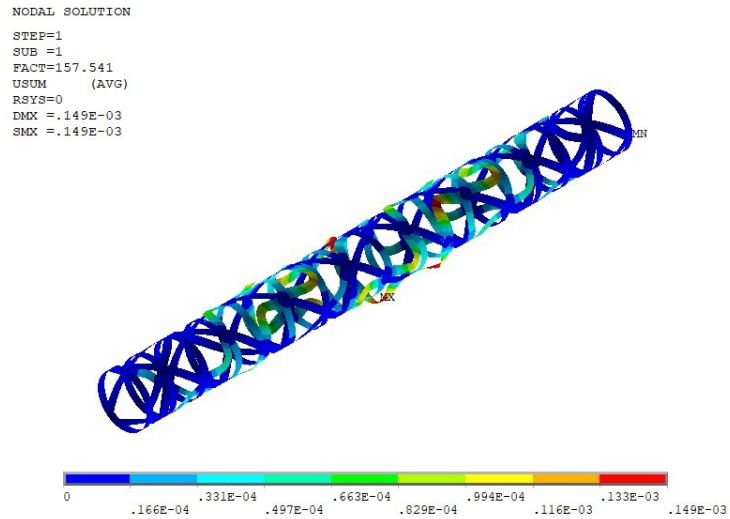
Figura 5.20: Análise pelo critério de Von Mises aplicado ao reforço interno sob esforços de torção (Pa). Fonte: Autor.

5.1.4 Análise de flambagem em torção

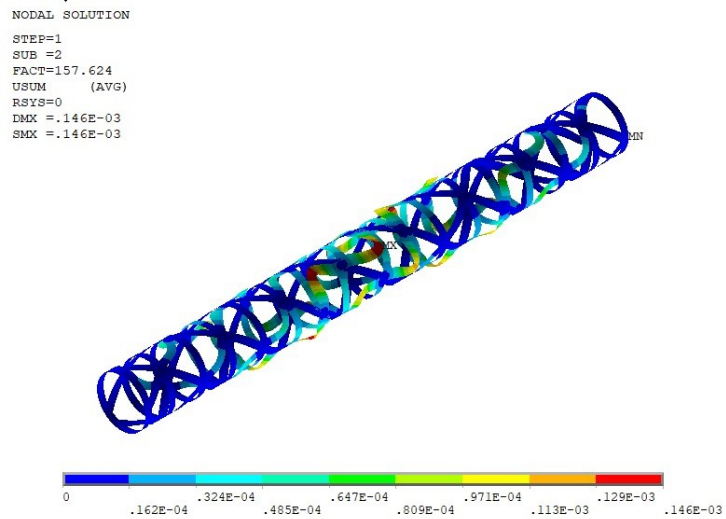
O ensaio tem suma importância para determinar a resistência dos materiais escolhidos para estrutura. O resultado encontrado foi uma carga crítica de flambagem cento e cinquenta e sete vezes maior do que a aplicada, ou seja, 1,11 kN·m. Dessa forma, concluí-se que a estrutura suporta os esforços aplicados sem flambar. A Figura 5.21 mostra os três primeiros modos de flambagem da estrutura.

Da mesma forma, outra análise foi feita para verificar o limite mecânico da peça na presença de reforço interno. O resultado obtido foi uma carga crítica de flambagem seiscentos e noventa e seis vezes maior do que a aplicada, ou seja, 4,94 kN·m.

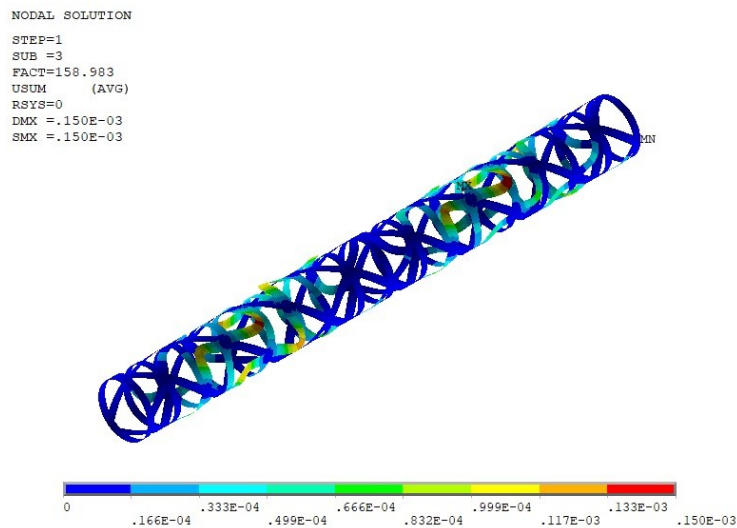
É interessante notar que a presença do reforço interno quadruplicou, aproximadamente, a carga crítica de flambagem. Isso mostra que se esse critério for o foco do projeto, a utilização do reforço é essencial. A Figura 5.22 mostra os três primeiros modos de flambagem da estrutura na presença do reforço.



(a) 1° modo de flambagem da estrutura.

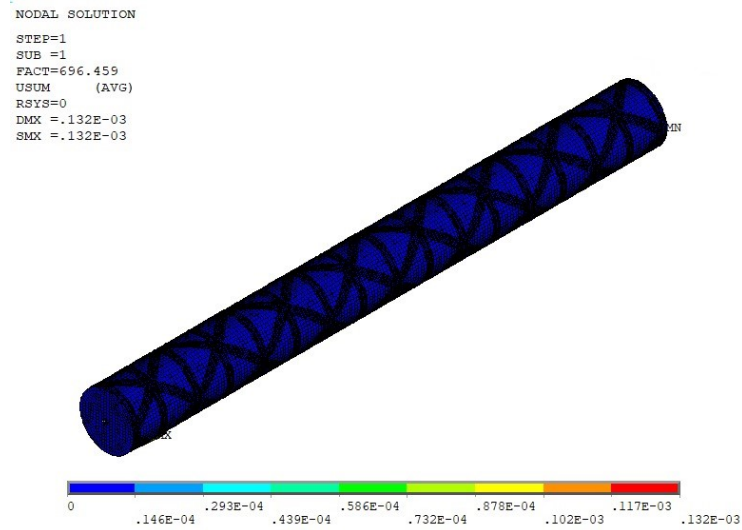


(b) 2° modo de flambagem da estrutura

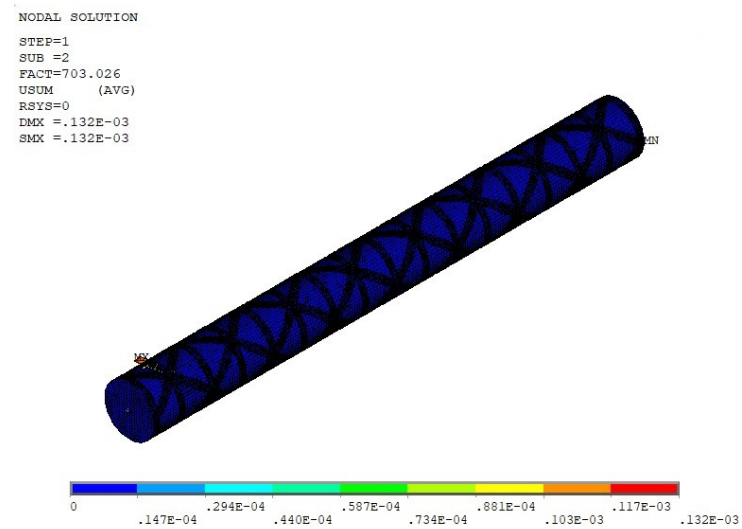


(c) 3° modo de flambagem da estrutura

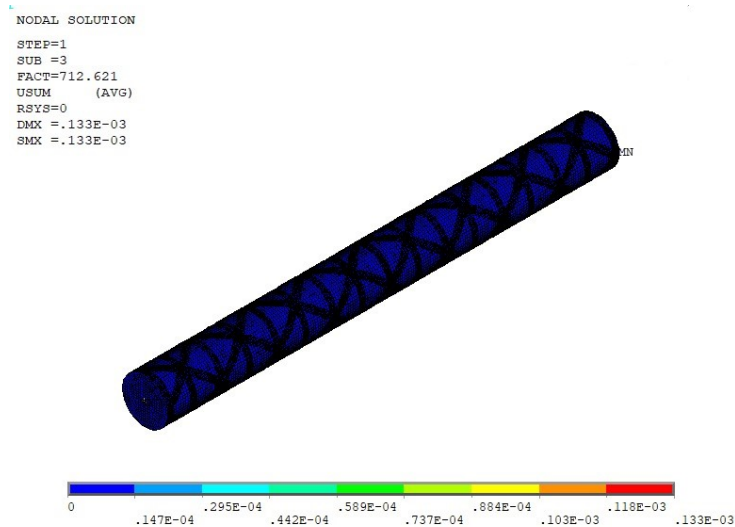
Figura 5.21: Modos de flambagem do *isogrid* sem reforço interno sob esforços de torção.
 Fonte: Autor.



(a) 1° modo de flambagem da estrutura.



(b) 2° modo de flambagem da estrutura



(c) 3° modo de flambagem da estrutura

Figura 5.22: Modos de flambagem do *isogrid* com reforço interno sob esforços de torção.
 Fonte: Autor.

5.1.5 Análise modal

Feito a análise, obteve-se as três primeiras frequências naturais da estrutura: 3286,5 Hz, 7876,1 Hz e 9605,3; E seus respectivos modos estão mostrados na Figura 5.23.

Já na presença do reforço interno, as três primeiras frequências naturais da estrutura são: 2405,1 Hz, 5435,4 Hz e 7152,6 Hz; E seus respectivos modos estão mostrados na Figura 5.24.

É possível notar pelos resultados que a presença do reforço interno diminui a frequência natural. Dada a Equação 5.5, nota-se que a frequência natural é inversalmente proporcional a raiz quadrada da massa.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.5)$$

Sendo:

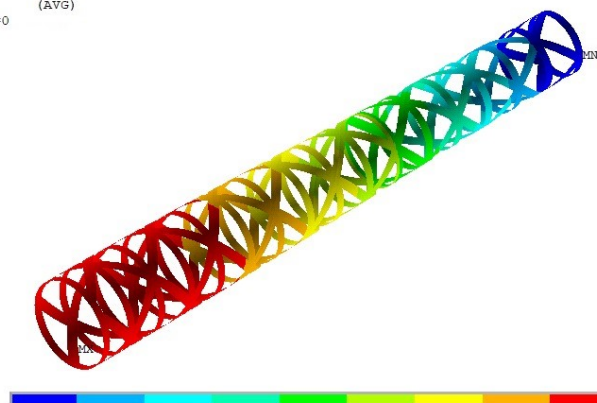
k - Rigidez do sistema;

m - Massa do sistema

Como a presença do reforço triplica, aproximadamente, a massa do sistema (29,87 g para 89,43 g), a frequência natural tende a diminuir, como foi mostrado pelos resultados.

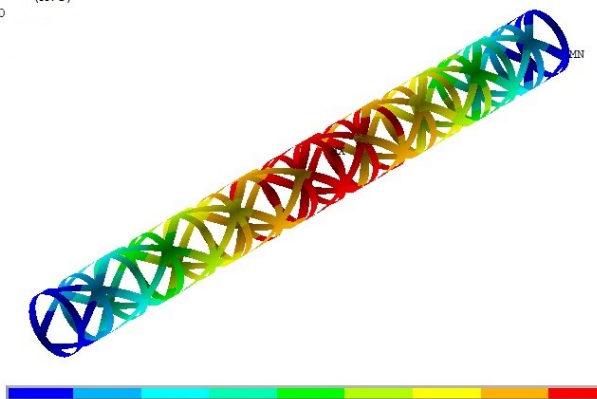
(INTENCIONALMENTE DEIXADO EM BRANCO)

```
NODAL SOLUTION  
STEP=1  
SUB =1  
FREQ=3286.47  
USUM (AVG)  
RSYS=0
```



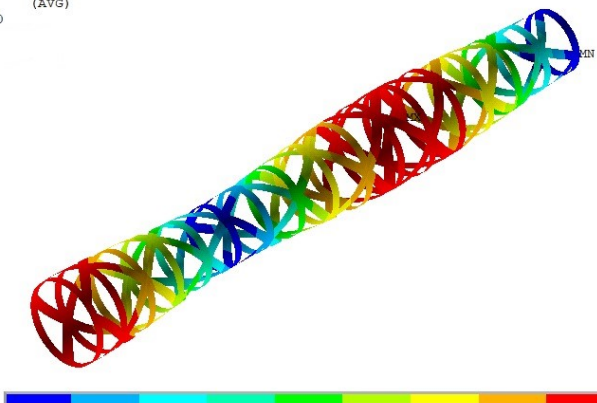
(a) 1º modo de vibração da estrutura.

```
NODAL SOLUTION  
STEP=1  
SUB =2  
FREQ=7876.08  
USUM (AVG)  
RSYS=0
```



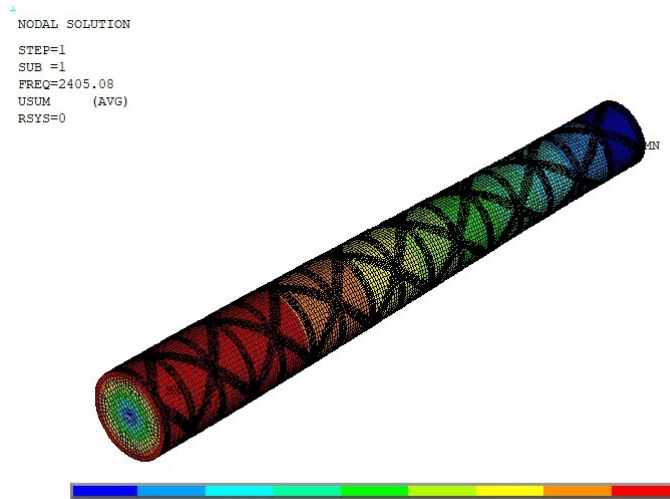
(b) 2º modo de vibração da estrutura

```
NODAL SOLUTION  
STEP=1  
SUB =3  
FREQ=9605.3  
USUM (AVG)  
RSYS=0
```



(c) 3º modo de vibração da estrutura

Figura 5.23: Modos de vibrar do *isogrid* sem o reforço interno. Fonte: Autor.



(a) 1º modo de vibração da estrutura.



(b) 2º modo de vibração da estrutura



(c) 3º modo de vibração da estrutura

Figura 5.24: Modos de vibrar do *isogrid* com reforço interno. Fonte: Autor.

5.1.6 Comparação dos resultados

Na Tabela 5.6 é mostrado um resumo de todos os resultados encontrados na simulação de validação, comparando, os que forem possíveis, com os resultados obtidos por Junqueira *et al.* (2019).

Tabela 5.2: Comparação entre os resultados encontrados para validação da estrutura de travessas rígidas com e sem reforço interno. Fonte: Autor.

Autor	Junqueira <i>et al.</i> (2019)	Presente estudo	Erro
Tsai-Wu (compressão) da estrutura sem reforço	1,11	0,99	10,8 %
Tsai-Wu (Torção) da estrutura sem reforço	0,1	0,1	0%
Tsai-Wu (compressão) da estrutura com reforço	0,68	0,48	29,4 %
Tsai-Wu (Torção) da estrutura com reforço	0,063	0,11	42,73 %
Tsai-Wu (Compressão) para a falha da estrutura com reforço	1	0,98	2%
Massa da estrutura sem reforço	*	29,87g	*
Massa da estrutura com reforço	82,2 g	89,43g	8,1 %
Carga crítica (Compressão) da estrutura sem reforço	*	53,76 kN	*
Carga crítica (Compressão) da estrutura com reforço	*	127,6 kN	*
Carga crítica (Torção) da estrutura sem reforço	*	1,11 kN·m	*
Carga crítica (Torção) da estrutura com reforço	*	4,94 kN·m	*
1º Frequência natural da estrutura sem reforço	*	3286,5 Hz	*
1º Frequência natural da estrutura com reforço	*	2405,1 Hz	*

Como explicado anteriormente, os resultados encontrados pelo modelo numérico do presente trabalho estão satisfatórios. Sendo assim, o modelo está validado e nas próximas seções serão abordados os tópicos relacionados a otimização do problema.

5.2 Planejamento de Experimentos

Como dito no Capítulo 4, as respostas procuradas serão: Tsai-Wu sob esforços de compressão ($Tsai-Wu_C$), Tsai-Wu sob esforços de torção ($Tsai-Wu_T$), Massa, Carga crítica de flambagem em compressão (C_{crC}), Carga crítica de flambagem em torção (C_{crT}) e Frequência natural (ω_n). É importante ressaltar que o *software* utilizado para realizar os experimentos de flambagem, gera um multiplicador de carga como resposta para o experimento. Dessa forma, como *input* para a metodologia de superfície de resposta, será utilizado o multiplicador de carga crítica de compressão (λ_{crC}) e o multiplicador de carga crítica de torção (λ_{crT}).

Inicialmente, será desenvolvida uma análise utilizando o Arranjo Fatorial Completo com o objetivo de reconhecer as variáveis que influenciam no experimento. Dessa forma, será possível saber quais têm maior impacto no comportamento do tubo. Posteriormente, a RSM será utilizada para desenvolver um modelo para a resposta. A matriz experimental do Arranjo Fatorial Completo para o *isogrid* na presença e na ausência do reforço interno estão mostrados nas Tabelas 5.7 e 5.8, respectivamente.

Pontos axiais são utilizados para a execução do experimento de RSM. Todos os experimentos feitos na fase fatorial são utilizados, somando-se apenas sete experimentos, que são os pontos axiais. Ressalta-se que, para o desenvolvimento da RSM, utiliza-se somente as variáveis importantes na análise de sensibilidade para obtenção da regressão. A matriz experimental do Arranjo de Superfície de Resposta na presença e na ausência do reforço interno estão mostrados nas Tabelas 5.9 e 5.10, respectivamente.

Tabela 5.3: Matriz de experimentos para o *isogrid* com reforço interno - Arranjo Fatorial Completo. Fonte: Autor.

	α (°)	δ_C (mm)	δ_H (mm)	Massa (g)	Tsai-Wu _C	λ_{crC}	Tsai-Wu _T	λ_{crT}	ω_n (Hz)
1	20	2	2	71,41	0,53	10,08	0,35	332,77	1385,17
2	50	2	2	75,55	0,93	13,57	0,17	469,46	2051,57
3	20	6	2	87,12	0,63	10,53	0,54	432,39	1362,66
4	50	6	2	87,07	0,65	18,29	0,19	380,83	2074,53
5	20	2	6	79,97	0,39	42,54	0,14	809,53	1945,18
6	50	2	6	81,87	0,53	50,99	0,07	1169,98	3125,80
7	20	6	6	102,68	0,28	44,32	0,12	839,80	1919,58
8	50	6	6	93,41	0,47	68,64	0,11	985,20	3119,80
9	35	4	4	85,41	0,28	26,13	0,14	673,12	2186,11
10	35	4	4	89,01	0,37	28,81	0,14	644,26	2343,57
11	35	4	4	86,36	0,34	24,66	0,14	638,68	2137,41
12	35	4	4	87,48	0,33	27,71	0,18	651,50	2270,09
13	35	4	4	85,15	0,32	24,19	0,15	642,87	2060,42

Tabela 5.4: Matriz de experimentos para o *isogrid* sem reforço interno - Arranjo Fatorial Completo. Fonte: Autor.

	α (°)	δ_C (mm)	δ_H (mm)	Massa (g)	Tsai-Wu _C	λ_{crC}	Tsai-Wu _T	λ_{crT}	ω_n (Hz)
1	20	2	2	10,09	1,18	1,29	0,18	4,71	2270,37
2	40	2	2	14,94	1,80	3,12	0,17	28,69	3266,82
3	20	6	2	15,79	0,55	2,35	0,42	8,81	1867,83
4	40	6	2	27,05	1,66	4,73	0,14	55,85	2463,69
5	20	2	6	24,56	0,44	15,79	0,21	58,82	2513,03
6	40	2	6	32,68	2,24	17,36	0,05	272,25	3810,46
7	20	6	6	30,26	0,30	23,33	0,19	88,57	2346,92
8	40	6	6	44,79	0,85	19,26	0,08	391,47	3309,55
9	30	4	4	24,26	0,56	13,45	0,10	82,15	2993,60
10	30	4	4	26,20	0,68	14,49	0,11	102,84	3071,66
11	30	4	4	25,13	0,64	13,96	0,10	88,80	2993,76
12	30	4	4	24,10	0,53	13,07	0,14	76,25	2906,92
13	30	4	4	23,48	0,51	12,71	0,15	71,09	2891,44

Tabela 5.5: Matriz de experimentos para o *isogrid* com reforço interno- Arranjo de Superfície de Resposta. Fonte: Autor.

	α (°)	δ_C (mm)	δ_H (mm)	Massa (g)	Tsai-Wu _C	λ_{crC}	Tsai-Wu _T	λ_{crT}	ω_n (Hz)
1	20	2	2	71,41	0,53	10,08	0,35	332,77	1385,16
2	40	2	2	75,56	0,93	13,57	0,17	469,46	2051,57
3	20	6	2	87,13	0,63	10,53	0,54	432,39	1362,66
4	40	6	2	87,07	0,65	18,29	0,19	380,83	2074,53
5	20	2	6	79,97	0,39	42,54	0,14	809,53	1945,18
6	40	2	6	81,87	0,53	50,99	0,07	1169,98	3125,80
7	20	6	6	102,68	0,28	44,32	0,12	839,80	1919,58
8	40	6	6	93,40	0,47	68,64	0,11	985,20	3119,79
9	20	4	4	79,34	0,59	24,87	0,24	585,23	1708,18
10	40	4	4	94,10	0,42	32,75	0,11	777,32	2683,32
11	30	2	4	78,59	0,51	28,10	0,14	654,89	2284,52
12	30	6	4	92,87	0,45	36,41	0,11	626,10	2324,55
13	30	4	2	80,07	0,46	12,75	0,29	374,75	1756,36
14	30	4	6	88,93	0,20	45,93	0,08	882,84	2557,40
15	30	4	4	85,41	0,28	26,13	0,14	673,12	2186,11
16	30	4	4	89,01	0,37	28,81	0,14	644,26	2343,57
17	30	4	4	84,42	0,27	27,61	0,14	613,45	2179,75
18	30	4	4	86,36	0,34	24,66	0,13	638,68	2137,41
19	30	4	4	87,48	0,33	27,71	0,18	651,45	2270,10
20	30	4	4	85,15	0,32	24,19	0,15	642,87	2060,42

Tabela 5.6: Matriz de experimentos para o *isogrid* sem reforço interno - Arranjo de Superfície de Resposta. Fonte: Autor.

	α (°)	δ_C (mm)	δ_H (mm)	Massa (g)	Tsai-Wu _C	λ_{crC}	Tsai-Wu _T	λ_{crT}	ω_n (Hz)
1	20	2	2	10,09	1,18	1,29	0,18	4,71	2270,37
2	40	2	2	14,94	1,80	3,12	0,17	28,69	3266,82
3	20	6	2	15,79	0,55	2,35	0,42	8,81	1867,83
4	40	6	2	27,05	1,66	4,73	0,14	55,85	2463,69
5	20	2	6	24,56	0,44	15,79	0,21	58,82	2513,03
6	40	2	6	32,68	2,24	17,36	0,05	272,25	3810,46
7	20	6	6	30,26	0,30	23,33	0,19	88,57	2346,92
8	40	6	6	44,79	0,85	19,26	0,08	391,47	3309,55
9	20	4	4	20,177	0,43	8,54	0,16	32,09	2312,34
10	50	4	4	29,87	0,99	12,03	0,10	157,54	3286,47
11	35	2	4	19,98	0,79	10,33	0,10	62,85	3268,24
12	35	6	4	28,53	0,55	15,69	0,21	103,89	2787,73
13	35	4	2	16,41	1,16	3,42	0,22	21,35	2583,91
14	35	4	6	32,10	1,49	23,05	0,14	178,52	3183,51
15	30	4	4	24,26	0,56	13,45	0,10	82,15	2993,60
16	30	4	4	26,20	0,68	14,49	0,11	102,84	3071,66
17	30	4	4	25,13	0,64	13,96	0,10	88,80	2993,76
18	30	4	4	24,10	0,53	13,07	0,14	76,25	2906,92
19	30	4	4	23,48	0,51	12,71	0,15	71,09	2891,44
20	30	4	4	25,30	0,54	14,47	0,09	95,91	3077,11

5.2.1 Análise para o *isogrid* com reforço interno

Análise pelo Arranjo Fatorial Completo

As Tabelas 5.11, 5.12 e 5.13 mostram os resultados da ANOVA em relação as respostas.

Tabela 5.7: Indicador R^2 da ANOVA para o modelo utilizando Arranjo Fatorial Completo. Fonte: Autor.

Respostas	R^2_{adj}
Massa	95,79%
Tsai-Wu _C	97,17%
λ_{crC}	98,70%
Tsai-Wu _T	98,30%
λ_{crT}	99,68%
Frequência natural	95,49%

Tabela 5.8: Resumo do modelo da ANOVA para o modelo utilizando Arranjo Fatorial Completo. Fonte: Autor.

Respostas	Fatores	<i>p-value</i>
Massa	Ângulo	0,506
	Espessura circular	0,000
	Espessura helicoidal	0,001
Tsai-Wu _C	Ângulo	0,001
	Espessura circular	0,016
	Espessura helicoidal	0,000
λ_{crC}	Ângulo	0,001
	Espessura circular	0,011
	Espessura helicoidal	0,000
Tsai-Wu _T	Ângulo	0,000
	Espessura circular	0,009
	Espessura helicoidal	0,000
λ_{crT}	Ângulo	0,000
	Espessura circular	0,021
	Espessura helicoidal	0,000
Frequência natural	Ângulo	0,000
	Espessura circular	0,926
	Espessura helicoidal	0,000

Tabela 5.9: Respostas de curvatura da ANOVA para o modelo utilizando Arranjo Fatorial Completo. Fonte: Autor.

Respostas	Curvatura
Massa	0,118
Tsai-Wu _C	0,000
λ_{crC}	0,006
Tsai-Wu _T	0,002
λ_{crT}	0,025
Frequência natural	0,293

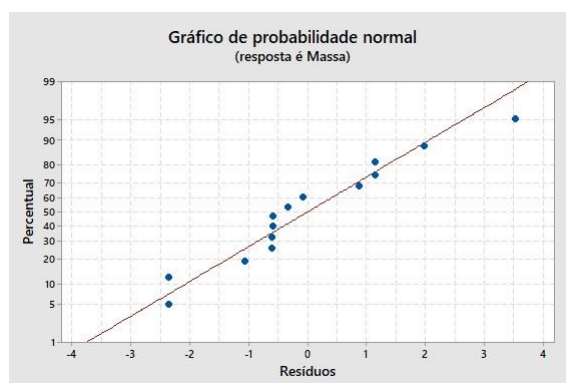
Os resultados da Tabela 5.11 revelam que o modelo utilizado é adequado para todas as respostas, pois todos os R_{adj}^2 estão próximos de 100%. Já na análise dos fatores utilizando *p-value* (Tabela 5.12), é possível verificar que o ângulo não tem significância quando a resposta buscada é a massa. Isso acontece devido a modificação do ângulo não causar grandes variações nessa resposta, pois se o ângulo das travessas helicoidais é aumentado, o número de travessas circulares aumenta, aumentando a massa total do *isogrid*. Porém, a massa do reforço interno diminui devido as ranhuras que são construídas para acomodar as travessas, fazendo com que a alteração da massa do conjunto não seja significativa.

Já quando se busca um modelo para a frequência natural, a espessura circular não tem significativa influência no resultado. Isso acontece porque há pouca variação na rigidez e pouca

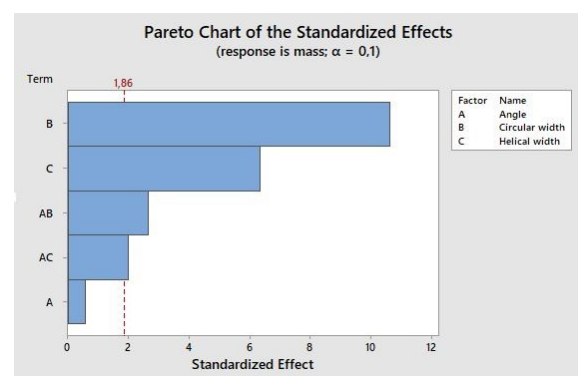
variação na massa da estrutura com a variação dessa espessura. Dessa forma, a variação da espessura circular não irá alterar significativamente o modelo de regressão.

Analisando a Tabela 5.13, percebe-se que o modelo para a massa e para a frequência natural não tem curvatura, um modelo linear, portanto, representará bem o problema. Já para as outras respostas, com curvatura, deverá ser utilizado um modelo quadrático.

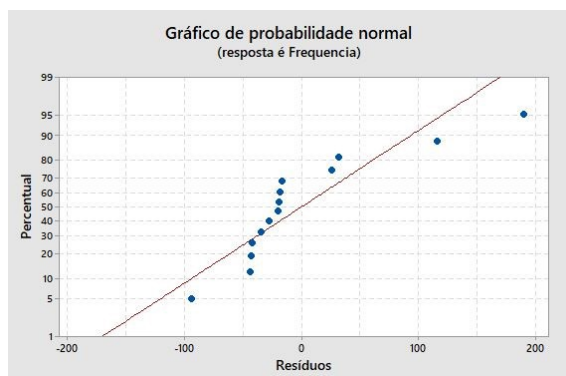
Dessa forma, para os modelos que representam a massa e a frequência, em termos práticos, a partir daqui, já se pode partir para a otimização, pois os termos significativos são lineares. Os resultados para as duas respostas utilizando apenas os fatores significativos estão mostrados na Figura 5.25.



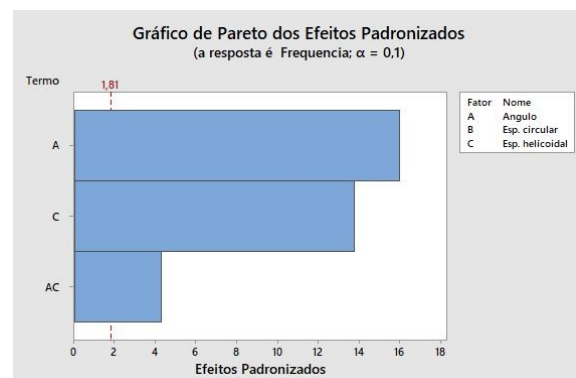
(a) Análise residual para massa.



(b) Análise de pareto para massa.



(c) Análise residual para frequência.



(d) Análise de pareto para frequência.

Figura 5.25: Análise residual e Análise de pareto para a massa e para a frequência natural do *isogrid* com reforço interno utilizando Arranjo Fatorial Completo. Fonte: Autor.

É importante ressaltar que mesmo o ângulo não sendo um fator significativo para o modelo de massa, ele não pode ser retirado da análise. Pois a interação ângulo-espessura circular e ângulo-espessura helicoidal são significativas, como mostrado na Figura 5.25(b).

Ademais, as Figuras 5.25(a) e 5.25(c) mostram que os resíduos estão distribuídos normalmente, confirmando, portanto, que o modelo para massa e para frequência natural utilizando

o Arranjo Fatorial Completo é adequado. As curvas geradas para estas duas respostas estão mostradas na Figura 5.26.

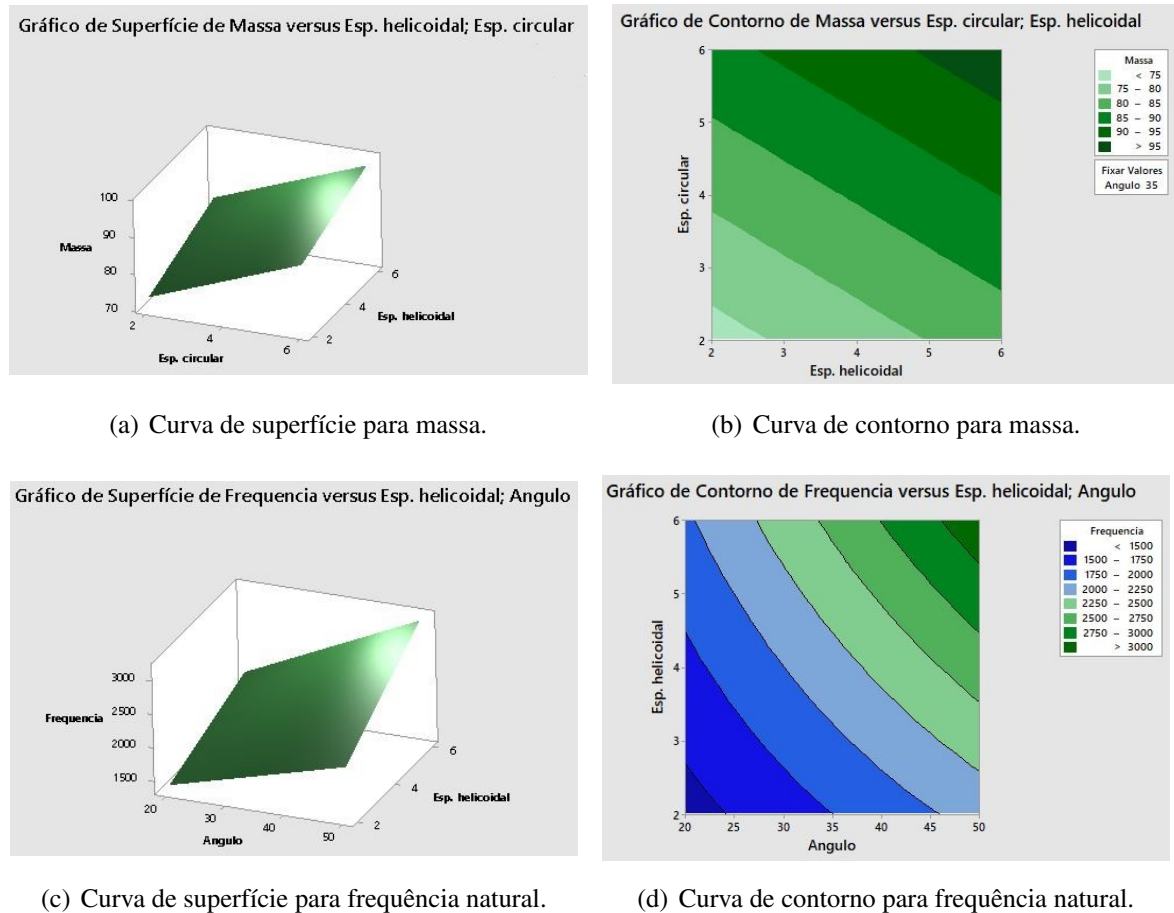


Figura 5.26: Curva de superfície e curva de contorno para massa e para frequência natural do *isogrid* com reforço interno. Fonte: Autor.

Confirma-se pelas Figuras 5.26(a) e 5.26(c) que o modelo gerado para Massa e para Frequência são lineares, pois as superfícies mostradas não têm curvatura. Já pela Figura 5.26(b), nota-se que a massa aumenta com o aumento da espessura circular e helicoidal e, finalmente, pela Figura 5.26(d), nota-se que a frequência natural aumenta com o aumento do ângulo e da espessura helicoidal.

As Equações 5.6 e 5.7 mostram as equações de regressão relacionando a resposta e os fatores de interesse para a massa e para a frequência natural, respectivamente.

$$Massa = 53,01 + 0,229 \cdot x_1 + 6,08 \cdot x_2 + 2,298 \cdot x_3 - 0,0641 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.6)$$

$$Frequencia = 832 + 14,62 \cdot x_1 + 56,1 \cdot x_3 + 4,18 \cdot x_1 \cdot x_3 \quad (5.7)$$

Análise pelo arranjo de Superfície de Resposta

Com base no projeto fatorial e na análise de variância foi realizada uma análise de superfície de resposta com o intuito de examinar a qualidade do ajuste, de verificar o efeito das interações e de otimizar os parâmetros de resposta. Os resultados que indicam a qualidade do ajuste através do indicador R_{adj}^2 podem ser vistos na Tabela 5.14.

Tabela 5.10: Resumo das respostas utilizando RSM. Fonte: Autor.

Respostas	S	R^2	R_{adj}^2	R_{pred}^2
Tsai-Wu _C	0,09	80,84%	74%	47,96%
Tsai-Wu _T	0,04	92,69%	90,31%	62,87%
λ_{crC}	2,36	98,41%	97,48%	88,92%
λ_{crT}	17,67	99,56%	99,30%	98,57%

Dessa forma, conclui-se que as três últimas respostas da Tabela 5.14 possuem modelos apropriados e com alta capacidade preditiva, com o indicador R_{adj}^2 acima de 90%, destacando o quão bem o modelo se ajusta aos dados. Por outro lado, Tsai-Wu sob esforços de compressão reproduziu uma capacidade preditiva mais baixa, com o indicador R_{adj}^2 de 74%, porém, esse resultado não é baixo o suficiente para demonstrar uma falta de ajuste, sendo assim, o resultado é considerado aceitável. Para determinar a magnitude e a importância dos efeitos foram gerados gráficos de Pareto, mostrados na Figura 5.27.

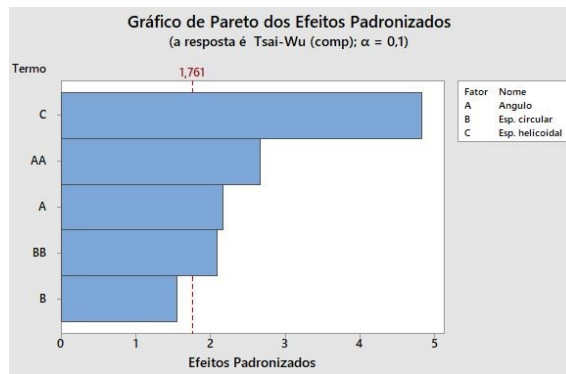
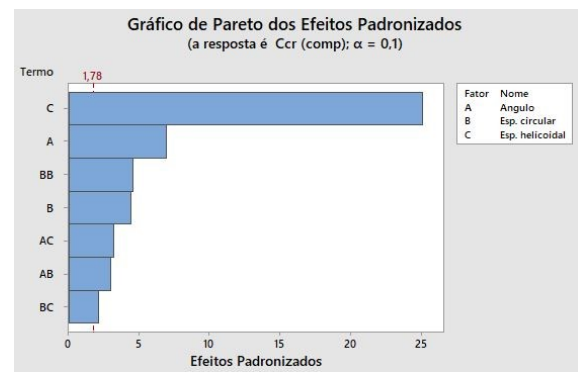
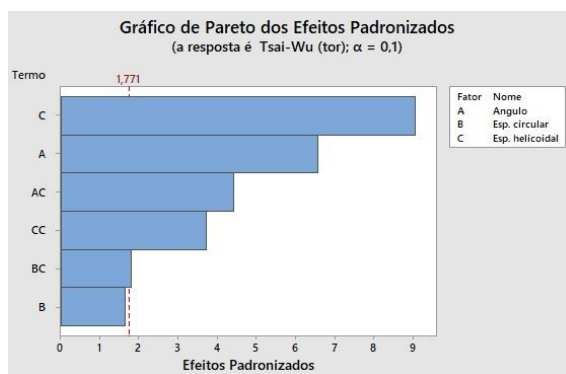
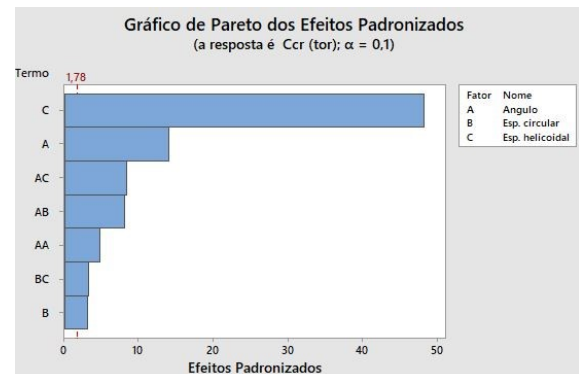
(a) Análise de Pareto para Tsai-Wu_C.(b) Análise de Pareto para λ_{crC} .(c) Análise de Pareto para Tsai-Wu_T.(d) Análise de Pareto para λ_{crT} .

Figura 5.27: Análise de Pareto para as respostas (a) Tsai-Wu_C (b) λ_{crC} (c) Tsai-Wu_T (d) λ_{crT} do *isogrid* com reforço interno utilizando RSM. Fonte: Autor.

Os gráficos de Pareto representam os principais efeitos e suas interações, a linha vermelha tracejada simboliza a relevância dos efeitos. Dessa forma, enquanto que, para o Tsai-Wu_C e para o Tsai-Wu_T, a espessura circular não é significativa, para λ_{crC} e λ_{crT} todos os fatores tem importância. Ademais, os gráficos de Pareto confirmam a espessura helicoidal como o fator mais significativo em todas as respostas e a espessura circular, quando é significativa, é o fator que menos tem influencia.

Considerando a relevância dos fatores, conforme ilustrado nos gráficos de Pareto, foram elaborados gráficos de efeitos principais com o objetivo de fornecer uma informação, relacionando os níveis dos fatores com as respostas, conforme ilustrado na Figura 5.28.

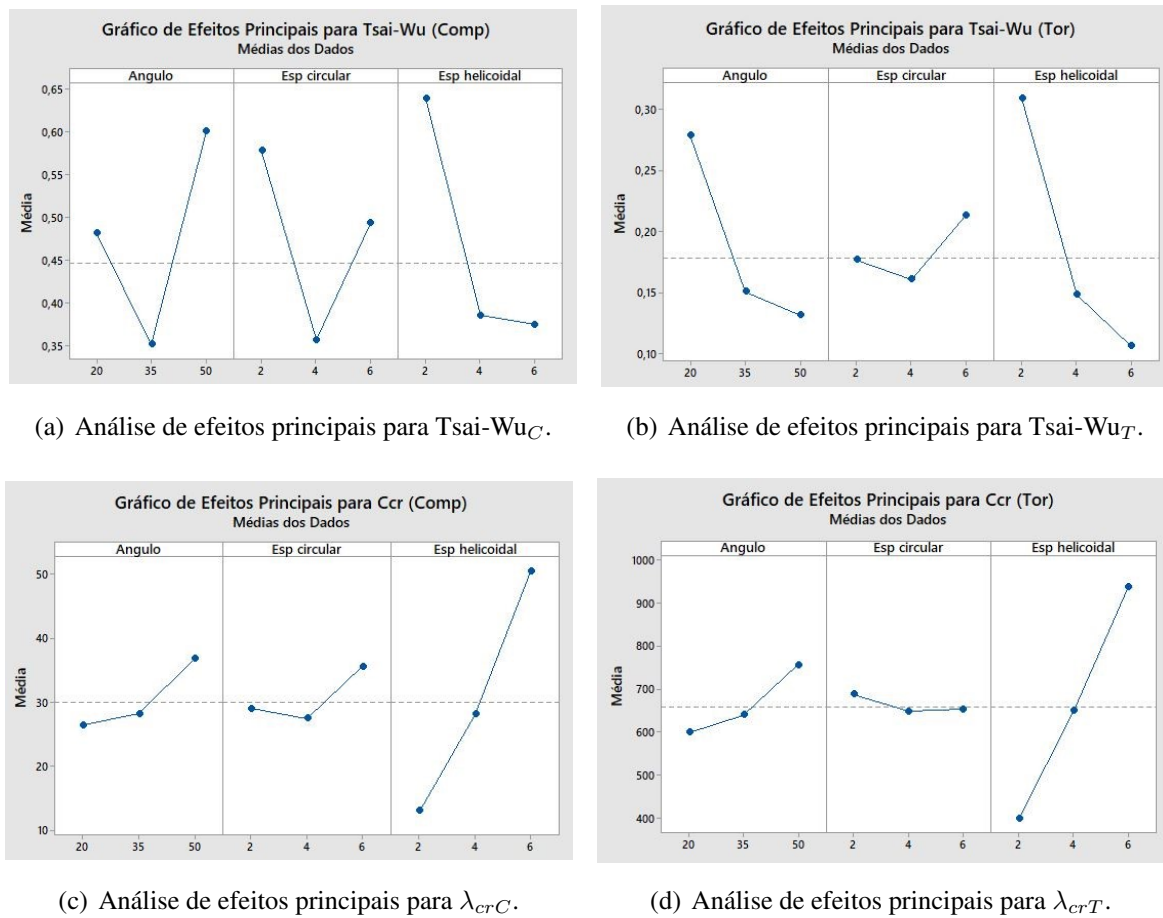


Figura 5.28: Análise de efeitos principais para as respostas (a) Tsai-Wu_C (b) Tsai-Wu_T (c) λ_{crC} (d) λ_{crT} do *isogrid* com reforço interno utilizando RSM. Fonte: Autor.

Pelo gráfico de efeitos principais é possível notar que para minimizar Tsai-Wu_C, deve-se aumentar a espessura helicoidal e manter um valor intermediário para o ângulo e para a espessura circular. Já para o Tsai-Wu_T, deve-se aumentar o ângulo e a espessura helicoidal e manter a espessura circular em valores intermediários. Para maximizar λ_{crC} , deve-se aumentar todos os fatores e, finalmente, para maximizar λ_{crT} , deve-se aumentar o ângulo e a espessura helicoidal, mantendo a espessura circular em valores intermediários.

Com o objetivo de determinar a relação entre a resposta e os fatores do modelo, foram geradas equações de regressão para Tsai-Wu_C, λ_{crC} , Tsai-Wu_T e λ_{crT} , como mostra as Equações 5.8 a 5.11, respectivamente.

$$Tsai-Wu_C = 1,653 - 0,0363 \cdot x_1 - 0,2241 \cdot x_2 - 0,0663 \cdot x_3 + 0,000575 \cdot x_1^2 + 0,0254 \cdot x_2^2 \quad (5.8)$$

$$\lambda_{crC} = 26,06 - 0,348 \cdot x_1 - 12,69 \cdot x_2 + 4,44 \cdot x_3 + 1,202 \cdot x_2^2 + 0,0839 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0897 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,445 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (5.9)$$

$$T_{sai} - W_{uT} = 0,884 - 0,01233 \cdot x_1 + 0,0320 \cdot x_2 - 0,2118 \cdot x_3 + 0,01485 \cdot x_3^2 + 0,001850 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,00569 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (5.10)$$

$$\lambda_{crT} = 96,9 - 6,89 \cdot x_1 + 70,9 \cdot x_2 + 94,2 \cdot x_3 + 0,1689 \cdot x_1^2 - 1,680 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,753 \cdot x_1 \cdot x_3 - 5,17 \cdot x_3 \cdot x_2 \quad (5.11)$$

As equações de regressão demonstram a combinação dos fatores, sendo frequentemente usadas como modelo de previsão para otimizar as variáveis de projeto. A Figura 5.29 mostra as superfícies de respostas geradas pelo experimento de RSM.

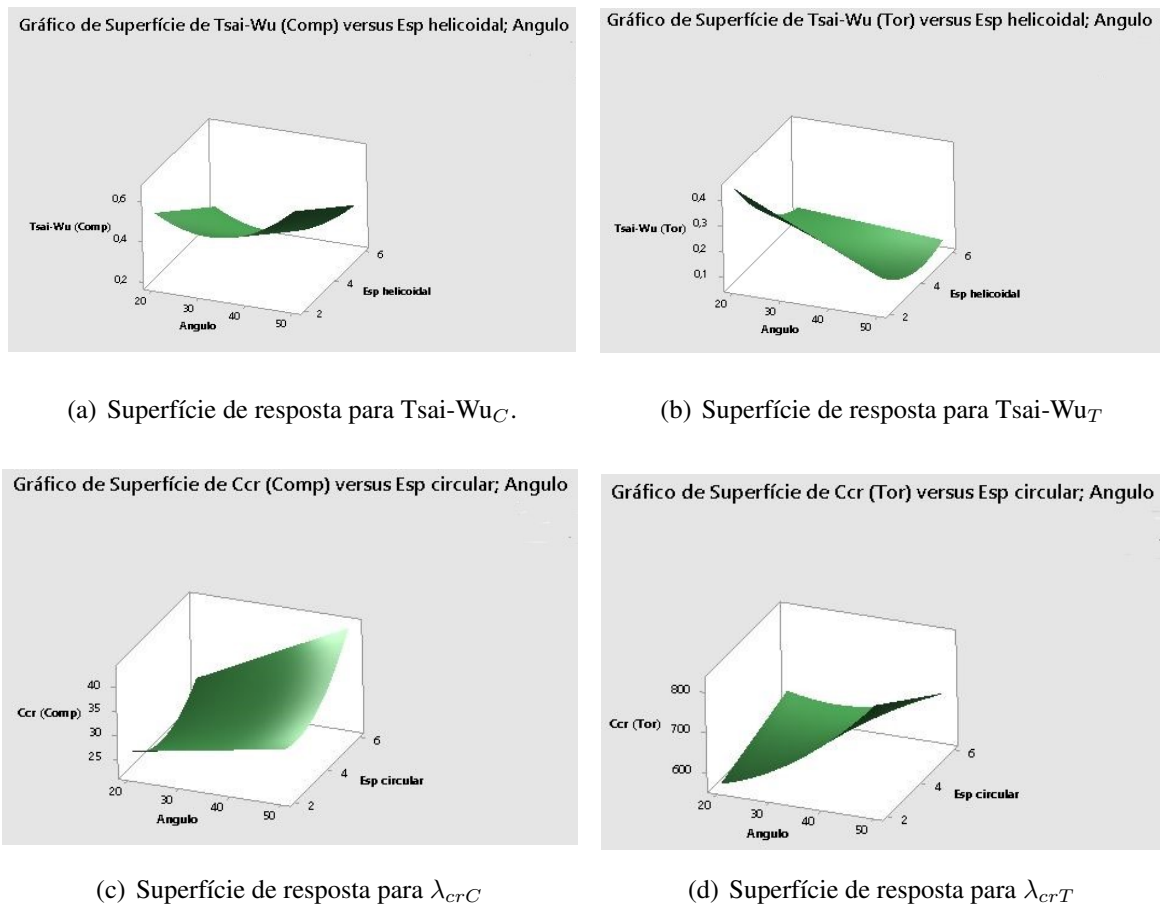


Figura 5.29: Superfícies de respostas para (a) Tsai-Wu_C (b) Tsai-Wu_T (c) λ_{crC} (d) λ_{crT} do *isogrid* com reforço interno. Fonte: Autor.

As plotagens das superfícies mostradas na Figura 5.29 revelam superfícies de respostas quadráticas, na qual os pontos máximos e mínimos estão localizados na região ideal. Na próxima seção, a estrutura de travessas rígidas sem o reforço será analisada.

5.2.2 Análise para o *isogrid* sem reforço interno

Análise pelo Arranjo Fatorial Completo

Nesta seção, será feita a análise para o *isogrid* sem a presença do reforço para analisar se o tubo, nessas condições, gera boas configurações de projeto. É notório que a massa será menor, porém, é necessário avaliar outras propriedades para analisar se o tubo irá cumprir os requisitos da norma. Para isso, inicialmente, foi feita uma análise utilizando o Arranjo Fatorial Completo e a análise de variância foi empregada para comparar a qualidade do ajuste e decifrar o modelo de regressão.

As Tabelas 5.15, 5.16 e 5.17 mostram os resultados da ANOVA em relação as respostas.

Tabela 5.11: Indicador R^2 da ANOVA utilizando Arranjo Fatorial Completo para o *isogrid* sem a presença de reforço interno. Fonte: Autor.

Respostas	R^2_{adj}
Massa	98,60%
Tsai-Wu _C	98,72%
λ_{crC}	98,79%
Tsai-Wu _T	92,17%
λ_{crT}	98,69%
Frequência natural	97,54%

Tabela 5.12: Resumo do modelo da ANOVA utilizando Arranjo Fatorial Completo para o *isogrid* sem a presença de reforço interno. Fonte: Autor.

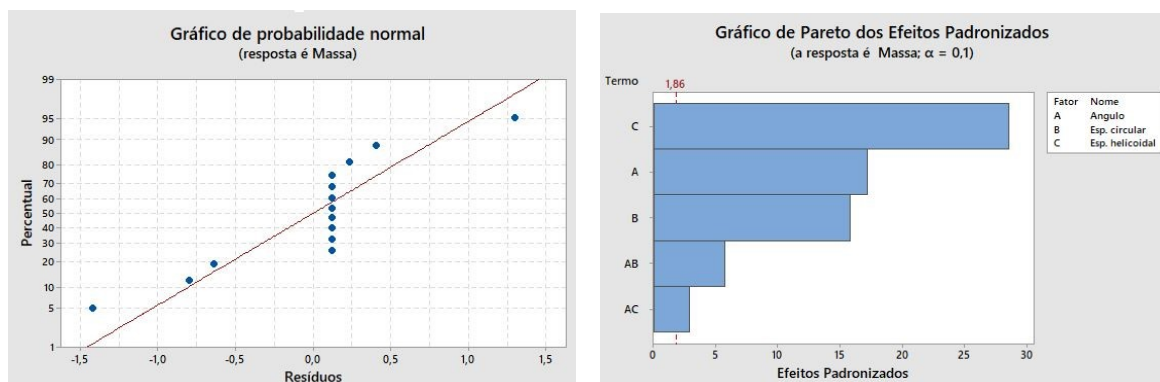
Respostas	Fatores	<i>p-value</i>
Massa	Ângulo	0,000
	Espessura circular	0,000
	Espessura helicoidal	0,000
Tsai-Wu _C	Ângulo	0,000
	Espessura circular	0,000
	Espessura helicoidal	0,001
λ_{crC}	Ângulo	0,448
	Espessura circular	0,002
	Espessura helicoidal	0,000
Tsai-Wu _T	Ângulo	0,001
	Espessura circular	0,027
	Espessura helicoidal	0,004
λ_{crT}	Ângulo	0,000
	Espessura circular	0,003
	Espessura helicoidal	0,000
Frequência natural	Ângulo	0,000
	Espessura circular	0,000
	Espessura helicoidal	0,000

Tabela 5.13: Respostas de curvatura da ANOVA utilizando Arranjo Fatorial Completo para o *isogrid* sem a presença de reforço interno. Fonte: Autor.

Respostas	Curvatura
Massa	0,628
Tsai-Wu _C	0,000
λ_{crC}	0,001
Tsai-Wu _T	0,005
λ_{crT}	0,008
Frequência natural	0,002

Os resultados da Tabela 5.15 revelam que o modelo utilizado é adequado para todas as respostas, pois todos os R_{adj}^2 estão próximos de 100%. Já na análise dos fatores utilizando *p-value* (Tabela 5.16), é possível verificar que o ângulo não tem significância quando a resposta buscada é λ_{crC} . Para todas as outras respostas, todos os fatores são significativos. Analisando a Tabela 5.17, percebe-se que o modelo para a massa não tem curvatura, um modelo linear, portanto, representará bem o problema. Já para as outras respostas, com curvatura, deverá ser utilizado um modelo quadrático.

Dessa forma, para o modelo que representa a massa, em termos práticos, a partir daqui, já se pode partir para a otimização, pois os termos significativos são lineares. Os resultados para essa resposta utilizando apenas os fatores significativos estão mostrados na Figura 5.30.

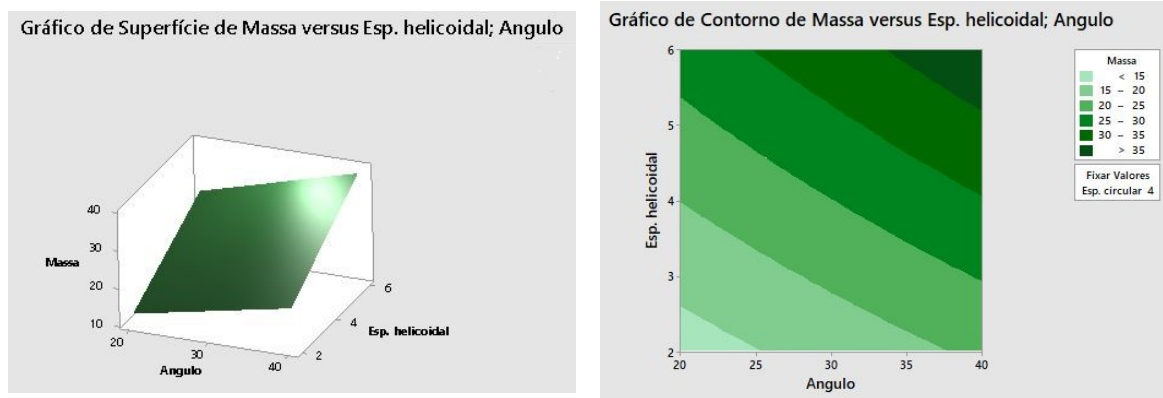


(a) Análise residual para massa.

(b) Análise de Pareto para massa.

Figura 5.30: Análise residual e Análise de Pareto para a massa do *isogrid* sem a presença do reforço interno utilizando Arranjo Fatorial Completo. Fonte: Autor.

A Figura 5.30(a) mostra que os resíduos estão distribuídos normalmente, confirmando, portanto, que o modelo para massa utilizando o Arranjo Fatorial Completo é adequado. Ademais, a análise de Pareto reforça que os três fatores são significativos para a análise. As curvas geradas para a resposta estão mostradas na Figura 5.31.



(a) Gráfico de superfície.

(b) Gráfico de contorno.

Figura 5.31: Gráfico de superfície e de contorno para a resposta massa do *isogrid* sem reforço interno. Fonte: Autor.

A Figura 5.31(a) confirma que o modelo para a massa é linear, pois a curva gerada não tem curvatura. Já a Figura 5.31(b) mostra que a massa diminui quando a espessura helicoidal e o ângulo são diminuídos. A Equação 5.12 mostra a equação de regressão relacionando a resposta e os fatores de interesse.

$$Massa = -0,22 + 0,0003 \cdot x_1 - 0,178 \cdot x_2 + 2,799 \cdot x_3 + 0,0802 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0409 \cdot x_1 \cdot x_3 \quad (5.12)$$

Análise pelo Arranjo de Superfície de Resposta

Para as respostas que foram identificadas com curvatura no experimento fatorial realizado anteriormente, será feita uma análise, utilizando o Arranjo de Superfície de Resposta. Os resultados que indicam a qualidade do ajuste através do indicador R_{adj}^2 podem ser vistos na Tabela 5.18.

Tabela 5.14: Resumo das respostas utilizando RSM. Fonte: Autor.

Respostas	S	R^2	R_{adj}^2	R_{pred}^2
Tsai-Wu _C	0,257437	81,52%	76,59%	56,79%
Tsai-Wu _T	0,441484	76,70%	74,38%	18,21%
λ_{crC}	1,33558	97,13%	95,80%	87,17%
λ_{crT}	13,2055	98,73%	97,98%	90,58%
Frequência natural	58,4876	99,08%	98,42%	98,12%

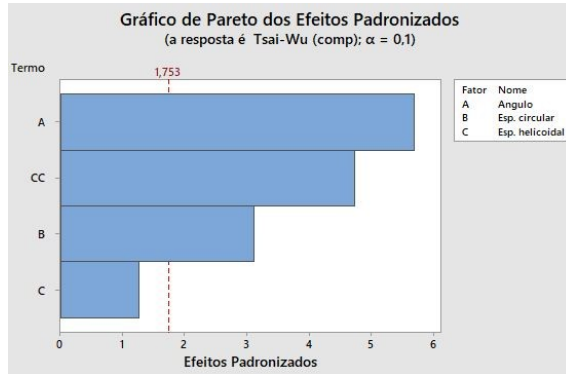
Dessa forma, conclui-se que as três últimas respostas da Tabela 5.14 possuem modelos apropriados e com alta capacidade preditiva, com o indicador R_{adj}^2 acima de 95%, destacando o

quão bem o modelo se ajusta aos dados. Por outro lado, Tsai-Wu sob esforços de compressão e sob esforços de torção reproduziram uma capacidade preditiva mais baixa, com o indicador R_{adj}^2 de 76,59% e de 74,38%, respectivamente. Porém, como já foi relatado para a análise do *isogrid* com reforço interno, esses resultados não são baixos o suficiente para demonstrar uma falta de ajuste, sendo assim, o resultado é considerado aceitável.

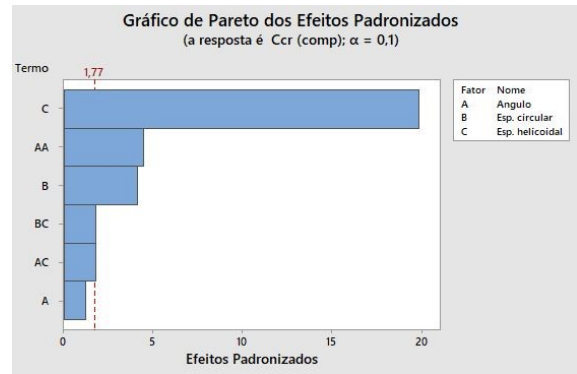
A Figura 5.32 mostra os gráficos de Pareto gerados para determinar a magnitude e a importância dos efeitos. Dessa forma, enquanto que, para o Tsai-Wu_T, para a λ_{crT} e para a frequência natural todos os fatores tem importância, para o Tsai-Wu_C, a espessura helicoidal não é significativa e para a λ_{crC} , o ângulo não tem significância. Ademais, os gráficos de Pareto confirmam a espessura helicoidal como o fator mais significativo para λ_{crC} e λ_{crT} e o ângulo para as outras respostas.

Posteriormente, considerando a relevância dos fatores, conforme ilustrado nos gráficos de Pareto, foram elaborados gráficos de efeitos principais com o objetivo de fornecer uma informação, relacionando os níveis dos fatores com as respostas, conforme ilustrado na Figura 5.33.

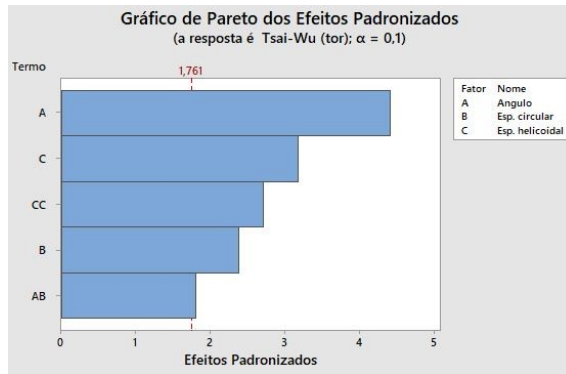
(INTENCIONALMENTE DEIXADO EM BRANCO)



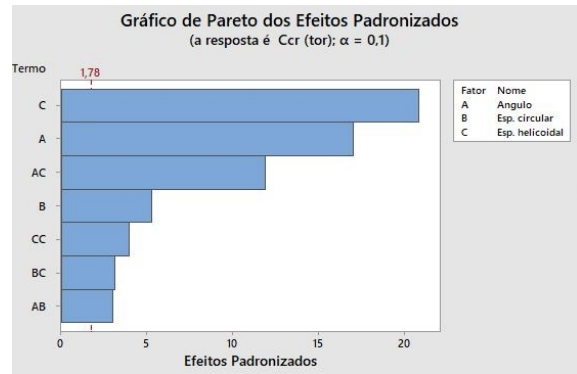
(a) Análise de Pareto para Tsai-Wu_C.



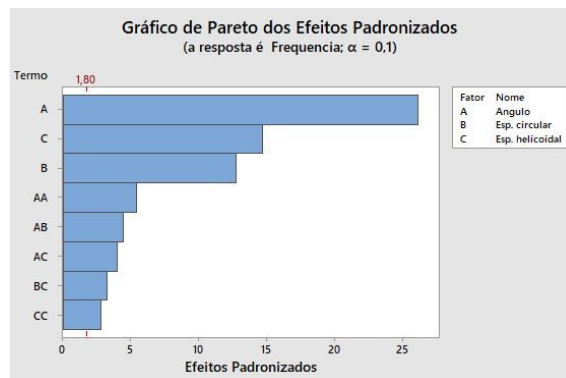
(b) Análise de pareto para λ_{crC} .



(c) Análise de Pareto para Tsai-Wu_T

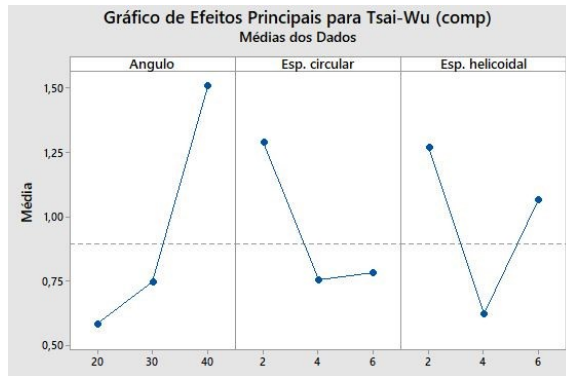
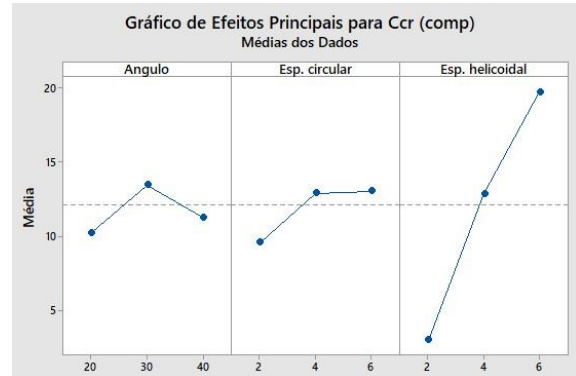
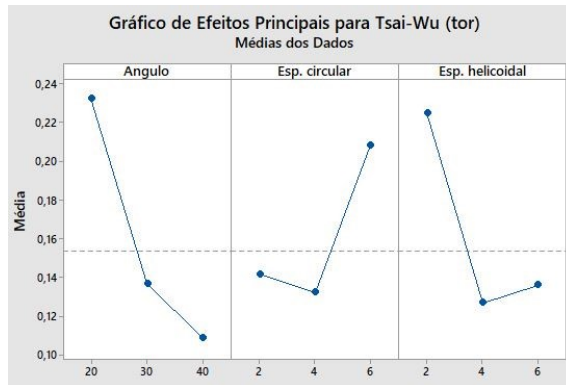
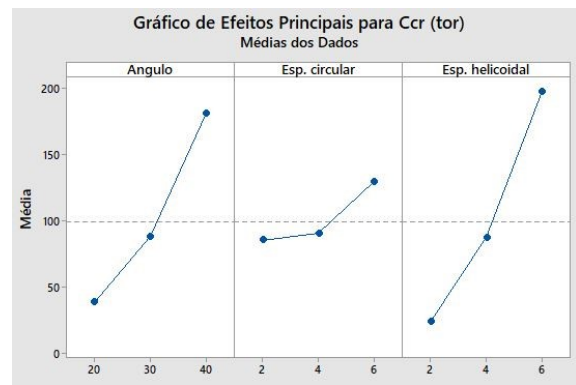
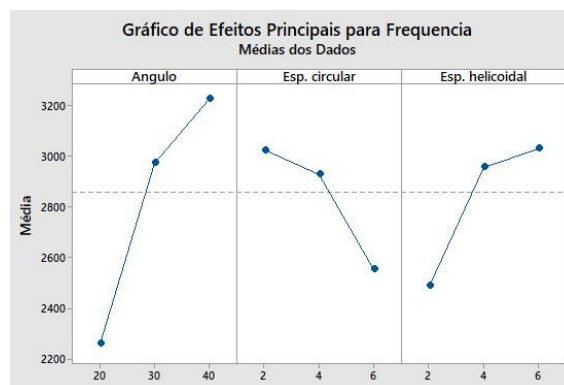


(d) Análise de pareto para λ_{crT} .



(e) Análise de pareto para Frequência natural.

Figura 5.32: Análise de pareto para as respostas (a) Tsai-Wu_C (b) λ_{crC} (c) Tsai-Wu_T (d) λ_{crT} (e) Frequência natural do *isogrid* sem reforço interno utilizando RSM. Fonte: Autor.

(a) Análise de efeitos principais para Tsai-Wu_C.(b) Análise de efeitos principais para Tsai-Wu_T.(c) Análise de efeitos principais para λ_{crC} .(d) Análise de efeitos principais para λ_{crT} .

(e) Análise de efeitos principais para frequência natural.

Figura 5.33: Análise de efeitos principais para as respostas (a) Tsai-Wu_C (b) Tsai-Wu_T (c) λ_{crC} (d) λ_{crT} (e) Frequência natural do *isogrid* sem reforço interno utilizando RSM. Fonte: Autor.

Pelo gráfico de efeitos principais é possível notar que para minimizar Tsai-Wu_C, deve-se diminuir o ângulo e manter a espessura circular e a helicoidal em valores intermediários. Já para Tsai-Wu_T, deve-se aumentar o ângulo e adicionar valores médios para a espessura circular e a espessura helicoidal. Ademais, para maximizar λ_{crC}, deve-se aumentar a espessura helicoidal e manter valores centrais para a espessura circular e para o ângulo. Para maximizar λ_{crT}, deve-se aumentar todos os fatores e, finalmente, para maximizar a frequência natural, deve-se aumentar o ângulo, a espessura helicoidal e diminuir a espessura circular.

Com o objetivo de determinar a relação entre a resposta e os fatores do modelo, foram geradas equações de regressão para Tsai-Wu_C, λ_{crC}, Tsai-Wu_T, λ_{crT} e frequência natural, como mostram as Equações 5.13 a 5.17, respectivamente.

$$Tsai - Wu_C = 2,427 + 0,04634 \cdot x_1 - 0,1271 \cdot x_2 - 1,142 \cdot x_3 + 0,1363 \cdot (x_3)^2 \quad (5.13)$$

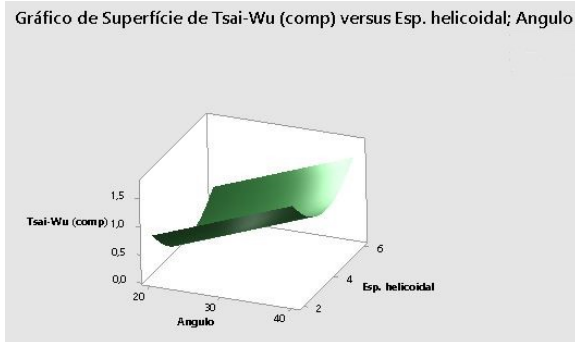
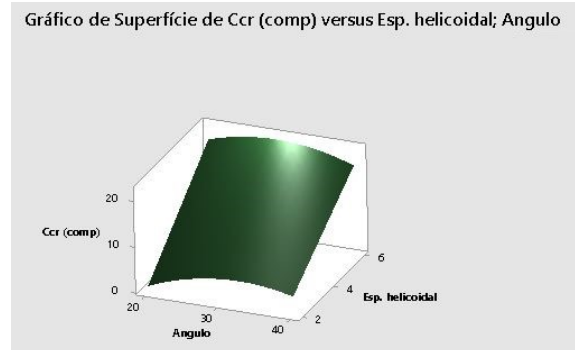
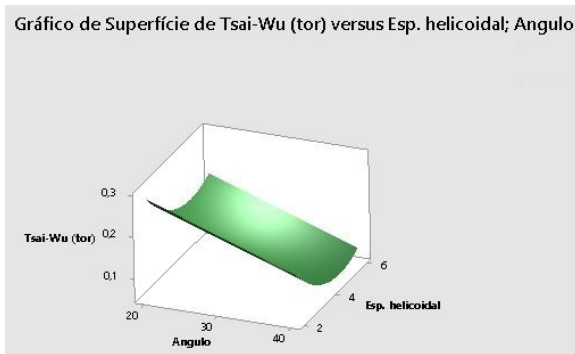
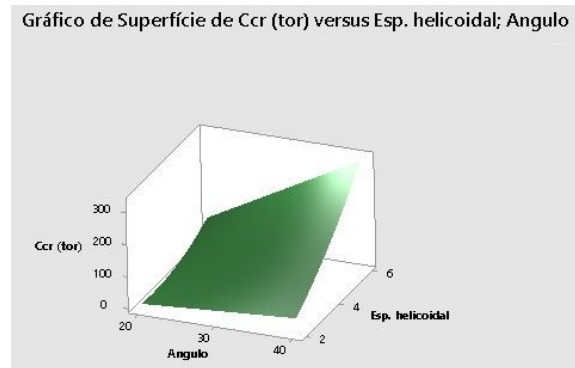
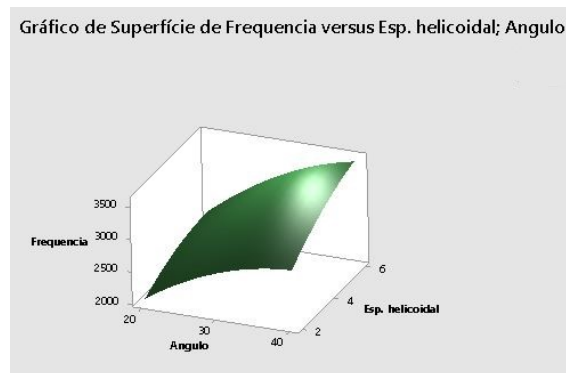
$$\lambda_{crC} = -34,16 + 1,829 \cdot x_1 + 0,029 \cdot x_2 + 4,608 \cdot x_3 - 0,02682 \cdot (x_1)^2 - 0,0419 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,211 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (5.14)$$

$$Tsai - Wu_T = 0,380 - 0,00053 \cdot x_1 + 0,0590 \cdot x_2 - 0,1295 \cdot x_3 + 0,01340 \cdot (x_3)^2 - 0,001412 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.15)$$

$$\lambda_{crT} = 426,7 - 6,82 \cdot x_1 - 24,75 \cdot x_2 - 101,8 \cdot x_3 + 5,89 \cdot (x_3)^2 + 0,703 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2,783 \cdot x_1 \cdot x_3 + 3,68 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (5.16)$$

$$Freq = -258 + 155,6 \cdot x_1 - 47,1 \cdot x_2 + 126,4 \cdot x_3 - 1760 \cdot (x_1)^2 - 22,93 \cdot (x_3)^2 - 4,6 \cdot x_1 \cdot x_2 + 4,17 \cdot x_1 \cdot x_3 + 16,83 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (5.17)$$

As equações de regressão demonstram a combinação dos fatores, sendo frequentemente usadas como modelo de previsão para otimizar as variáveis de projeto. A Figura 5.34 mostra as superfícies de respostas geradas pelo experimento de RSM.

(a) Superfície de resposta para Tsai-Wu_C.(b) Superfície de resposta para λ_{crC} (c) Superfície de resposta para Tsai-Wu_T(d) Superfície de resposta para λ_{crT} 

(e) Superfície de resposta para Frequência natural

Figura 5.34: Superfícies de respostas para (a) Tsai-Wu_C (b) λ_{crC} (c) Tsai-Wu_T (d) λ_{crT} (e) Frequência natural do *isogrid* sem a presença de reforço interno. Fonte: Autor.

As plotagens das superfícies mostradas na Figura 5.34 revelam superfícies de respostas quadráticas, na qual os pontos máximos e mínimos estão localizados na região de curvatura. Na próxima seção, será feita a otimização das respostas.

5.3 Otimização do Tubo Protético

Dois algoritmos foram utilizados para otimizar as equações encontradas nas seções anteriores. Primeiramente, foi utilizado o algoritmo de enxame de partículas para realizar as otimizações mono-objetivo e, posteriormente, foi utilizado o algoritmo genético para realizar as otimizações multi-objetivo. A otimização mono-objetivo da estrutura com e sem reforço são apresentadas nas Tabelas 5.19 e 5.20, respectivamente.

Tabela 5.15: Otimização mono-objetivo da estrutura com reforço. Fonte: Autor.

	Objetivo	Resposta	Ângulo	Espessura circular	Espessura helicoidal	Resultado pelo modelo RSM	Resultado pelo MEF.
1	Minimizar	Tsai-Wu _C	31,56°	4,41 mm	6 mm	0,19	0,20
2	Minimizar	Tsai-Wu _T	49,99°	2 mm	4,40 mm	0,04	0,11
3	Maximizar	C _{crC}	50°	6 mm	6 mm	315,97 kN	307,51 kN
4	Maximizar	C _{crT}	50°	2 mm	6 mm	8,36 kN·m	8,31 kN·m
5	Maximizar	Frequência natural	50°	4 mm	6 mm	3153,60 Hz	3209,26 Hz
6	Minimizar	Massa	20°	2 mm	2 mm	71,78 g	71,41 g

Tabela 5.16: Otimização mono-objetivo da estrutura sem reforço. Fonte: Autor.

	Objetivo	Resposta	Ângulo	Espessura circular	Espessura helicoidal	Resultado pelo modelo RSM	Resultado pelo MEF.
1	Minimizar	Tsai-Wu _C	20°	6 mm	4,19 mm	0,20	0,30
2	Minimizar	Tsai-Wu _T	39,99°	2 mm	4,83 mm	0,05	0,05
3	Maximizar	C _{crC}	29,41°	6 mm	6 mm	109,58 kN	110,34 kN
4	Maximizar	C _{crT}	40°	6 mm	6 mm	2,83 kN·m	2,78 kN·m
5	Maximizar	Frequência natural	40°	2 mm	6 mm	3823,50 Hz	3810,46 Hz
6	Minimizar	Massa	20°	2 mm	2 mm	9,87 g	10,09 g

Pode-se notar pelos resultados das duas configurações ótimas obtidas pela minimização da massa que ela aumenta quase sete vezes quando o reforço é inserido. É interessante ressaltar que a massa do reforço e do *isogrid* são inversamente proporcionais, ou seja, quando uma aumenta a outra diminui. Isso acontece porque as cavidades precisam ser maiores quando as travessas são mais espessas, fazendo com que haja maior retirada de material do polímero.

Como a massa específica do *isogrid* é a maior, diminuir a massa das travessas é mais importante do que diminuir a massa do reforço. Devido a isso, a configuração que minimiza a massa para a estrutura reforçada é igual a configuração que minimiza a massa da estrutura sem reforço.

Já na análise para o Tsai-Wu_C e para o Tsai-Wu_T, nota-se que não há grande variação nos resultados ótimos obtidos. A estrutura com reforço têm resultados ligeiramente menores, porém, não é menor suficiente para concluir que a estrutura reforçada gera melhores resultados. Isso demonstra que o reforço interno tem grande influência na estrutura, pois, mesmo com configurações diferentes, os resultados obtidos foram bem próximos. A análise, utilizando o critério de falha de Tsai-Wu, feita pelo MEF, está mostrado na Figura 5.35.

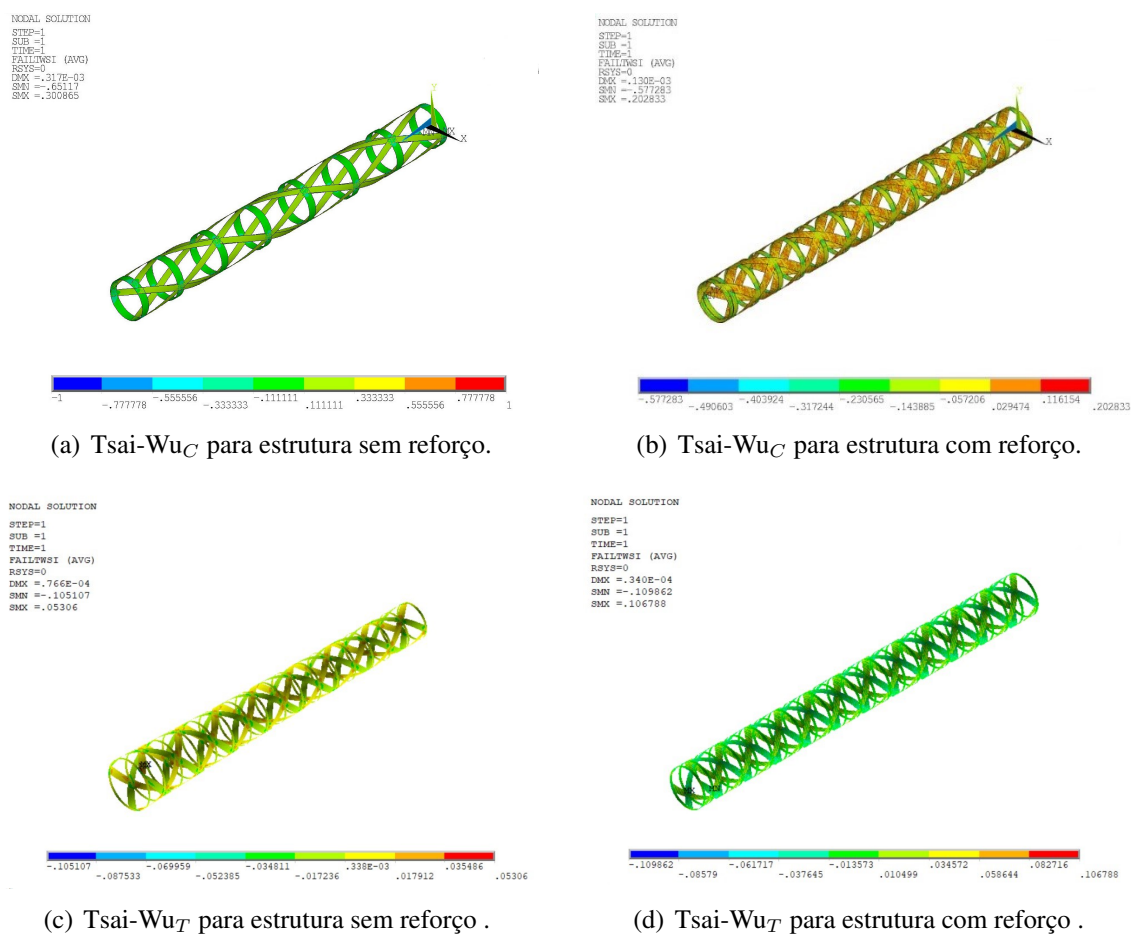


Figura 5.35: Análise pelo critério de falha de Tsai-Wu das configurações otimizadas mono-objetivamente. Fonte: Autor.

Já a análise para a Carga Crítica de Flambagem mostra que a presença do reforço melhora significativamente os resultados encontrados. Na presença do reforço, a C_{crC} e a C_{crT} são aproximadamente três vezes maiores. Os resultados estão na Figura 5.36.

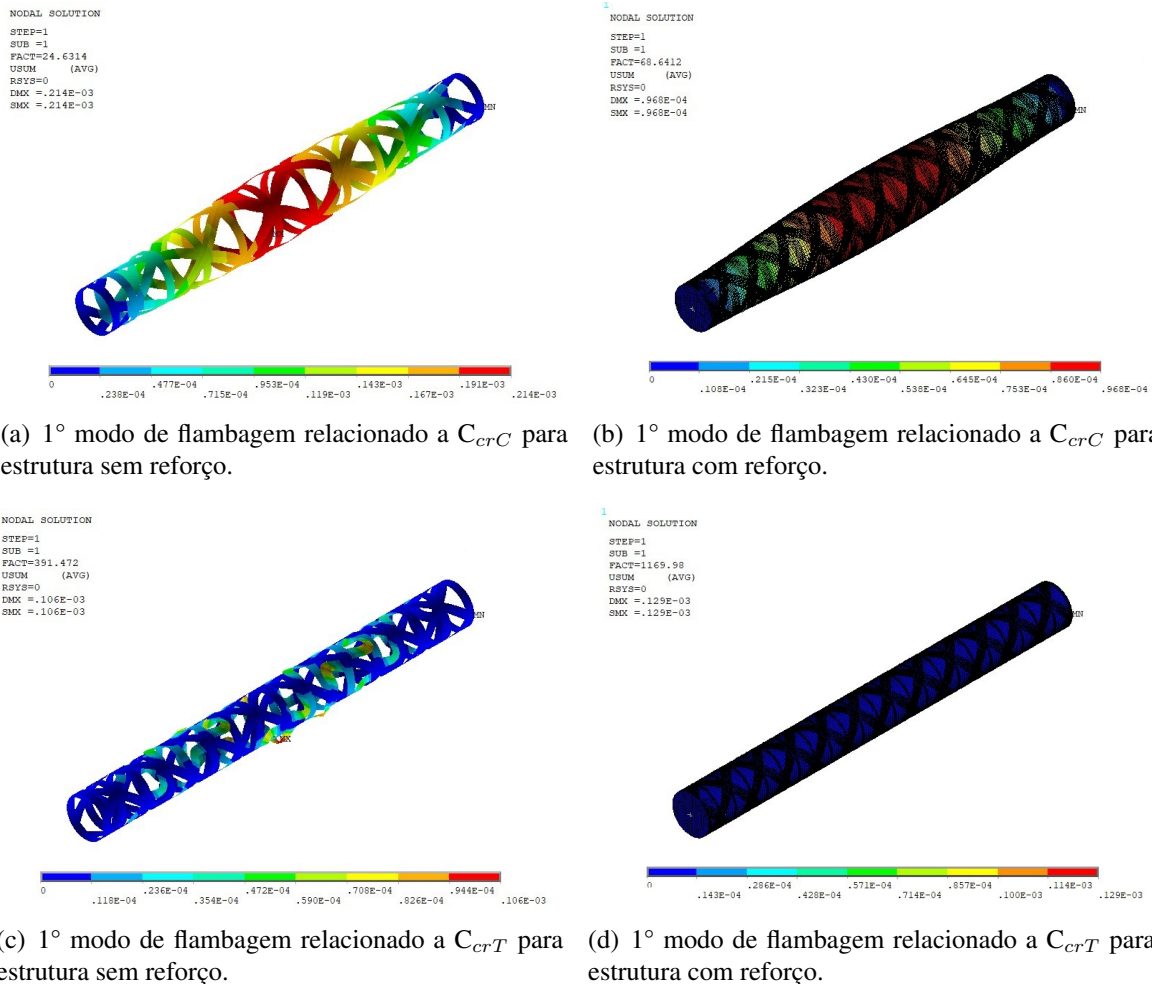
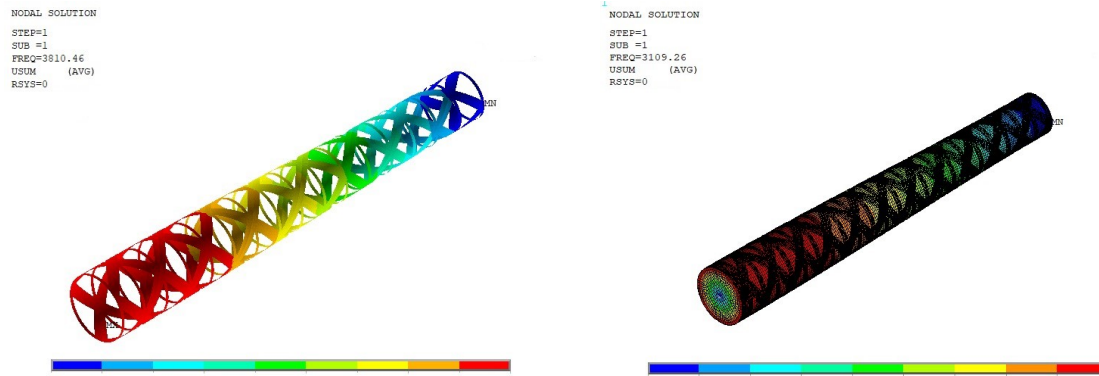


Figura 5.36: Análise de flambagem das estruturas otimizadas mono-objetivamente. Fonte: Autor.

Já com relação a frequência, a presença do reforço diminui o valor da resposta. Isso acontece porque a frequência depende da rigidez e da massa da estrutura, sendo diretamente proporcional a raiz quadrada da primeira e inversamente proporcional a raiz quadrada da segunda. Dessa forma, com o aumento da massa, a frequência diminui. Os resultados estão mostrados na Figura 5.37.



(a) 1° modo de vibrar da estrutura sem reforço.

(b) 1° modo de vibrar da estrutura com reforço.

Figura 5.37: Modo de vibrar da configuração otimizada mono-objetivamente para frequência natural. Fonte: Autor.

Dessa forma, tem-se a otimização para todas as respostas propostas inicialmente. Pode-se concluir que a escolha da melhor configuração depende da necessidade do usuário. Todas as configurações, com reforço interno, atendem aos requisitos da norma e podem ser utilizados. Já na ausência de reforço, as configurações ótimas para massa, para Tsai-Wu_T e para frequência natural não atenderam algum dos requisitos e não podem ser fabricadas.

Ademais, para englobar outros casos, é possível modificar as restrições, analisando a melhor configuração para cada situação existente, neste trabalho, isso seria inviável devido ao grande número de possibilidades.

Para finalizar, será feito uma análise multi-objetivo, ou seja, será otimizado todas as respostas simultaneamente. As Tabelas 5.21 e 5.22 mostram os resultados encontrados para a estrutura com e sem reforço, respectivamente.

Tabela 5.17: Otimização multi-objetivo da estrutura com reforço. Fonte: Autor.

Objetivo	Resposta	α (°)	δ_C (mm)	δ_H (mm)	Resultado pelo modelo RSM	Resultado pelo MEF	Erro
Minimizar	Tsai-Wu _C	31,4	4,43	5,99	0,19	0,25	24%
Minimizar	Tsai-Wu _T				0,10	0,10	0%
Maximizar	C_{crC}				220,68 kN	272,86 kN	19%
Maximizar	C_{crT}				6,26 kN·m	6,62 kN·m	5%
Maximizar	ω_n				2399,10 Hz	2563,85 Hz	6 %
Minimizar	Massa				92,01 g	93,48 g	2%

Tabela 5.18: Otimização multi-objetivo da estrutura sem reforço. Fonte: Autor.

Objetivo	Resposta	α (°)	δ_C (mm)	δ_H (mm)	Resultado pelo modelo RSM	Resultado pelo MEF	Erro
Minimizar	Tsai-Wu _C	23,34	5,59	4,73	0,44	0,40	10%
Minimizar	Tsai-Wu _T				0,20	0,20	0%
Maximizar	C_{crC}				75,44 kN	75,86 kN	1%
Maximizar	C_{crT}				610,22 N·m	539,25 N·m	12%
Maximizar	ω_n				2541,8 Hz	2505,55 Hz	2%
Minimizar	Massa				27,02 g	36,04 g	25%

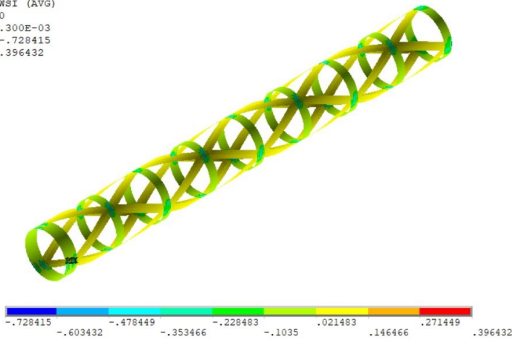
Nas duas situações, com e sem reforço interno, os resultados obtidos pelo MEF foram bem próximos dos obtidos pelo modelo da RSM, destacando que este modelo está fiel aos experimentos.

Pode-se notar que os resultados foram diferentes para os dois tipos de estruturas. Na presença do reforço, a massa aumentou, a frequência diminuiu, C_{crC} aumentou, C_{crT} aumentou e Tsai-Wu (tanto para compressão quanto para torção) diminuiu. Dessa forma, conclui-se que a estrutura reforçada é pior somente nos quesitos massa e frequência, para as outras respostas, a estrutura reforçada têm melhor desempenho.

Por fim, a Figura 5.38 mostra a análise para o critério de falha de Tsai Wu, a Figura 5.39 mostra a análise para a carga crítica de flambagem e para a frequência natural.

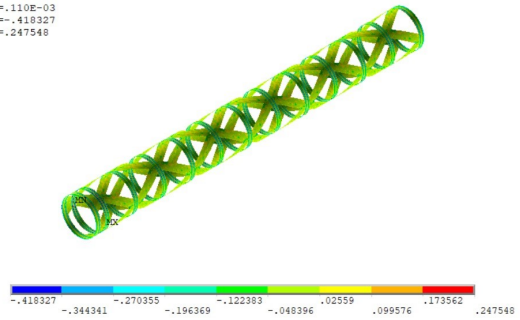
(INTENCIONALMENTE DEIXADO EM BRANCO)

```
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
FALLTWSI (AVG)
RSYS=0
DMX =.300E-03
SMN =-.728415
SMX =.396432
```



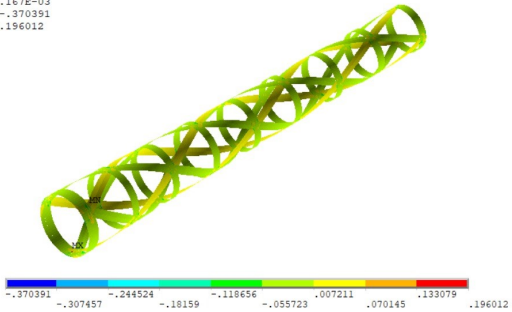
(a) Tsai-Wu_C para estrutura sem reforço.

```
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
FALLTWSI (AVG)
RSYS=0
DMX =.110E-03
SMN =-.418327
SMX =.247548
```



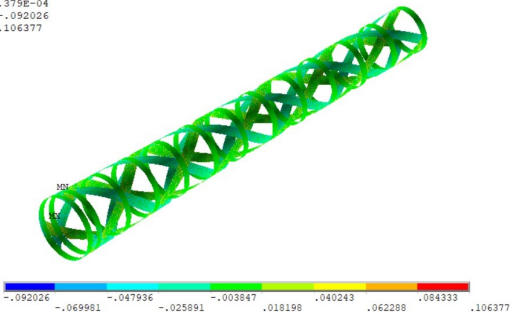
(b) Tsai-Wu_C para estrutura com reforço.

```
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
FALLTWSI (AVG)
RSYS=0
DMX =.167E-03
SMN =-.370391
SMX =.196012
```



(c) Tsai-Wu_T para estrutura sem reforço .

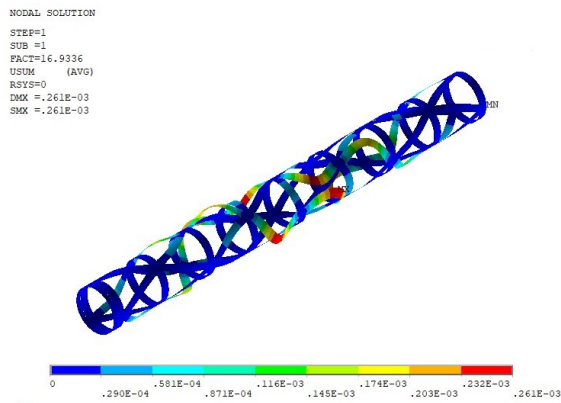
```
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
FALLTWSI (AVG)
RSYS=0
DMX =.379E-04
SMN =-.092026
SMX =.106377
```



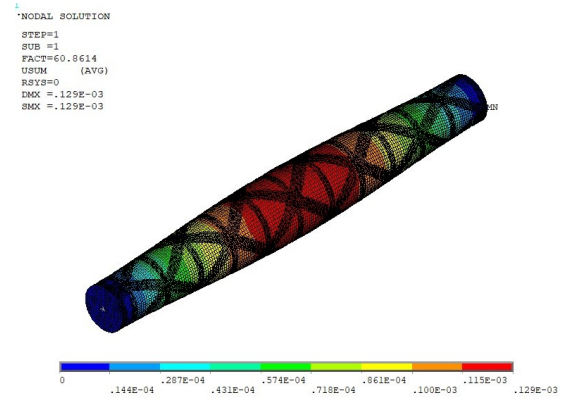
(d) Tsai-Wu_T para estrutura com reforço .

Figura 5.38: Análise pelo critério de falha de Tsai-Wu das configurações otimizadas multi-objetivamente. Fonte: Autor.

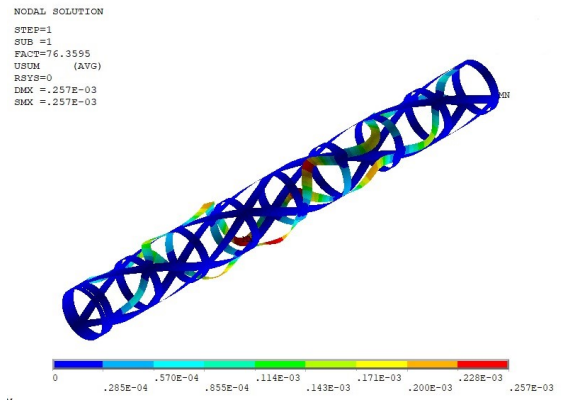
(INTENCIONALMENTE DEIXADO EM BRANCO)



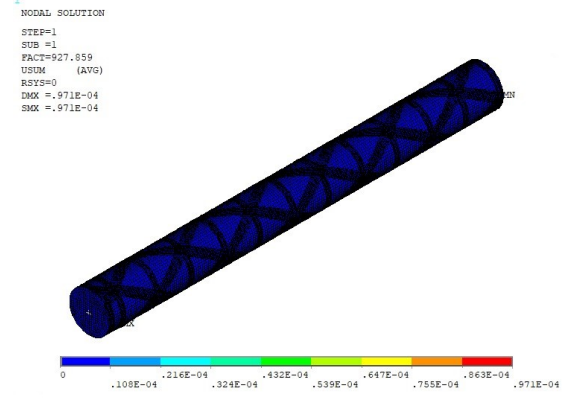
(a) 1° modo de flambagem relacionado a C_{crC} para estrutura sem reforço.



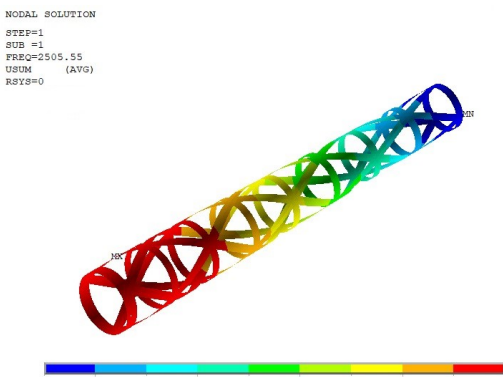
(b) 1° modo de flambagem relacionado a C_{crC} para estrutura com reforço.



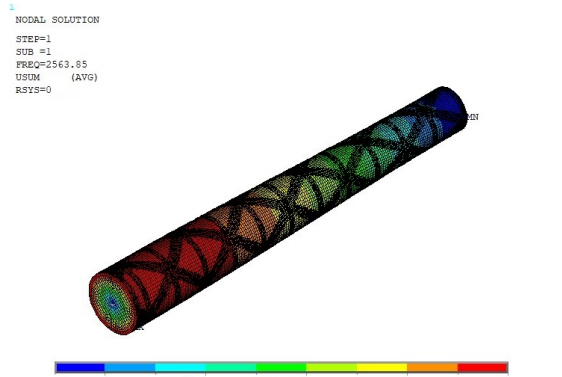
(c) 1° modo de flambagem relacionado a C_{crT} para estrutura sem reforço.



(d) 1° modo de flambagem relacionado a C_{crT} para estrutura com reforço.



(e) Frequência natural da estrutura sem reforço (Hz).



(f) Frequência natural da estrutura com reforço (Hz).

Figura 5.39: Análise de flambagem e Análise modal das estruturas otimizadas multi-objetivamente. Fonte: Autor.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Conclusões

A presente pesquisa propôs-se a estudar o emprego da Metodologia de Superfície de Resposta devido algumas vantagens, a principal é a possibilidade de criar um meta-modelo que representa o experimento. Algumas outras vantagens e algumas desvantagens percebidas na utilização do método estão descritas a seguir:

Vantagens:

- Análise de sensibilidade das variáveis de entrada e das interações entre essas;
- Análise de curvatura da região de solução proposta e visualização da curva de superfície de resposta;
- Para calcular o ponto ótimo é necessário um menor número de experimentos, isso foi de grande importância devido as simulações que gastam grande quantidade de tempo.

Desvantagens:

- Possibilidade de erro e gasto de tempo na preparação e análise dos experimentos;
- Erro causado pela criação do metamodelo. Ou seja, o modelo gerado pela RSM não 100% fiel a realidade.

Dessa forma, foi realizado a otimização 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 desse tipo. Todas as configurações de tubos com camada interna estrutural propostas por este trabalho

atingiram os requisitos técnicos exigidos pela norma. Já nos tubos sem camada interna, a otimização com relação a massa, a frequência e ao Tsai Wu sob esforços de torção levou a projetos que não atendem a norma.

Do ponto de vista estrutural, o uso de uma camada interna em tubos de travessas rígidas se mostrou muito eficiente e bem promissor. 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 e melhora significativamente a resistência aos esforços aplicados.

Já em relação a analisar, pelo método dos elementos finitos, os tubos protéticos de travessas rígidas utilizando a norma como referência, pode-se afirmar que é uma ótima ferramenta para o projeto. 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 apropriada para projeto e análise de tubos de travessas rígidas.

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 a maioria das estruturas de travessas rígidas propostas por este trabalho possuem viabilidade para serem utilizadas como tubo para próteses transtibiais. É possível escolher a melhor configuração para utilização dependendo do objetivo do usuário, menor massa, menor Tsai Wu e etc. Com relação a otimização multi-objetivo, as duas configurações propostas, com e sem reforço, são viáveis e suportam com folga os carregamentos da norma. Porém, a estrutura sem reforço tem massa 61% menor, fazendo com que ela seja a mais indicada para ser utilizada como tubo protético.

Em relação a verificar o erro entre os resultados numéricos e os resultados do modelo:

Foi visto nos experimentos de confirmação, que a regressão foi satisfatória na previsão dos resultados, pois seus resultados foram bem próximos aos experimentos de confirmação. Ou seja, quando se coloca a mesma configuração de variáveis de entrada no modelo de simulação e na equação do metamodelo, têm-se resultados muito próximos, dessa forma, o ajuste entre os resultados foi excelente. Levando em consideração todas os ajustes das estruturas propostas por este trabalho, todos ficaram entre 80% e 100%, sendo que a maioria delas ficou acima dos 95%. Isso mostra que é muito confiável a realização do projeto inicial por simulação numérica de tubos de travessas rígidas com e sem 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.

6.2 Recomendações Para Trabalhos Futuros

- Manufaturar a estrutura e realizar ensaios experimentais para as configurações ótimas obtidas;
- Desenvolver um modelo numérico para análise de fadiga;
- 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 a utilização de uma estrutura *anisogrid* ao invés da *isogrid*;
- Realizar uma otimização do *layup* do laminado utilizado nas travessas rígidas.

Referências Bibliográficas

- Akay e Karaboga(2012)** Bahriye Akay e Dervis Karaboga. A modified artificial bee colony algorithm for real-parameter optimization. *Information sciences*, 192:120–142.
- Akl et al.(2008)** W Akl, A El-Sabbagh, e A Baz. Optimization of the static and dynamic characteristics of plates with isogrid stiffeners. *Finite Elements in Analysis and Design*, 44 (8):513–523.
- Ancelotti Jr(2006)** AC Ancelotti Jr. Efeitos da porosidade na resistência ao cisalhamento e nas propriedades dinâmicas de compósitos de fibra de carbono/resina epóxi. *Master of Science dissertation, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brazil*.
- Anderson e McLean(2018)** Virgil L Anderson e Robert A McLean. *Design of experiments: a realistic approach*. Routledge.
- Antony e Frangou(1998)** Jiju Antony e Andreas Frangou. A strategic methodology to the use of advanced statistical quality improvement techniques. *The TQM magazine*, 10(3):169–176.
- Bansal et al.(2019)** Jagdish Chand Bansal, Pramod Kumar Singh, e Nikhil R Pal. *Evolutionary and swarm intelligence algorithms*. Springer.
- Bastos Filho et al.(2008)** Carmelo JA Bastos Filho, Fernando B de Lima Neto, Anthony JCC Lins, Antonio IS Nascimento, e Marília P Lima. A novel search algorithm based on fish school behavior. Em *2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, páginas 2646–2651. IEEE.
- Belegundu e Chandrupatla(2019)** Ashok D Belegundu e Tirupathi R Chandrupatla. *Optimization concepts and applications in engineering*. Cambridge University Press.
- Benhamou(1994)** Reed Benhamou. The artificial limb in preindustrial france. *Technology and culture*, 35(4):835–845.
- Berge et al.(2004)** Jocelyn S Berge, Glenn K Klute, e Joseph M Czerniecki. Mechanical properties of shock-absorbing pylons used in transtibial prostheses. *J. Biomech. Eng.*, 126(1): 120–122.

- Bliquez(1983)** Lawrence J Bliquez. Classical prosthetics. *Archaeology*, 36(5):25–29.
- Bocolini(2000)** Fernando Bocolini. Reabilitação-amputados. *Amputações e Próteses*. 2ª edição, São Paulo: Robe.
- Bonabeau et al.(2010)** Eric Bonabeau, David Corne, e Riccardo Poli. Swarm intelligence: the state of the art special issue of natural computing. *Natural Computing*, 9(3):655–657.
- Box e Draper(1987)** George EP Box e Norman R Draper. *Empirical model-building and response surfaces*. John Wiley & Sons.
- Cantrell et al.(2017)** Jason T Cantrell, Sean Rohde, David Damiani, Rishi Gurnani, Luke Di-Sandro, Josh Anton, Andie Young, Alex Jerez, Douglas Steinbach, Calvin Kroese, et al. Experimental characterization of the mechanical properties of 3d-printed abs and polycarbonate parts. *Rapid Prototyping Journal*, 23(4):811–824.
- Chen et al.(2018)** Yonggang Chen, Lixiang Li, Jinghua Xiao, Yixian Yang, Jun Liang, e Tao Li. Particle swarm optimizer with crossover operation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 70:159–169.
- Clerc(1999)** Maurice Clerc. The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization. Em *Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, volume 3, páginas 1951–1957. IEEE.
- Clerc e Kennedy(2002)** Maurice Clerc e James Kennedy. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, 6(1):58–73.
- Coleman et al.(2001)** KL Coleman, DA Boone, DG Smith, e JM Czerniecki. Effect of trans-tibial prosthesis pylon flexibility on ground reaction forces during gait. *Prosthetics and orthotics international*, 25(3):195–201.
- Colombari(2004)** ROLAND ROBERT Colombari. Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção. *Universidade Federal de Itajubá. Itajubá*.
- Comparini et al.(2012)** Anaisa Comparini, Gabriela Passos, Helton Graziadei, Paulo H Ferreira-Silva, Francisco Louzada Neto, et al. Metodologia de superfície de resposta: uma introdução nos softwares r e statistica.
- Córdova(2019)** Cristian Jhonatan Córdova. Análisis multi-escala de un material compuesto a base de fibras naturales (stipa obtusa) para el diseño de una prótesis transtibial.
- Dawood et al.(2015)** Sarmad Daood Salman Dawood et al. Computational study of the effect of using open isogrids on the natural frequencies of a small satellite structure. *Acta Astronautica*, 106:120–138.

- De Castro(2006)** Leandro Nunes De Castro. *Fundamentals of natural computing: basic concepts, algorithms, and applications*. Chapman and Hall/CRC.
- Dean et al.(2015)** Angela Dean, Max Morris, John Stufken, e Derek Bingham. *Handbook of design and analysis of experiments*, volume 7. CRC Press.
- Dorigo e Di Caro(1999)** Marco Dorigo e Gianni Di Caro. Ant colony optimization: a new meta-heuristic. Em *Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, volume 2, páginas 1470–1477. IEEE.
- Dos Santos Viana et al.(2016)** Marilza Dos Santos Viana, Miriam Lys Gemaque, Erb Ferreira Lins, e Jorge Teófilo de Barros Lopes. Numerical simulation of a transtibial prosthesis using natural fibers.
- Eberhart e Kennedy(1995)** Russell Eberhart e James Kennedy. Particle swarm optimization. Em *Proceedings of the IEEE international conference on neural networks*, volume 4, páginas 1942–1948. Citeseer.
- Fan et al.(2009)** Hualin Fan, Daining Fang, Liming Chen, Zheng Dai, e Wei Yang. Manufacturing and testing of a cfrc sandwich cylinder with kagome cores. *Composites Science and Technology*, 69(15-16):2695–2700.
- Fey et al.(2011)** Nicholas P Fey, Glenn K Klute, e Richard R Neptune. The influence of energy storage and return foot stiffness on walking mechanics and muscle activity in below-knee amputees. *Clinical Biomechanics*, 26(10):1025–1032.
- Galdámez(2002)** Edwin Vladimir Cardoza Galdámez. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos. *São Carlos*.
- Gay(2014)** Daniel Gay. *Composite materials: design and applications*. CRC press.
- Gill et al.(2019)** Philip E Gill, Walter Murray, e Margaret H Wright. *Practical optimization*. SIAM.
- Goh et al.(2019)** Kheng Lim Goh, Sabu Thomas, Rangika Thilan De Silva, e MK Aswathi. *Interfaces in Particle and Fibre Reinforced Composites: Current Perspectives on Polymer, Ceramic, Metal and Extracellular Matrices*. Woodhead Publishing.
- Goldberg(1989)** David E Goldberg. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, addison wesley, reading, ma. *SUMMARY THE APPLICATIONS OF GA-GENETIC ALGORITHM FOR DEALING WITH SOME OPTIMAL CALCULATIONS IN ECONOMICS*.

- Gomes et al.(2017)** Guilherme Ferreira Gomes, Camila Aparecida Diniz, Sebastião Simões da Cunha, e Antonio Carlos Ancelotti. Design optimization of composite prosthetic tubes using ga-ann algorithm considering tsai-wu failure criteria. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 17(4):740–749.
- Gomes et al.(2019)** Guilherme Ferreira Gomes, Sebastiao Simões da Cunha, e Antonio Carlos Ancelotti. A sunflower optimization (sfo) algorithm applied to damage identification on laminated composite plates. *Engineering with Computers*, 35(2):619–626.
- Grujicic et al.(2005)** M Grujicic, KM Chittajallu, e Shawn Walsh. Non-isothermal preform infiltration during the vacuum-assisted resin transfer molding (vartm) process. *Applied surface science*, 245(1-4):51–64.
- Haaland e Oconnell(1993)** PD Haaland e MA Oconnell. Discussion: a systematic approach to planning for a designed industrial experiment. By COLEMAN, DE E MONTGOMERY, DC *Techometrics*, 35(1):17–20.
- Hansen et al.(2000)** AH Hansen, DS Childress, e EH Knox. Prosthetic foot roll-over shapes with implications for alignment of trans-tibial prostheses. *Prosthetics and Orthotics International*, 24(3):205–215.
- Hashemi e Meybodi(2011)** Ali B Hashemi e Mohammad Reza Meybodi. A note on the learning automata based algorithms for adaptive parameter selection in pso. *Applied Soft Computing*, 11(1):689–705.
- Jia et al.(2005)** Xiaohong Jia, Ming Zhang, Xiaobing Li, e Winson CC Lee. A quasi-dynamic nonlinear finite element model to investigate prosthetic interface stresses during walking for trans-tibial amputees. *Clinical Biomechanics*, 20(6):630–635.
- Jiao et al.(2008)** Bin Jiao, Zhigang Lian, e Xingsheng Gu. A dynamic inertia weight particle swarm optimization algorithm. *Chaos, Solitons & Fractals*, 37(3):698–705.
- Júnior(2003)** Luciano Pinho Nilo Júnior. *Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos*. Tese de Doutorado, UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ.
- Junqueira et al.(2019)** Diego Moraes Junqueira, Guilherme Ferreira Gomes, Márcio Eduardo Silveira, e Antonio Carlos Ancelotti. Design optimization and development of tubular isogrid composites tubes for lower limb prosthesis. *Applied Composite Materials*, 26(1):273–297.
- Junqueira et al.(2018)** DM Junqueira, ME Silveira, e AC Ancelotti. Analysis of spot weld distribution in a weldment numerical simulation and topology optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(9-12):4071–4079.

- Kanou et al.(2013)** H Kanou, SM Nabavi, e JE Jam. Numerical modeling of stresses and buckling loads of isogrid lattice composite structure cylinders. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 5(1):42–54.
- Kaw(2005)** Autar K Kaw. *Mechanics of composite materials*. CRC press.
- Kennedy e Eberhart(1995)** J Kennedy e R Eberhart. Particle swarm optimization (pso). Em *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia*, páginas 1942–1948.
- Kennedy et al.(2007)** James Kennedy, R Poli, e T Blackwell. Particle swarm optimization: an overview. *Swarm Intelligence*, 1(1):33–57.
- Kleijnen(1998)** Jack PC Kleijnen. Experimental design for sensitivity analysis, optimization, and validation of simulation models. *Handbook of simulation*, 1998:173–223.
- Kobayashi et al.(2014)** Toshiki Kobayashi, Michael S Orendurff, Adam K Arabian, Teri G Rosenbaum-Chou, e David A Boone. Effect of prosthetic alignment changes on socket reaction moment impulse during walking in transtibial amputees. *Journal of biomechanics*, 47(6):1315–1323.
- Lebrao(2007)** GUILHERME W Lebrao. Viabilidade de fabricação de tubo para prótese de membro inferior em compósito híbrido epoxi carbono-vidro.
- Linden(2008)** Ricardo Linden. *Algoritmos genéticos (2a edição)*. Brasport.
- Lopes(2010)** Patricia da Silva Lopes. Modelagem de problema inverso de detecção de danos por técnicas de identificação de parâmetros e de otimização.
- Madhavi(2009)** M Madhavi. Design and analysis of filament wound composite pressure vessel with integrated-end domes. *Defence science journal*, 59(1):73–81.
- Mandal e Ray(2015)** Bibekananda Mandal e Chaitali Ray. Bending of frp bridge deck under the combined effect of thermal and vehicle load. Em *Advances in Structural Engineering*, páginas 2493–2503. Springer.
- Martins(2015)** Alan Túlio Domingues Martins. Projeto e fabricação de tubos compósitos em fibras de carbono/epóxi para próteses transtibiais por moldagem com bladder.
- Mendonça(2005)** Paulo de Tarso Rocha Mendonça. *Materiais compostos e estruturas-sanduiche: projeto e análise*. Manole.
- Meyer et al.(1973)** RR Meyer, OP Harwood, MB Harmon, e JI Orlando. Isogrid design handbook.

- Mirjalili(2016)** Seyedali Mirjalili. Sca: a sine cosine algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-Based Systems*, 96:120–133.
- Mirjalili(2019)** Seyedali Mirjalili. Genetic algorithm. Em *Evolutionary Algorithms and Neural Networks*, páginas 43–55. Springer.
- Mitchell(1998)** Melanie Mitchell. *An introduction to genetic algorithms*. MIT press.
- Monroy et al.(2019)** Omar Dante García Monroy, Fernando Rocha Conejo, Miroslava Cano Lara, e Higinio Juárez Ríos. Análisis comparativo por elemento finito en prótesis trans-tibiales de acero inoxidable, resina epóxica y material compuesto con refuerzos orgánicos (comparative analysis by finite element in transtibial prosthetics of stainless steel, epoxy resin and composite material with organic reinforcements). *Pistas Educativas*, 41(134).
- Montgomery(2017)** Douglas C Montgomery. *Design and analysis of experiments*. John wiley & sons.
- Montgomery et al.(2000)** Douglas C Montgomery, George C Runger, e Verônica Calado. *Estatística Aplicada E Probabilidade Para Engenheiros*. Grupo Gen-LTC.
- Mosbah et al.(2016)** M Mosbah, RD Mohammedi, S Arif, e A Hellal. Optimal of shunt capacitor placement and size in algerian distribution network using particle swarm optimization. Em *2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, páginas 192–197. IEEE.
- Nash(1996)** Stephen G Nash. *Linear and nonlinear programming*. McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics.
- Neshat et al.(2014)** Mehdi Neshat, Ghodrat Sepidnam, Mehdi Sargolzaei, e Adel Najaran Toosi. Artificial fish swarm algorithm: a survey of the state-of-the-art, hybridization, combinatorial and indicative applications. *Artificial intelligence review*, 42(4):965–997.
- Niknam e Farsani(2010)** Taher Niknam e Ehsan Azad Farsani. A hybrid self-adaptive particle swarm optimization and modified shuffled frog leaping algorithm for distribution feeder reconfiguration. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(8):1340–1349.
- Nolan(2008)** Lee Nolan. Carbon fibre prostheses and running in amputees: a review. *Foot and ankle surgery*, 14(3):125–129.
- Norton(2007)** Kim Norton. A brief history of prosthetics. *InMotion*, 17(7):11–3.
- Olewi e Ahmed(2016)** Jawad Kadhim Olewi e Shaymaa Jumaah Ahmed. Tensile and buckling of prosthetic pylon made from hybrid composite materials. *Engineering and Technology Journal*, 34(14 Part (A) Engineering):2642–2653.

- Onwubolu e Babu(2013)** Godfrey C Onwubolu e BV Babu. *New optimization techniques in engineering*, volume 141. Springer.
- Panigrahi et al.(2011)** Bijaya Ketan Panigrahi, Yuhui Shi, e Meng-Hiot Lim. *Handbook of swarm intelligence: concepts, principles and applications*, volume 8. Springer Science & Business Media.
- Panosso et al.(2011)** Gustavo Bigolotti Panosso et al. Análise de critérios de falha baseados em fenômenos físicos para materiais compósitos laminados.
- Pantoja et al.(2007)** M Fernandez Pantoja, A Rubio Bretones, F Garcia Ruiz, SG Garcia, e R Gomez Martin. Particle-swarm optimization in antenna design: Optimization of log-periodic dipole arrays. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 49(4):34–47.
- Parpinelli e Lopes(2011)** Rafael S Parpinelli e Heitor S Lopes. New inspirations in swarm intelligence: a survey. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 3(1):1–16.
- Parsopoulos e Vrahatis(2010)** Konstantinos E Parsopoulos e Michael N Vrahatis. Particle swarm optimization and intelligence: advances and applications.
- Phillips(1985)** Van L Phillips. Composite prosthetic foot and leg, Outubro 22 1985. US Patent 4,547,913.
- Qiu et al.(2014)** Jiaheng Qiu, Ray-Bing Chen, Weichung Wang, e Weng Kee Wong. Using animal instincts to design efficient biomedical studies via particle swarm optimization. *Swarm and evolutionary computation*, 18:1–10.
- Ren e Wang(2011)** Zi-Hui Ren e Jian Wang. Accelerate convergence particle swarm optimization algorithm. *Control and Decision*, 26(2):201–206.
- Reynolds(1987)** Craig W Reynolds. *Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model*, volume 21. ACM.
- Rothschild et al.(1990)** Vernon R Rothschild, John R Fox, John W Michael, Russell J Rothschild, e George Playfair. Clinical experience with total thermoplastic lower limb prostheses. *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics*, 3(1):51.
- Sam et al.(2004)** Michel Sam, Dudley Childress, Andrew Hansen, Margrit Meier, Sophie Lambla, Edward Grahn, e Joshua Rolock. The 'shape&roll' prosthetic foot: I. design and development of appropriate technology for low-income countries. *Medicine, Conflict & Survival*, 20(4):294–306.
- Santos(2018)** João Victor Gomes Santos. Design de prótese transtibial de baixo custo constituída por biocompósitos: desenvolvimento e avaliação.

- Scholz et al.(2011)** M-S Scholz, JP Blanchfield, LD Bloom, BH Coburn, M Elkington, JD Fuller, ME Gilbert, SA Muflahi, MF Pernice, SI Rae, *et al.* The use of composite materials in modern orthopaedic medicine and prosthetic devices: A review. *Composites Science and Technology*, 71(16):1791–1803.
- Schwarze et al.(2013)** Michael Schwarze, Christof Hurschler, Frank Seehaus, Simone Oehler, e Bastian Welke. Loads on the prosthesis–socket interface of above-knee amputees during normal gait: Validation of a multi-body simulation. *Journal of biomechanics*, 46(6):1201–1206.
- Selvamuthu e Das(2018)** Dharmaraja Selvamuthu e Dipayan Das. *Introduction to Statistical Methods, Design of Experiments and Statistical Quality Control*. Springer.
- Senkov e Miracle(2001)** ON Senkov e DB Miracle. Effect of the atomic size distribution on glass forming ability of amorphous metallic alloys. *Materials Research Bulletin*, 36(12): 2183–2198.
- Shasmin et al.(2008)** Hanie Nadia Shasmin, NA Abu Osman, e L Abd Latif. Economical tube adapter material in below knee prosthesis. Em *4th Kuala Lumpur International Conference on Biomedical Engineering 2008*, páginas 407–409. Springer.
- Shi e Eberhart(1998)** Yuhui Shi e Russell Eberhart. A modified particle swarm optimizer. Em *1998 IEEE international conference on evolutionary computation proceedings. IEEE world congress on computational intelligence (Cat. No. 98TH8360)*, páginas 69–73. IEEE.
- Silveira e Fancello(2015)** Márcio Eduardo Silveira e Eduardo Alberto Fancello. O uso de otimização numérica no projeto de blanks soldados. *Ciência & Engenharia*, 24(1):09–19.
- Sinitski et al.(2012)** Emily H Sinitski, Andrew H Hansen, e Jason M Wilken. Biomechanics of the ankle–foot system during stair ambulation: Implications for design of advanced ankle–foot prostheses. *Journal of biomechanics*, 45(3):588–594.
- Sorrentino et al.(2016)** L Sorrentino, M Marchetti, C Bellini, A Delfini, e M Albano. Design and manufacturing of an isogrid structure in composite material: Numerical and experimental results. *Composite Structures*, 143:189–201.
- Spall(2005)** James C Spall. *Introduction to stochastic search and optimization: estimation, simulation, and control*, volume 65. John Wiley & Sons.
- Tavangarian et al.(2019)** Fariborz Tavangarian, Camila Proano, e Caleb Zolko. Performance of low-cost 3d printed pylon in lower limb prosthetic device. Em *TMS 2019 148th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*, páginas 1207–1215. Springer.

- Teodora et al.(2010)** Fábio Roberto Teodora, Rafael Stubs Parpinellia, e Heitor Silvério Lopes. Otimização por colônia de bactérias aplicada a problemas de engenharia.
- Totaro(2012)** G Totaro. Local buckling modelling of isogrid and anisogrid lattice cylindrical shells with triangular cells. *Composite structures*, 94(2):446–452.
- Tsai e Wu(1971)** Stephen W Tsai e Edward M Wu. A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of composite materials*, 5(1):58–80.
- Valenti(1990)** Thomas J Valenti. Experience with endoflex: a monolithic thermoplastic prosthesis for below-knee amputees. *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics*, 3(1):43–50.
- Vasiliev e Razin(2006)** VV Vasiliev e AF Razin. Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications. *Composite structures*, 76(1-2):182–189.
- Vasiliev et al.(2001)** VV Vasiliev, VA Barynin, e AF Rasin. Anisogrid lattice structures—survey of development and application. *Composite structures*, 54(2-3):361–370.
- Vilagra et al.(2011)** José Mohamud Vilagra, Camila Mabel Sganzerla, e Leda Paes Walcker. Próteses transtibiais: itens de conforto e segurança. *Revista Thêma et Scientia*, 1(2):107–112.
- Wang et al.(2012)** Ying Wang, Jianzhong Zhou, Chao Zhou, Yongqiang Wang, Hui Qin, e Youlin Lu. An improved self-adaptive pso technique for short-term hydrothermal scheduling. *Expert Systems with Applications*, 39(3):2288–2295.
- Xu et al.(2019)** Zhaoyue Xu, Lin Du, Haopeng Wang, e Zichen Deng. Particle swarm optimization-based algorithm of a symplectic method for robotic dynamics and control. *Applied Mathematics and Mechanics*, 40(1):111–126.
- Yang(2013)** Xin-She Yang. Bat algorithm: literature review and applications. *arXiv preprint arXiv:1308.3900*.
- Yasuda e Iwasaki(2004)** Keiichiro Yasuda e Nobuhiro Iwasaki. Adaptive particle swarm optimization using velocity information of swarm. Em *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No. 04CH37583)*, volume 4, páginas 3475–3481. IEEE.