**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Implementação de rotinas computacionais
para o cálculo de trajetórias geodésicas no
processo de filament winding

EDGAR DOS SANTOS GOMES

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jonas de Carvalho

São Carlos
2009

EDGAR DOS SANTOS GOMES

Implementação de rotinas computacionais
para o cálculo de trajetórias geodésicas no
processo de filament winding

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Assoc. Jonas de Carvalho

São Carlos
2009

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP**

G633i Gomes, Edgar dos Santos
 Implementação de rotinas computacionais para o cálculo
 de trajetórias geodésicas no processo de Filament Winding
 / Edgar dos Santos Gomes; orientador Jonas de Carvalho.
 - - São Carlos, 2009.

 Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto
 Mecânico - - Escola de Engenharia de São Carlos da
 Universidade de São Paulo, 2009.

 1. Enrolamento filamentar. 2. Compósitos.
 3. Trjetórias geodésicas. 4. Tubos. 5. Vasos de Pressão.
 I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Licenciado EDGAR DOS SANTOS GOMES

Dissertação defendida e julgada em 18/05/2009 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Associado JONAS DE CARVALHO (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO!

Profª. Drª. ZILDA DE CASTRO SILVEIRA
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO!

Prof. Dr. MARCÚS VINÍCIUS DE ARAUJO LIMA
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Prof. Associado JONAS DE CARVALHO
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

Prof. Associado GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

*À minha Família e a Elediana que
muito me apoiaram*

AGRADECIMENTOS

A Deus que sempre me guiou em todos os momentos da minha vida e com certeza em mais essa conquista. Que ELE continue sempre me mostrando os caminhos que devo seguir;

Ao meu querido Pai Abelardo e a minha querida Mãe Analice, cuja falta gera uma enorme saudade;

Ao Professor Dr. Jonas de Carvalho, pela orientação segura e competente, pelo incentivo, apoio, entusiasmo, e sobretudo, dedicação e amizade que dispensou na realização desse trabalho;

À amada Elediana, que sempre me apoiou e deu força nas horas difíceis de desânimo e incertezas;

Ao amigo Rafael Murarolli que me auxiliou com seus conhecimentos em informática;

Aos meus colegas, Daniela Gavassa, Fernando Justulin e José A. Pinheiro, pela amizade e apoio no decorrer do trabalho.

À Ana Paula e Iuri pelo apoio burocrático concedido;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela bolsa de estudo concedida;

Ao serviço da Biblioteca da EESC-USP e à Biblioteca do ICMC-USP, pelos recursos oferecidos;

A todos, que de uma forma ou de outra contribuíram para que esse trabalho se realizasse.

RESUMO

GOMES, E. S. **Implementação de rotinas computacionais para o cálculo de trajetórias geodésicas no processo de filament winding**. 2009. 121p. Dissertação (MESTRADO) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

Materiais Compósitos são conhecidos pela alta resistência mecânica e baixo peso, desempenho superior, resistência à corrosão e baixa densidade. A produção de um material composto possui vários processos com particularidades diferentes. O enrolamento filamentar (*Filament Winding*) é um processo no qual fibras de reforço contínuas são posicionadas de maneira precisa e de acordo com um padrão predeterminado para compor a forma do componente desejado. As fibras, submetidas à tração, são “enroladas” continuamente ao redor de um mandril que tem a forma do produto final, em geral utilizando equipamentos automáticos. No final do processo, após a cura da resina, o mandril é geralmente removido. Desta forma, é de fundamental importância que o projetista disponha de recursos computacionais adequados para o cálculo das trajetórias e sequenciamento de posicionamento das fibras. Esse trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de procedimentos matemáticos para cálculo de trajetórias geodésicas no processo de “Filament Winding” e implementá-los em um ambiente computacional em linguagem de alto nível Java, considerando-se os casos de revestimento circunferencial, helicoidal e polar. São desenvolvidos dois estudos de caso: tubos cônicos e vasos de pressão, e os resultados apresentados e discutidos, validando os procedimentos e ambiente implementado.

Palavras-chave: Enrolamento filamentar, Compósitos, Trajetórias geodésicas, Tubos, Vasos de pressão.

ABSTRACT

GOMES, E. S. **Computational routines for the calculation of geodesic paths in filament winding process**. 2009. 121p. Master Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

Composite materials are well known by the high strength and low weight, superior performance, resistance to the corrosion and low density. The production of a composite material part involves some processes with different requirements. The filament winding process is an automated process in which continuous reinforcement fibers are lay down in prescribed paths on the surface of a mandrel, which is generally removed after the cure of the resin. In such a way, it is fundamental that the designer uses computational resources for the calculation of the paths and sequence of the fibers. In this work is developed the mathematical procedures for calculation of geodesic trajectories in the Filament Winding process and implements them in a computational environment in high level language Java, considering the circumferential, helical and polar strategies. Two case studies are developed successfully: conical pipes and pressure vessels, and the results presented and discussed, validating the procedures and implemented environment.

Key-words: Filament winding, Composites, Geodesic paths, Tubes, Pressure vessels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formação de um compósito usando Fibra e Resina. (Adaptado de Mazumdar, 2002)	10
Figura 2 – Organograma de classificação dos materiais compósitos. (adaptado de Matthews & Rawlings (1999))	11
Figura 3 - O modelo de deformação na matriz circundante a uma fibra que está sujeita a uma tensão de tração aplicada.	13
Figura 4 - Perfis tensão-posição quando o comprimento da fibra l (a) é igual ao comprimento crítico l_c ; (b) é maior do que o comprimento crítico; e (c) é menor do que o comprimento crítico para um compósito reforçado por fibra que é submetido a uma tensão de tração igual à resistência à tração da fibra σ_f . (Adaptado de Callister, 2007)	14
Figura 5 – Representação Esquemática de (a) Fibras Contínuas e Alinhadas, (b) Fibras Descontínuas e Alinhadas e de (c) Fibras Descontínuas e randomicamente orientadas.	15
Figura 6a – Tubos submetidos ao ensaio endurance (Resistência ao Fogo/Revista do Plástico Reforçado pág. 68, nº 33).....	22
Figura 6b - Perfis estruturais.....	22
Figura 7 - Pás de turbinas eólicas	23
Figura 8 – A primeira bicicleta dobrável toda de plástico reforçado. (Composites Technology 08/2007).....	24
Figura 9 - Fotografia mostrando dois projetos de substituição total do quadril (CALLISTER JR, 2002, in Filho 2006).	25
Figura 10 – Fusca de Nelson Piquet Recebendo fibra de carbono. (Plástico Reforçado mar/abr. 2005).....	26
Figura 11 – O casco todo de Compósitos do Stiletto, construído pela Marinha dos Estados Unidos, toca a água pela primeira vez. (Composites, 09/2007).	27
Figura 12 – “Space Ship One” (www.Scaled.com)	28
Figura 13 – “White Knight”	29
Figura 14 – “Global Flyer” (www.netribution.co.uk)	29
Figura 15 - A380 da Airbus (fonte: http://imagens.kboing.com.br).....	29
Figura 16 -787 da Boeing (Fonte: http://www.warandpeace.ru).	30
Figura 17 – Autoclave de grandes dimensões	31
Figura 18 – Desenho esquemático do processo de pultrusão. (Callister, 2007)	32
Figura 19 – Máquina de entrelaçamento (http://concom.encs.concordia.ca)	33
Figura 20 – Esquema do processo de.....	34
moldagem por transferência de resina. (Filho, et al, 2007)	34
Figura 21 – Desenho esquemático do processo de Enrolamento Filamentar (Filament Winding). (Fonte: Carvalho, 1996).....	35
Figura 22 – Representações esquemáticas das técnicas de enrolamento de filamentos circunferencial, helicoidal e polar (Fonte: Callister, 2007).	35
Figura 23 – Trajetória da fibra em um cilindro com retorno no fim (Scholliers, 1992).	44
Figura 24 – Vaso de Pressão (adaptado de Scholliers, 1992).....	48
Figura 25 – Tipos de Revestimentos (Carvalho, 1996)	50

Figura 26 – Escolha dos Tipos de Revestimento para Cálculo.....	50
Figura 27 – Tipos de filamentos (adaptado de Silva, 2005).....	51
Figura 28 – Planos de referencia e indicação do ângulo θ	52
Figura 29 – Dados de Entrada e Informações Complementares	53
Figura 30 – Dados de entrada para o cálculo do revestimento circunferencial.....	53
Figura 31 – Parâmetros para cálculo das coordenadas X, Y e Z.....	54
Figura 32 – Decremento do ângulo θ (para 1°)	54
Figura 33 – Cálculo dos Quadrantes	55
Figura 34 – Indicação do ângulo Omega e Passo.....	56
Figura 35 – Ângulo Omega e Passo	56
Figura 36a – Desenho Esquemático da Posição do Olho.....	57
Figura 36b – Cálculos da Posição do Olho	57
Figura 37 – Desenho Esquemático das Coordenadas X', Y' e Z'	58
Figura 38 – Desenho esquemático do Ângulo ψ e Cilindro Virtual	58
Figura 39 – Cálculo da Posição do Olho com $\theta = 90^\circ$	59
Figura 40 – Desenho esquemático da Distância Olho-Cilindro	59
Figura 41 – Desenho esquemático da distância OP	60
Figura 42 – Distância X'P do Revestimento Circunferencial	60
Figura 43 – Cálculo da Posição do Olho com $\theta > 90^\circ$	61
Figura 44 – Desenho esquemático do ângulo α	62
Figura 45 – Desenho esquemático das medidas Ymin, Ymax e $\Delta Z'$	62
Figura 46 – Desenho esquemático do ângulo ψ e distância OP	63
Figura 47 – Cálculo da Posição do Olho com $\theta < 90^\circ$	64
Figura 48 – Desenho esquemático do ângulo θ	64
Figura 49 – Desenho esquemático das medidas Ymax e Ymin, no caso $\theta < 90^\circ$	65
Figura 50 – Desenho esquemático da medida $\Delta Z'$	65
Figura 51 – Desenho esquemático do ângulo ψ e das distância OP e X'P	66
Figura 52a – Parâmetros para o cálculo dos quadrantes da posição do Olho	66
Figura 52b – Cálculos dos Quadrantes do Olho.....	67
Figura 53 – Desenho esquemático da obtenção do ângulo θ	69
Figura 54 – Dados de entrada para cálculo do revestimento helicoidal.....	70
Figura 55 – Limite do Ângulo ω para o Revestimento Helicoidal	70
Figura 56 – Limite do Ângulo ω para o Revestimento Polar.....	72
Figura 57 – Estratégia de Revestimento (Carvalho, 1996)	73
Figura 58 – Estratégia de Revestimento Sugerida	74
Figura 59 - Dados de Entrada para cálculo de Tubo Cônico	76
Figura 60 – Trajetória Geodésica sobre a superfície de um Cone	77
Figura 61 - Trajetória Geodésica sobre a superfície de um Cone e a Posição do Olho relativo a mesma.....	77
Figura 62 - Dados de Entrada Inicial para Vasos de Pressão.....	79
Figura 63 – Vaso de Pressão	79
Figura 64 – Esquema para Cálculo dos Raios de um Vaso de Pressão.....	80
Figura 65 - Trajetória sobre a superfície de um Vaso de Pressão	81
Figura 66 – Esquema para os Cálculos dos Raios da Posição do Olho Referentes ao de um Vaso de Pressão.....	81
Figura 67 - Trajetória sobre uma superfície de um Vaso de Pressão e a Posição do Olho relativo a mesma.....	82

Figura 68 - Fluxograma da Implementação de Rotinas Computacionais para Cálculo de Trajetórias Geodésicas no Processo de FILAMENT WINDING.....	83
Figura 69 – Tela inicial do Programa <i>CALTRAJ</i>	84
Figura 70 – Seleção dos tipos de revestimento no programa <i>CALTRAJ</i>	84
Figura 71 – Indicação do tipo de revestimento que está sendo gerado.....	84
Figura 72 – Interface gráfica para o revestimento circunferencial	86
Figura 73 – Botão pesquisar tipo de filamentos	86
Figura 74 – Tabela de escolha do tipo de filamento	86
Figura 75 – Tabela dinâmica de apresentação dos cálculos das trajetórias	87
Figura 76 – Informações Complementares sobre a trajetória e a posição do Olho.	87
Figura 77 – Simulação de Revestimento Circunferencial	88
Figura 78 – Interface Gráfica para o Revestimento Helicoidal	89
Figura 79 – Mensagem do Limite do Omega para o Revestimento Helicoidal.....	89
Figura 80 – Simulação de Revestimento Helicoidal.....	90
Figura 81 – Revestimento Polar.....	91
Figura 82 – Limites de Omega para o Revestimento Polar	91
Figura 83 – Simulação de Revestimento Polar	92
Figura 84 – Tela do Cabri-Géomètre II.	102
Figura 85 – Barra de Ferramentas do Windows.	103
Figura 86 – Barra de Ferramentas do Cabri-Géomètre II.....	103
Figura 87 – Gráfico Gerado pelo Microsoft Excel	109
Figura 88 – Ícone do Microsoft Excel 2003	110
Figura 89 – Tela de Trabalho do Solid Edge®	115
Figura 90 – Ambiente Java (Deitel, 2003).....	119
Figura 91 – Tela Inicial do Netbeans 6.0.1	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ícones e suas Ferramentas 1.	104
Tabela 2 - Ícones e suas Ferramentas 2.	105
Tabela 3 - Ícones e suas Ferramentas 3.	105
Tabela 4 – Operadores Aritméticos.	107
Tabela 5 – Operadores Relacionais.	107
Tabela 6 – Tabela de Contas Mensais.	109
Tabela 7 – Versão do Microsoft Excel para o Ambiente Windows.	111
Tabela 8 – Versão do Microsoft Excel para o Ambiente Macintosh.	112

LISTA DE SÍMBOLOS

L	– comprimento da fibra (mm)
L_c	- comprimento crítico da fibra.
σ^f	- resistência à tração na ruptura da fibra (Kgf/mm^2).
τ_c	- menor resistência ao cisalhamento da matriz ou da interface.
d	- diâmetro da fibra (mm)
R	- o raio do cilindro (mm)
ω	- ângulo do enrolamento.
C_c	– constante da Equação de Clairaut.
D	- Diâmetro do Cilindro (mm)
NI	- Número de iterações através de um ciclo de 360° .
dt	- o decremento de θ . (mm)
I_{rc}	- Incremento do revestimento circular (mm)
ef	- Espessura do filamento (mm)
NV	- Número da Volta em que o ponto está.
θ	- Ângulo que inicia o revestimento.
θ_e	– Ângulo com valores assumidos no decorrer do cálculo.
Q	- Quadrante do cilindro
X	– Coordenada de um ponto (mm)
Y	– Coordenada de um ponto (mm)
Z	– Coordenada de um ponto (mm)
Δy	- Variação da coordenada (Y) (mm)
Δx	- Variação da coordenada (X) (mm)

P	- Passo da trajetória.(mm)
x_i	– Ponto inicial para coordenada (X) (mm).
x_f	– Ponto final para coordenada (X) (mm).
Ψ	- Ângulo Psi.
R_v	– Raio do cilindro virtual (mm)
OP	- Distância OP (mm)
$X'P$	- Ponto inicial do Olho (mm)
Y_{max}	- Variável utilizada para calcular $\Delta Z'$ (mm)
Y_{min}	- Variável utilizada para calcular $\Delta Z'$ (mm)
$\Delta X'$	– Ponto da coordenada (X) para o olho (mm)
$\Delta Y'$	– Ponto da coordenada (Y) para o olho (mm)
$\Delta Z'$	– Ponto da coordenada (Z) para o olho (mm)
C_r	– Comprimento do revestimento (mm)
C_{tc}	– Comprimento do tubo cônico (mm)
k	– coeficiente angular
C_v	– comprimento do vaso de pressão (mm)
C_{fv}	– comprimento final do vaso de pressão (mm)

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

a.C.	– Antes de Cristo
API	- “Application Program Interface”
BCPL	– Linguagem de Programação que originou a Linguagem C
CAD	– “Computer Aided Design”
CALTRAJ	– Protótipo do Sistema de Cálculo de Trajetória Geodésica
CAM	– “Computer Aided Manufacturing”
CAWAR Robots	– “Computer Aided Filament Winding of Asymmetric Parts using Robots”
CN	– Controle numérico
CO₂	– Gás Carbônico
CPR	– Compósito Polimérico Reforçado
FW	– “Filament Winding”
GNV	– Gás Natural Veicular.
GUI’s	– “Grafic User Interface”
H₂	– Hidrogênio.
IDE’s	– “Integrated Development Environments”
IMAG	– Instituto de Informática e Matemática Aplicada de Genoble
ISO	– “International Organization for Standardization”
JVM	– Java Virtual Machine
MCRF	– Material compósito reforçado por fibra.
NO_x	- óxidos de Nitrogênio
POO	– Programação Orientada a Objetos
RTM	– “Resin Transfer Molding”

- UNIX** – Sistema Operacional.
- VBA** – “Visual Basic for Applications”
- .XLS** – Extensão do Arquivo do Software Microsoft Excel.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	v
AGRADECIMENTO.....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xv
LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS	xvii
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Relevância da Dissertação	2
1.3 Conteúdo do Trabalho.....	3
CAPÍTULO 2	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Materiais Convencionais em Engenharia	5
2.1.2 - Metais	5
2.1.2 - Polímeros.....	6
2.1.3 - Cerâmica.....	6
2.1.4 - Compósitos	7
2.2 – Materiais Compósitos	7
2.2.1 - Importância dos Materiais Compósitos	7
2.2.2 - Definição e Classificação dos Materiais Compósitos	8
2.2.3 - Fibra, Matriz e Interface Fibra/Matriz.....	11
2.2.3.1 - Matriz	11
2.2.3.2 - Fibra.....	12
2.2.3.3 - Interface Fibra/Matriz.....	15
2.2.4 - Desenvolvimento Histórico	16
2.2.5 - Vantagens e Limitações dos Materiais Compósitos.....	18
2.2.6 - Aplicações	21
2.2.6.1 - Infra-Estrutura	21
2.2.6.2 - Elétrico e Eletrônico	23
2.2.6.3 - Equipamentos Esportivos	24
2.2.6.4 - Médico.....	24

2.2.6.5 - Automotivo	25
2.2.6.6 - Marítimo	26
2.2.6.7 - Aeronáutico e Aeroespacial	27
2.3 - Processos de Fabricação dos compósitos.....	30
2.3.1 - Descrição dos processos	30
2.3.1.1 - Autoclave	31
2.3.1.2 - Pultrusão (<i>Pultrusion</i>).....	31
2.3.1.4 - Moldagem por transferência de resina (<i>Resin Transfer Molding</i>).....	33
2.3.1.5 - Enrolamento Filamentar (<i>Filament Winding</i>).....	34
CAPÍTULO 3.....	37
3 – EMBASAMENTO TEÓRICO DE TRAJETÓRIAS ESPECIAIS.....	37
3.1 - Trajetória da fibra em uma superfície de revolução	37
3.1.1 - Trajetória em uma superfície de revolução.....	37
3.1.2 - Equação de Clairaut	39
3.1.3 - Cálculo de Geodésicas em uma superfície de revolução	40
3.1.3.1 - Geodésica em um cilindro	41
3.1.3.2 - Geodésica em um cone	41
3.1.4 - Trajetória com tendência de diminuição constante em um cilindro	42
3.1.4.1 - Trajetória com uma tendência de diminuição constante.....	42
3.1.4.2 - Exemplo: Enrolando um cilindro com retorno da trajetória da fibra no fim	43
3.2 - Geodésica em uma superfície desenvolvida	45
3.3 - Camada de uma peça revestida por filamentos.....	46
3.3.1 - Camada de uma peça tubular	46
3.3.2 - Camada de uma superfície de revolução	47
CAPÍTULO 4.....	49
4. METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO DAS TRAJETÓRIAS	49
4.1 Recursos computacionais	49
4.2 Metodologia de desenvolvimento	49
4.3 Revestimento Circunferencial	51
4.3.1 Cálculo da Posição do Olho com θ igual a 90°	59
4.3.2 Cálculo da Posição do Olho com θ maior que 90°	61
4.3.2 Cálculo da Posição do Olho com θ menor que 90°	63
4.4 Revestimento Helicoidal	68
4.5 Revestimento Polar	71
4.6 Estratégia de Revestimento	72
CAPÍTULO 5.....	75
5. ESTUDOS DE CASO E IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA CALTRAJ ..	75
5.1 Estudos de caso	75
5.1.1 Cálculo de Trajetória em Tubos Cônicos.....	75
5.1.2 Cálculo de Trajetória em Vasos de Pressão	78
5.2 Implementação do Programa <i>CALTRAJ</i>	82
5.2.1 Interface Gráfica do Revestimento Circunferencial.....	85
5.2.2 Interface Gráfica do Revestimento Helicoidal	89

5.2.3 Interface Gráfica do Revestimento Polar	90
CAPÍTULO 6	93
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
6.1 CONCLUSÕES	93
6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXO	100
RECURSOS COMPUTACIONAIS E AS POTENCIALIDADES	100
DIDÁTICO-METODOLÓGICAS DOS SOFTWARES:	100
A.1 - Cabri-Géomètre II.....	100
A.1.1 - Características do Cabri-Géomètre II.....	101
A.1.2 - Conhecendo a tela do Cabri-Géomètre II.	102
A.2 - Microsoft Excel	106
A.2.1 - Planilha Eletrônica e suas principais características.....	106
A.2.2 – Cálculo Automático	107
A.2.3 – Armazenamento de Dados.	108
A.2.4 - Geração de Gráficos	108
A.2.5 – O Divisor de Águas Chamado Microsoft Excel	109
A.3 – CAD	112
A.4 - Java	116
A.4.1 - C++: A história começa.....	117
A.4.2 - Java: A história	117
A.4.3 - Principais características da linguagem Java.....	118

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O tema a respeito dos materiais compósitos é, ao mesmo tempo, antigo e recente. É antigo no sentido de que os materiais biológicos naturais, que incluem o corpo humano, plantas e animais, são materiais compósitos. É recente no sentido de que apenas no início da década de 60 os engenheiros e cientistas têm pesquisado novas tecnologias no vasto potencial de fabricação desses materiais (Filho, 2006).

A importância dos compósitos mostra-se diante da sua ampla aplicação nos variados segmentos de mercado e por possuir vasta gama de materiais onde os engenheiros podem buscar a melhor combinação para atingir o objetivo procurado no projeto, quanto à propriedade mecânica, química, elétrica, etc. A tecnologia e uso de materiais compósitos apresenta um amplo potencial nas áreas da engenharia apoiada, principalmente em novos e melhores processos de fabricação. O processo conhecido como “*Filament Winding*” ou enrolamento filamentar consiste no processo de fabricação de materiais compósitos reforçados por fibras impregnadas com resinas, depositadas ao longo de uma trajetória definida sobre uma superfície (mandril), sendo especialmente indicado para a produção de tubos e vasos de pressão.

Representação esquemática do Processo de *Filament Winding*

(Carvalho, 2006)

Segundo Carvalho (1996) as melhores trajetórias são as descritas para curvas geodésicas. Curvas Geodésicas são curvas que conectam dois pontos em uma superfície que correspondem à menor distância entre eles sobre esta superfície. Os materiais Compósitos são conhecidos pela alta resistência mecânica e baixo peso. O desempenho superior, a resistência à corrosão e a baixa densidade são algumas características marcantes dos compósitos já testados e aprovados pela engenharia.

1.2 Relevância da Dissertação

O objetivo deste trabalho é desenvolver e implementar um sistema computacional, para cálculo de trajetórias de deposição das fibras sobre o mandril durante o processo de enrolamento filamenar. O sistema deverá constituir um ambiente, no qual possam ser implementados, no futuro, novos algoritmos de cálculos para atender requisitos de complexidade geométrica e de otimização estrutural, como por exemplo a possibilidades de mudança do ângulo de enrolamento entre uma camada e outra, ou ao longo de uma única camada através de trajetórias não geodésicas. A princípio serão implementadas rotinas para o cálculo das trajetórias circunferencial, helicoidal e polar sobre a superfície de uma peça cilíndrica e implementados, em seguida os cálculos para superfície de cones e vasos de pressão cilíndricos com domos.

No Brasil não há empresas específicas desenvolvendo este tipo de programas ou ambiente voltados para o processo de enrolamento filamenar. Alguns fatores que levam a não existência deste ramo são a falta de estudos dessa tecnologia no país e o fato de grande parte dos equipamentos serem importados, trazendo consigo os pacotes computacionais de cálculo, que geralmente não permitem ao usuário desenvolver suas próprias rotinas de cálculos.

Scholliers (1992.) desenvolveu o sistema CAWAR, utilizando para isso linguagem C em ambiente operacional VMS (Virtual Machine System), aplicado a um sistema para enrolamento filamenar onde era utilizado um sistema robotizado para deposição das fibras. Após seu trabalho, Carvalho (1996) implementou rotinas baseadas em trajetórias não geodésicas considerando a otimização estrutural do componente, integrando cálculos baseados em Elementos Finitos e restrições de processo, tais como erros da trajetória e a força de atrito entre as fibras. O software permaneceu na

linguagem C e no mesmo sistema operacional. O software desenvolvido nesse trabalho, chamado *CALTRAJ*, será implementado em linguagem de alto nível JAVA, de modo estruturado e atendendo a requisitos de desempenho e portabilidade necessários ao desenvolvimento tecnológico atual.

1.3 Conteúdo do Trabalho

Este trabalho foi organizado de forma a tratar uma seqüência de temas necessários ao seu desenvolvimento, abordando questões históricas do uso e aplicações de materiais compósitos, novas tecnologias de fabricação, recursos computacionais utilizados para o desenvolvimento do tema, desenvolvimento e implementação das rotinas de cálculos, testes de validação, avançando até a conclusão do tema proposto. Dessa forma, têm-se os seguintes capítulos:

1. **Introdução** – são apresentadas as Considerações Iniciais, Relevância da Dissertação e Conteúdo do Trabalho;
2. **Revisão Bibliográfica** – é apresentado um levantamento bibliográfico constituído de cinco tópicos: Materiais de Engenharia Convencionais, Materiais Compósitos como Materiais de Engenharia, Processo de Fabricação em Compósitos, Recursos Computacionais e as Potencialidades Didático-Metodológicas dos Softwares para cálculos das trajetórias das fibras;
3. **Embasamento teórico de trajetórias especiais** – é apresentado o embasamento teórico utilizado para iniciar a implementação das rotinas computacionais para o cálculo das trajetórias geodésica e o esclarecimento da utilização deste tipo de trajetória.
4. **Metodologia desenvolvida para procedimentos de cálculo das trajetórias** – nesse capítulo serão descritos a metodologia utilizada e os procedimentos

matemáticos de cálculo das trajetórias, que servirão de base à implementação do sistema *CALTRAJ*;

5. **Estudos de caso e implementação do programa CALTRAJ** – é apresentada a primeira versão do programa *CALTRAJ*, suas limitações e propostas para a sua expansão. Com o auxílio do programa Solid Edge serão apresentadas interfaces gráficas para visualizar os resultados obtidos nos cálculos. É desenvolvido estudo de caso aplicado a tubos cônicos e vasos de pressão;
6. **Conclusão e Propostas de Trabalhos Futuros** – são apresentadas as principais conclusões do trabalho, limitações e sugestões para trabalhos futuros;
7. **Bibliografia referenciada;**
8. **Anexo** - nesse capítulo são descritos os softwares utilizado na elaboração do trabalho,

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Convencionais em Engenharia

Há mais de 50.000 materiais disponíveis para projeto e manufatura nas mais variadas aplicações. Esses diferentes materiais derivam de matérias comuns (como por exemplo: cobre, ferro, bronze) que estão disponíveis a centenas de anos e, mais recentemente, materiais avançados (como por exemplo, compósitos, cerâmicas, e aços de alto desempenho). Devido à ampla opção de materiais, engenheiros e projetistas atuais encontram um grande desafio para a seleção certa de material e processo industrial para aplicações específicas. É difícil estudar todos esses materiais individualmente, então, uma classificação mais ampla é necessária para simplificação e caracterização. Estes materiais, dependendo das características principais (como por exemplo, dureza, resistência, densidade, e temperatura de fusão), podem ser divididos em quatro categorias principais: metais, polímeros, cerâmicas, e compósitos (Mazumdar, 2002).

2.1.2 - Metais

Os metais foram os materiais dominantes no passado para aplicações estruturais e formam uma categoria muito importante dentre os materiais, muito utilizado em estruturas civis e mecânicas, ainda se usa concreto armado em diversas estruturas. Os metais comuns são: ferro, alumínio, cobre, magnésio, zinco, chumbo, níquel, e titânio. Em aplicações estruturais, as ligas são freqüentemente utilizadas em maior escala que metais puros. Ligas são formadas misturando-se diferentes materiais, inclusive elementos não-metálicos, em alguns casos. Ligas oferecem melhores propriedades que metais puros. Por exemplo, ferro é frágil e de fácil corrosão, mas a adição de menos de 1% de carbono pode torná-lo dúctil, enquanto que a adição de cromo o torna resistente à corrosão. Em geral, metais apresentam maior peso quando comparados a polímeros

compósitos. Alguns metais como alumínio, magnésio, e berílio oferecem densidades um pouco menores que os aproximam dos polímeros. O aço é de 4 a 7 vezes mais denso que materiais poliméricos enquanto a densidade do alumínio é 1,2 a 2 vezes maior que os polímeros. Metais geralmente requerem várias operações de fabricação para obter o produto final. Metais geralmente apresentam alta dureza, resistência, estabilidade e condutividade térmica e elétrica. Devido à resistência à temperaturas mais elevadas do que os polímeros, podem ser usados em aplicações que exigem temperatura de serviço mais elevada.

2.1.2 - Polímeros

Os Polímeros se tornaram opções viáveis de materiais de engenharia, nos últimos anos e em algumas aplicações a produção de polímeros têm excedido a produção de aço, devido ao seu baixo peso, fácil processamento, e resistência à corrosão. Materiais poliméricos são extensamente usados em componentes automotivos, estruturas aeronáuticas e bens de consumo. Eles podem ser comprados na forma de lâminas, bastão, barras, pós, bolinhas (pellet), e grânulos. Dependendo do processo de manufatura pode-se desenvolver superfície com melhor acabamento, com menos etapa de fabricação, condição que pode reduzir o custo final do produto. Esta característica caracteriza uma produção de baixo custo das peças.

Polímeros termoplásticos não são usados para aplicações de alta temperatura por causa da baixa estabilidade térmica. Em geral, a temperatura operacional para este tipo de polímeros é menor do que 100°C. Alguns polímeros possuem temperatura de serviço na gama de 100°C a 200°C sem uma diminuição significativa no desempenho.

2.1.3 - Cerâmica

Cerâmicas têm forte ligação covalente fornecendo boa estabilidade térmica e alta dureza, sendo frágil, porém fornecendo elevada rigidez. A principal característica que distingue a cerâmica, quando comparado, com os metais é que as cerâmicas não podem ser deformadas significativamente por compressão, mas falham na fragilidade sob tração ou cisalhamento e apresentam alto ponto de fusão, aproximadamente 2100°C. Como

características físicas, as cerâmicas são inertes, possuem alta resistência à eletricidade e temperaturas sendo aplicadas em bioengenharia e componentes de automóveis. Cerâmicas são processadas, a partir do processamento do pó e sua sinterização requer equipamentos de alta temperatura para se obter estruturas confiáveis. A usinagem à verde de cerâmicas requer ferramentas de corte caras, tais como ferramentas de carboneto, diamante e equipamentos adaptados para acabamento das mesmas.

2.1.4 - Compósitos

Os Materiais Compósitos foram utilizados para resolver problemas tecnológicos por um longo tempo. Na década de 60, os compósitos começaram a chamar a atenção das indústrias, com a introdução de polímeros em sua estrutura. Desde então, os materiais compósitos se tornaram materiais de engenharia, incluindo aplicações desde de bens esportivos, bens de consumo, componentes de automóveis, até componentes aeronáutico, aeroespacial e aplicações em indústrias marítimas e petroleiras. O crescimento do uso dos materiais compósitos também ocorreu devido ao desempenho satisfatório de produto e do aumento da competição no mercado global para componentes de baixo peso. Dentre os materiais convencionais, os materiais compósitos têm o potencial para substituir em muitas aplicações o aço e o alumínio extensamente usados. Componentes de aço substituídos por componentes de compósitos podem economizar de 60% a 80% o peso dos componentes, e de 20% a 50% do peso substituindo peças de alumínio (Mazumdar, 2002)

2.2 – Materiais Compósitos

2.2.1 - Importância dos Materiais Compósitos

Os materiais compósitos existem no meio natural há milhares de anos, como por exemplo: madeira, ossos, etc. mesmo na sociedade representado por casas de barro e sapé, como material de engenharia, ganhou grande impulso na década de 60, com a inclusão de polímeros e novas formas de fabricação. O tema a respeito desses materiais é, ao mesmo tempo, antigo e recente. É antigo no sentido de que os materiais

biológicos naturais, que incluem o corpo humano, plantas e animais, são materiais compósitos. É recente no sentido de que apenas no início da década de 60 os engenheiros e cientistas têm pesquisado a sério o vasto potencial de fabricação desses materiais (Filho, 2006).

O crescente desenvolvimento dos materiais compósitos e a sua aplicação vêm estimulando os mais diferentes segmentos de mercado. O desenvolvimento e a aplicação dos produtos feitos com materiais compósitos mostram-se cada vez mais significante na no cotidiano e nas aplicações mais complexas, como por exemplo, em Infra-estrutura, Equipamentos elétricos e eletrônicos, Esportivos, Médicos, Automotivos, Marítimos, Aeronáutico e Aeroespacial que serão descritos durante o decorrer desse capítulo. Os materiais compósitos têm sido aplicados com bom desempenho, em diversos produtos e componentes, mas devem ser gradativamente melhorados, através de projetos e melhorias de processos de fabricação, que influenciam em melhor resistência mecânica, química, térmica e etc.

2.2.2 - Definição e Classificação dos Materiais Compósitos

O conceito de compósitos não foi inventado por seres humanos: é encontrado na natureza. Um exemplo é a madeira que é uma combinação de fibras celulósicas em uma matriz de cola natural chamado lignina¹. A concha de invertebrados, como caracóis e ostras, é outro exemplo de um compósito. Tais conchas são mais fortes e mais duras do que compósitos avançados artificiais. Cientistas descobriram que as fibras feitas da teia de uma aranha são mais forte do que fibras sintéticas. Na Índia, Grécia, e outros países, cascas ou palhas misturadas com barro foram usados para construir casas durante centenas de anos. Casca ou serragem misturada em barro é um exemplo de um compósito reforçado por partículas aleatórias e misturando palhas em um barro é um exemplo de compósitos reforçados por fibras descontínuas aleatórias. Estes reforços são feitos para melhorar o desempenho.

A definição de um material compósito, ainda hoje, é muito flexível e pode ser aumentada para ajustar exigências específicas. Staab (1999) definiu que um

¹ Substância que se deposita nas paredes das células vegetais, conferindo a estas notável rigidez. É o que dá consistência à madeira, a qual pode conter até 25% de lignina. Fonte: Dicionário Aurélio – Século XXI.

material, composto é considerado um material que contém dois ou mais componentes distintos com comportamento macroscópico significativamente diferente e uma interface distinta entre cada constituinte (no nível microscópico). Segundo Mazumdar (2002) um material composto é feito para combinar dois ou mais materiais para dar uma única combinação de propriedades. Callister (1991) definiu que um compósito é considerado como sendo qualquer material multifásico, que exibe uma significativa proporção de propriedades de ambas as fases constituintes de tal maneira que uma melhor combinação de propriedades é realizada. Souza (2003) sugeriu que o termo compósito significa um material que consiste de duas ou mais partes ou fases distintas. Esta definição depende do nível de abordagem adotado (microscópico ou macroscópico) e do contexto no qual é utilizado. Definir-se-á um material compósito de engenharia, como um material que satisfaz as seguintes propriedades (Filho, 2006):

- a. Ser manufaturado. Assim, os materiais compósitos naturais não satisfazem à definição;
- b. Consista em duas ou mais fases adequadamente organizadas ou distribuídas, fisicamente e/ou quimicamente distintas, com uma interface separando-as;
- c. Tenha características que não sejam representadas por nenhum dos seus constituintes quando considerados isoladamente.

Segundo Filho (2001) os compósitos são formados basicamente por uma ou mais fases descontínuas envolvida por uma fase contínua. A fase descontínua (reforço) é, geralmente, mais rígida e mais resistente do que a fase contínua (aglomerante), também chamada de matriz. A Figura 1 mostra a composição de um compósito usando Fibra e Resina.

Figura 1 – Formação de um compósito usando Fibra e Resina. (Adaptado de Mazumdar, 2002)

Para classificar os compósitos, a geometria da parte descontínua é um dos principais parâmetros a serem analisados. Visto que as propriedades mecânicas dependem das dimensões e do formato do reforço, usualmente a geometria do reforço é classificada na forma de partículas, flocos e fibras.

Os materiais compósitos reforçados por fibras caracterizam-se por seu comprimento ser maior que a largura do seu diâmetro. Tais materiais são as formas mais comumente usadas na combinação de constituinte, constituídos de uma matriz reforçada por fibras longas (contínuas) ou fibras curtas (descontínuas). Os materiais reforçados por partículas são constituídos de partículas de varias formas e tamanho, distribuídas aleatoriamente dentro de uma matriz. Os materiais reforçados por flocos são formados pela soma de flocos de reduzida grossura ou diâmetro ao material da matriz. Embora a disposição dos flocos na matriz seja aleatória, os mesmos são fabricados de forma a permitir um alinhamento entre si, quando comparado com os materiais reforçados por partículas, apresentando uma estrutura mais ordenada.

Nesse trabalho a classificação do compósito usado será reforçado com fibras multicamada laminado. Os elementos estruturais conhecidos como laminados são então formados pelo empilhamento dessas lâminas segundo uma determinada espessura e propriedades desejadas. O ângulo de orientação da fibra em cada lâmina e a seqüência de empilhamento das camadas pode ser escolhido para se conseguir uma dada

resistência e rigidez para uma aplicação específica. Outras classificações serão apresentadas na Figura 2 a seguir.

Figura 2 – Organograma de classificação dos materiais compósitos. (adaptado de Matthews & Rawlings (1999))

O organograma mostrado acima classifica os compósitos com base na geometria do reforço.

2.2.3 - Fibra, Matriz e Interface Fibra/Matriz

2.2.3.1 - Matriz

Como já mencionado a fase contínua (aglomerante) é conhecido como matriz. O papel da matriz é manter a integridade estrutural do compósito através da ligação simultânea com as fibras em virtude de suas características coesivas e adesivas. Além disso, tem a função de transferir o carregamento para as fibras e também protegê-las contra o ataque ambiental, como corrosão e abrasão, e danos devido ao manuseio. Logo é essencial que as forças adesivas de interface fibra-matriz sejam fortes, pois essa resistência a rupturas depende em grande escala da magnitude dessa adesão. Essa adesão sendo adequada é essencial para maximizar a transferência de carregamento da matriz para as fibras. As matrizes podem ser materiais poliméricos, metálicos ou cerâmicos, sendo que os materiais poliméricos são mais utilizados devido ao baixo

custo, fácil moldagem, boa resistência química e baixo peso específico. Por outro lado, se comparados às matrizes metálicas ou cerâmicas, fatores como a baixa resistência mecânica, o baixo módulo de elasticidade e a baixa temperatura de serviço limitam o seu uso.

Nesse trabalho serão focadas as matrizes poliméricas que são comumente chamadas de resinas. Essas resinas exercem muitas funções essenciais como manter as fibras na posição e orientação adequada, de modo que possam suportar as cargas desejadas, distribuindo as cargas quase uniformemente entre as fibras, servem como uma barreira à propagação de trincas e garantem toda a resistência ao cisalhamento interlaminar do compósito. Entretanto a matriz é a parte do compósito que é relativamente mais fraca, pois não existe atualmente resinas que permitam a utilização das tensões que as fibras são capazes de resistir; um ambiente químico agressivo, a umidade do ambiente, ou a exposição a outras condições adversas podem diminuir bastante o desempenho da matriz antes da fibra ser danificada.

As matrizes poliméricas podem ser classificadas como resinas termoplásticas ou resinas termofixas. As termoplásticas sofrem deformação com o aumento da temperatura e por essa razão são largamente utilizadas em processos de injeção plástica. As resinas termoplásticas consistem de cadeias moleculares lineares ou ramificadas que, ao serem adequadas sob pressão, a sua consistência altera-se de sólida rígida à líquida viscosa. Nesse processo não ocorre reações químicas ou decomposição e os produtos obtidos podem ser reaquecidos repetidas vezes. Já as resinas termofixas entram num processo chamado de cura ou endurecimento quando aquecidos, sendo essa uma reação irreversível. A cura é uma interligação química de cadeias moleculares, formando assim moléculas maiores e mais complexas, tornando o componente mais resistente. O processo de cura pode ser acelerado pela aplicação de calor e pressão em condições controladas por meio de autoclaves. Quando se solidificam, assim permanecem e mesmo reaquecidas, não se refundem. Sob aquecimento a temperatura elevada levará o material à combustão. Deste modo não podem ser reutilizadas.

2.2.3.2 - Fibra

As fibras constituem o segundo material na composição de alguns materiais compósitos reforçados, tendo a importante missão de suportar os esforços

provenientes da matriz. Conforme a classificação de MATHEUS & RAWLINGS (1994) com relação aos esforços provocados nos materiais compósitos reforçados, as fibras apresentam-se em duas formas: Fibras contínuas e fibras descontínuas.

Segundo Callister (2007) as características mecânicas de um compósito reforçado com fibra dependem não apenas das propriedades da fibra, mas também do grau no qual uma carga aplicada é transmitida às fibras pela fase matriz. Importante para a extensão desta transmitância de carga é a magnitude da ligação interfacial entre as fases fibra e matriz. Sob a aplicação de uma tensão, esta ligação fibra-matriz cessa nas pontas das fibras, fornecendo um modelo de deformação da matriz esquematicamente mostrado na Figura 3; em outras palavras, não existe nenhuma transmissão de carga a partir da matriz na extremidade de cada fibra.

Figura 3 - O modelo de deformação na matriz circundante a uma fibra que está sujeita a uma tensão de tração aplicada.

O comprimento crítico de fibra é necessário para efetivo fortalecimento e enrijecimento do material compósito. Este comprimento crítico l_c é dependente do diâmetro da fibra d e a sua resistência mecânica (ou tensão) final σ_f e da resistência mecânica da ligação fibra-matriz (menor resistência ao cisalhamento da matriz ou da interface) τ_c de acordo com a fórmula abaixo:

$$l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{2\tau_c} \quad (2.1)$$

Para um número de combinações de matriz/fibras de vidro e de carbono-, este comprimento crítico é da ordem de 1mm, que cai dentro da faixa de 20 a 150 vezes

o diâmetro da fibra. Quando a tensão se iguala a σ_f^* é aplicada a uma fibra tendo justo este comprimento crítico, resulta o perfil tensão-posição mostrado na Figura 4a; isto é, a carga máxima da fibra é encontrada apenas no centro axial da fibra. Na medida em que o comprimento da fibra l aumenta, o reforço da fibra se torna mais efetivo; isto é demonstrado na Figura 4b, um perfil de tensão-posição axial para $l > l_c$ quando a tensão aplicada é igual à resistência da fibra. A Figura 4c mostra o perfil da tensão-posição para $l < l_c$.

Figura 4 - Perfis tensão-posição quando o comprimento da fibra l (a) é igual ao comprimento crítico l_c ; (b) é maior do que o comprimento crítico; e (c) é menor do que o comprimento crítico para um compósito reforçado por fibra que é submetido a uma tensão de tração igual à resistência à tração da fibra σ_f .

(Adaptado de Callister, 2007)

Fibras para as quais $l \gg l_c$ (normalmente $l > 15 l_c$) são denominadas *contínua*. Fibras *descontínuas* ou *curtas* têm comprimentos menores do que este. Para fibras descontínuas de comprimento significativamente menores do que l_c , a matriz se

deforma ao redor da fibra de tal maneira que existe virtualmente nenhuma transferência de tensão e pouco reforço pela fibra. Estes são essencialmente os compósitos particulados descritos acima. Para produzir um significativo aumento na resistência mecânica do compósito, as fibras devem ser contínuas.

O arranjo ou orientação das fibras entre si, a concentração da fibra e a distribuição da fibra têm uma significativa influência sobre a resistência mecânica e outras propriedades de compósitos reforçados por fibra. Com relação à orientação, dois extremos são possíveis: (1) um alinhamento paralelo do eixo longitudinal das fibras numa única direção, e (2) um alinhamento totalmente randômico. Fibras contínuas estão normalmente alinhadas (Figura 5a), enquanto que fibras descontínuas podem ser alinhadas (Figura 5b), randomicamente orientadas (Figura 5c), ou parcialmente orientadas. Melhores propriedades globais de compósito são obtidas quando a distribuição da fibra é uniforme.

Figura 5 – Representação Esquemática de (a) Fibras Contínuas e Alinhadas, (b) Fibras Descontínuas e Alinhadas e de (c) Fibras Descontínuas e randomicamente orientadas.

2.2.3.3 - Interface Fibra/Matriz

A interface entre fibra e matriz possui grande importância sobre o desempenho mecânico e a integridade estrutural dos compósitos, com o potencial crescimento desse setor, cresce também o interesse de entender os mecanismos físicos

químicos responsáveis pela adesão fibra–matriz. Filho (2001) classifica a interface fibra-matriz como sendo “*o coração*” dos Materiais Compósitos Reforçados por Fibras (MCRF).

Segundo Hull (1981), em particular, a grande diferença entre as propriedades elásticas da matriz e da fibra são interligadas por meio da interface, em outras palavras, as tensões atuantes na matriz são transmitidas para as fibras através da interface. Assim ao analisar teoricamente os fenômenos de transferência de tensão da matriz para a fibra são citadas algumas hipóteses que devem ser adotadas com relação às propriedades da interface:

(i) a matriz e a fibra se comportam como materiais elásticos;

(ii) a interface é infinitamente delgada;

(iii) a interação entre a fibra e a matriz é perfeita, de forma que não ocorre descontinuidade de deslocamento ao longo da interface;

(iv) a interface que se forma ao redor da fibra tem as mesmas propriedades que um material no estado sólido;

(v) a geometria do empacotamento das fibras é regular. Entretanto as hipóteses (ii) e (iv) não estão totalmente corretas, porque a interface real apresenta uma estrutura física e química complexa.

Como a natureza da interação depende das propriedades da fibra e matriz, isto mostra que a interface é específica para cada sistema fibra-matriz. Segue que a escolha dos materiais empregados no compósito tem influência direta, pois a combinação de quaisquer materiais nem sempre estabelecerá a interação adequada entre a fibra e a matriz, sendo algumas vezes necessário um tratamento superficial da fibra para uma melhor interação com a matriz.

2.2.4 - Desenvolvimento Histórico

Muitos são os materiais descritos na literatura como mostra Filho (2006). No Egito, por volta de 4000 a.C., utilizavam-se as hastes das folhas de papiro para confeccionar folhas para escrever sua história. O papiro foi o principal material

utilizado para escrever na antiguidade, especialmente no mediterrâneo, no qual a maior parte dos registros e dos livros da época foram confeccionados a partir dos rolos de papiro. Os Egípcios, em 1500 a.C., usavam cola como aglomerante para unir laminados de madeira e usavam também brotos de bambu para reforçar as paredes de barro das casas adquirindo maior resistência. Como referência bíblica, por volta de 1300 a.C. a 1200 a.C., no livro do Êxodo 5,7 é encontrada a seguinte passagem (Bíblia Sagrada, 1990).

*“Não dêem ao povo palha para fazer tijolos, como vocês faziam antes.
Que eles próprios providenciem a palha.”*

Demonstrando um registro que na antiguidade os povos já trabalhavam com materiais compostos. Os Egípcios e os Hebreus utilizavam palha picada para reforçar os tijolos de barro na sua fabricação, uma prática que nos dias atuais ainda é muito utilizada.

Segundo Filho (2001) e Silva (2005) dentre as várias formas de avaliar o padrão de vida de uma sociedade está o consumo de materiais de engenharia por indivíduo, representado pelos serviços e bens. Esses bens, sejam de consumo ou de produção, e os serviços são mensurados adicionando-lhes valor. A evolução histórica mostra que quando mais desenvolvida o sistema de produção maior a capacidade de transformação do padrão de vida da sociedade. No ano 2000 a.C. isto foi determinado, presumidamente, pelo uso de pederneiras², utilizada como ferramenta de corte. Por volta de 1500 a.C. a tonelagem de bronze revelou quem eram as potências mundiais. Recentemente o material que teria determinado as potências mundiais teria sido o aço, seguido pelas ligas leves e as superligas. No final de 1963 uma série de experiências realizadas na Inglaterra, pela Royal Aircraft Establishment, em Farnborough, levou a descoberta, em meados de 1964, das fibras de carbono de alta resistência e alta rigidez e dos seus compósitos. No decorrer das duas décadas seguintes, a produção dos materiais compósitos reforçados por fibra (MCRF) havia crescido a uma taxa só experimentada pelo aço no seu apogeu que sem dúvida é uma revolução nos materiais de engenharia. Inicialmente os MCRF eram relacionados à característica de combinar alta resistência

² Pedra muito dura, que produz faíscas, quando ferida com um fragmento de aço; sílex, pedernal, pedra-de-fogo: (fonte: Dicionário Aurélio – Século XXI)

e/ou rigidez com baixo peso específico, o que conferia a esse material uma grande eficiência estrutural.

Filho (2006) cita em sua obra que os egípcios antigos fizeram recipientes com fibras grossas a partir do amolecimento de vidro aplicando-lhe calor e o cientista francês Reaumur considerou o potencial de desenvolvimento de fibras de vidros finas já no século 18. Foi com início na década de 30 que as fibras de vidro foram produzidas comercialmente, principalmente para aplicações elétricas com operações em alta temperatura.

Surgiram outras fibras denominadas fibras avançadas, vinte anos depois, tais como: fibra de boro (final da década de 50), fibra de carbono (início da década de 60) e aramida (início da década de 70). Portanto, desde as aplicações mais longínquas dos materiais compósitos pelos egípcios até a utilização desses materiais na última metade do século 20, sofreu sem dúvida o maior processo de empregabilidade desses materiais do que os 6000 anos precedentes.

Atualmente, os materiais compósitos, vêm sendo aplicado nas mais diversas áreas, tais como: equipamentos esportivos, estruturas espaciais, infra-estrutura, setor automotivo.

2.2.5 - Vantagens e Limitações dos Materiais Compósitos

A seleção de Materiais é uma atividade multidisciplinar que mantém interfaces não apenas com um grande número de áreas da engenharia (materiais, química, mecânica, controle ambiental, elétrica), mas também outras áreas do conhecimento humano como marketing e economia. Ferrante (2005) destaca que as atividades de seleção de materiais podem ser executadas tendo em mente múltiplos objetivos, cada um necessitando de estratégias específicas. A lista a seguir fornece alguns objetivos como exemplo:

- Redução de custo – as opções podem incluir reprojetar ou substituição de materiais;
- Atendimento a condições de serviço mais severas – o material atual não mais oferece desempenho adequado;

- Redução de peso – este é o objetivo universal da indústria do transporte. Suas vantagens principais são as melhorias de desempenho e as reduções de emissão de poluentes;
- Interação material-processo – há ocasiões em que se deve substituir o material para permitir a adoção de um processo de fabricação mais conveniente.

Assim ao optar pelo uso de um material com custo elevado, como é o caso dos compósitos, deve-se verificar que a eficiência estrutural para a aplicação que seja compensatória, quando comparamos com outros materiais de engenharia.

Filho (2001) e Pandey (2004) enfatizam algumas das vantagens dos materiais compósitos, como por exemplo:

- A economia do peso é significativa, frequentemente, varia de 25% a 50% em relação aos demais materiais de engenharia convencionais;
- A alta rigidez à torção exigida em vários veículos, principalmente em aviões, pode ser satisfeitas;
- Em virtude do seu aspecto multifuncional, os compósitos são capazes de satisfazer diversas exigências de projeto;
- A resistência à corrosão é excelente;
- As características de tolerância ao impacto e ao dano são satisfatórias;
- Flexibilidade de seleção, mudança no estilo e considerações estéticas do produto é uma característica importante. As freqüentes modificações no estilo, em resposta à mudança de necessidade do cliente, podem ser executadas com baixo peso de investimento;
- Uma baixa expansão térmica pode ser obtida, mas varia significativamente com a escolha do material da matriz, com o tipo de fibra empregada e com sua orientação;
- A manufatura e montagem são simplificadas por causa da integração dos componentes, reduzindo as uniões e os dispositivos de união;

- Devido a confiabilidade, há menos inspeções e consertos estruturais;
- É facilitado o alcance de perfis aerodinâmicos lisos para redução do atrito.
- Alta resistência a danos sofridos por impacto;

As vantagens descritas acima estão presentes nos mais diversos segmentos da indústria, esportes, construção civil, indústria aeronáutica, automotiva.

Ainda segundo Filho (2001) e Pandey (2004) algumas das limitações associadas aos compósitos avançados podem reduzir a aceitação desses materiais no mercado. Como exemplo algumas limitações serão citadas a seguir:

- O custo do material é inibidor para algumas aplicações de produção em grande escala;
- Alguns processos de manufatura são complexos e de alto custo;
- Conhecimento insuficiente sobre as reais condições do comportamento mecânico em serviço, principalmente, sobre a resposta a solicitações de impacto e fadiga, refletindo diretamente na confiabilidade dos componentes fabricados;
- Precauções especiais são muitas vezes necessárias para prevenir ocorrência se causam rejeições de peça;
- Os regulamentos das agências de proteção ambiental e administração da saúde e segurança do trabalho, relacionados aos constituintes químicos, são fatores significantes para os executivos industriais, refletido em normas técnicas, como a ISO 14000. Seguramente a empresas que não se adequarem a essas certificações estarão fora desse mercado;
- Compósitos possuem menos resistentes mecânicos, do que metais forjados, mais propenso à falhas;
- Propriedades transversais podem ser fracas;
- Análise é complexa, multifatorial;
- Matriz está sujeita a degradação ambiental;

Porém, o próprio projeto e a seleção de materiais podem evitar muitas das desvantagens descritas anteriormente. Com relação aos custos de produção e

manufatura, estes tendem a diminuir com o avanço tecnológico. Além do mais os estudos de novas tecnologias podem oferecer um importante avanço nas aplicações de materiais compósitos nos mais diversos segmentos das indústrias.

2.2.6 - Aplicações

Como já mencionado anteriormente vários são os setores de aplicação dos materiais compósitos e como o objetivo aqui é identificar alguns campos de aplicação nas explorações comerciais, alguns exemplos serão citados, tais como em Infra-Estrutura, Elétrico e Eletrônico, Equipamentos Esportivos, Médicos, Automotivo, Marítimo, Aeronáutico e Aeroespacial que serão descritos a seguir segundo Filho (2001) e Filho (2006):

2.2.6.1 - Infra-Estrutura

O uso de aplicações de compósitos poliméricos reforçados (CPR) em estruturas de edifícios, pontes e viadutos são mais recentes, se comparados com outras áreas. Durante muito tempo, na construção civil, os CPR foram utilizados basicamente para reparos e adequações de pontes e edificações com problemas. Com o avanço de pesquisas em manufatura de materiais compósitos poliméricos reforçados por fibras, adicionado a sua alta resistência e rigidez foram encontradas, por exemplo: eficazes aplicações para esses materiais no reparo temporário ou permanente da parte pavimentada das pontes (leito da ponte), que é considerado um sério problema de infraestrutura, em substituição à produção dos leitos de concreto. Os benefícios como redução de preço na instalação, manutenção, diminuição dos pesos das estruturas e diminuição dos riscos de desabamento, não modificando as características dos materiais convencionais, está sendo observado por uma outra área da indústria da construção civil que busca se beneficiar dessas qualidades no objetivo de construir edificações em áreas propícias a abalos sísmicos. A contribuição do uso da trançagem de fibras, por um longo tempo foi empregada na obtenção de estruturas simples, uso decorativo ou cordas. Recentemente essa mesma técnica, graças ao avanço da tecnologia de produção, está sendo utilizada na produção de hastes, estacas e tubos de menor peso aplicados no

setor da construção civil, como componentes com exigências estruturais específicas. As utilizações de fibras estruturais como vidro, aramida e carbono têm propiciado a confecção de pré-formas trançadas, com combinação de fibras (híbridos) ou não, cilíndricas ou planas, impregnados com termofixos ou termopolímeros. Essa estrutura trançada dependendo do tipo de fibra ou matriz selecionado tem se mostrado com preços bem competitivos, com interessantes valores de resistência e rigidez, resistência à corrosão e menor preço.

Em projetos nos quais a corrosão é considerada um dos maiores desafios, os compósitos estão sendo largamente empregados, como nas indústrias alimentícias, de papel e celulose, de açúcar e álcool, e equipamentos para extração de petróleo em alto mar. Além da corrosão outras considerações podem ser observadas, no desenvolvimento do projeto como: vida útil, resistência ao colar ou ao fogo (Figura 6a), segurança e o ataque químico por substâncias ácidas e alcalinas. Alguns produtos como tanques e vasos de armazenamento de combustíveis, produtos químicos, bebidas e grãos, tubos de escoamentos de água e de resíduos e perfis estruturais (Figura 6b) são itens de aplicações mencionadas acima.

Figura 6a – Tubos submetidos ao ensaio endurance (Resistência ao Fogo/Revista do Plástico Reforçado pág. 68, nº 33)

Figura 6b - Perfis estruturais

2.2.6.2 - Elétrico e Eletrônico

A utilização de compósitos no setor elétrico se dá pelo bom isolamento elétrico, boa adesão ao revestimento, resistência ao fogo, propriedades antimagnéticas e boa proteção contra interferências eletromagnéticas. Potenciais aplicações desses materiais são: nas linhas de transmissão como isoladores elétricos, postes de transmissão de energia elétrica, cabos elétricos, antenas, caixas de alimentação elétrica, pás de turbinas eólicas (Figura 7).

Figura 7 - Pás de turbinas eólicas.

Materiais compostos são usados no setor de eletrônicos pela durabilidade dos componentes, resistência técnicas propriedades de reflexão de radiofrequência, alta estabilidade dimensional e boa condutividade elétrica. O uso dessas características pode ser verificado em circuitos integrados de computadores ou microprocessadores empregados como unidade central de processamento de um computador, pois esse microprocessador deve apresentar boas propriedades de transferência de calor para não haver aquecimento. Deve ainda ser capaz de resistir a variações térmicas induzidas, em sistemas de antenas como parabólicas, sub-refletores e estruturas traseiras de emisoras de radiofrequências, em radomes de aeronaves, sem interferir nos sinais emitidos ou recebidos pelo radar.

2.2.6.3 - Equipamentos Esportivos

O setor de esporte e lazer é um campo em crescente desenvolvimento, pois os materiais compósitos oferecem melhor desempenho devido à resistência, alta rigidez a flexão e a torção, a baixa densidade e oferece principalmente segurança na utilização dos produtos. Alguns dos equipamentos que são desenvolvidos através desse material incluem: tacos de beisebol, de hóquei, varas de pescar, esqui de esportes aquáticos e de neves, estruturas de bicicleta, raquetes de tênis, patins, cilindros de ar comprimido para mergulho, arcos e flechas, pranchas, canoas, remos, lanchas, etc.

Figura 8 – A primeira bicicleta dobrável toda de plástico reforçado. (Composites Technology 08/2007)

O emprego de materiais compósitos torna o esporte de competição e o lazer mais seguro graças à escolha precisa das características desejadas a aplicação para cada modalidade.

2.2.6.4 - Médico

A finalidade dos materiais compósitos para o uso médico é a redução de peso e o prolongamento da durabilidade. O corpo humano como já mencionado nesse trabalho, é um compósito natural. Sendo assim os materiais compósitos artificiais, com as devidas apropriações, devem oferecer as mesmas leis fundamentais do comportamento mecânico das partes do corpo. Esses materiais têm encontrado dois

grupos de aplicações: num dos grupos está à aplicação de próteses ortopédicas externas e internas e no outro grupo as aplicações na confecção de aparelhos.

No grupo de aplicações de próteses ortopédicas externas e internas está a prótese de quadril (Figura 9) que vem sendo estudada por pesquisadores que buscam uma solução definitiva para esse tipo de implante. Para esta aplicação, as fibras de carbono são promissoras devido á boa compatibilidade com o tecido humano e devido a sua alta rigidez e resistência. Na outra ponta dessas aplicações está a confecção de aparelhos como, por exemplo, cadeiras de rodas e muletas. A cadeira de roda é uma aplicação muito bem sucedida a partir da fibra de carbono, pois o material confere ao produto a vantagem da rigidez, resistência e redução do peso.

Figura 9 - Fotografia mostrando dois projetos de substituição total do quadril (CALLISTER JR, 2002, in Filho 2006).

2.2.6.5 - Automotivo

No setor automotivo o material compósito é escolhido por apresentar menor peso, maior durabilidade por propiciar um aumento de resistência à corrosão, vida útil, resistência à fadiga, desgastes e resistência ao impacto. É beneficiado também pela diminuição do consumo do combustível, pela melhor segurança e a economia com a manutenção reduzida. Várias são as aplicações nesse setor pás de ventilador, mola de amortecimento da suspensão, barra de direção, painéis, peças de chassis, carrocerias, tanques de combustível e componente menores. Uma aplicação importante está relacionada ao uso do hidrogênio (H_2) e do gás natural veicular (GNV). A utilização do H_2 e do GNV, resulta numa diminuição nas emissões de NO_x e CO_2 (em comparação

com a gasolina), além de em certas regiões do país serem um combustível mais barato. Esses recipientes podem ser usados como vasos de pressão, pois a utilização de H_2 e GNV como combustível veicular, requer um armazenamento que os mantenham comprimidos a alta pressão, acima de 20 MPa. Quando esses cilindros começaram a ser fabricados eles eram de aço, reduzindo a carga útil dos veículos. Como alternativa de substituir os cilindros de aço, foram desenvolvidos os cilindros de compósitos poliméricos reforçados, diminuindo o peso do reservatório, ganhando na carga útil do veículo e aumentando a segurança porque não haverá falha catastrófica do material.

Figura 10 – Fusca de Nelson Piquet Recebendo fibra de carbono. (Plástico Reforçado mar/abr. 2005)

2.2.6.6 - Marítimo

A razão para se escolher o material compósito no setor marítimo leva em consideração o baixo peso, ótima resistência estrutural, redução de custos em manutenção, facilidade de moldagem de geometrias complexas, excelente resistência à corrosão, excelente resistência à fadiga e propriedade não magnéticas.

Várias são as aplicações de compósito polimérico reforçado por fibra de vidro e aramida nos transportes marítimos. Por exemplo, enquanto as grandes embarcações são construídas em aço, a grande maioria das embarcações com menos de 40 metros de comprimento são construídas de compósitos poliméricos reforçados. Isso ocorre porque a fabricação torna-se mais econômica para embarcações menores, como iates, lanchas, veleiros, *jet skis*, *jet boats*, etc. Um outra área onde esses materiais são

aplicados é na construção de plataformas *off-shore* e de equipamentos utilizados para extração de petróleo em alto mar, tais como: oleodutos, vasos e tubulações de alta pressão, tanques de armazenamento.

Figura 11 – O casco todo de Compósitos do Stiletto, construído pela Marinha dos Estados Unidos, toca a água pela primeira vez. (Composites, 09/2007).

2.2.6.7 - Aeronáutico e Aeroespacial

Usados no transporte civil, em aeronaves militares e em aplicações de guerra, os compósitos é, em junção com materiais de núcleo e fibras diversas, a primeira opção tecnológica da engenharia aeronáutica nos quesitos pesos, resistência e manuseabilidade para uma infinidade de aplicações (Plástico Reforçado/Composites, 2005). A proeza do *Space Ship One* (Figura 12) sob a fuselagem do avião de lançamento *White Knight* (Figura 13), o primeiro veículo comercial tripulado a ultrapassar a barreira dos cem mil metros de altura, chamou a atenção de todo mundo. O vôo inaugurou mais uma corrida; a disputa pela exploração comercial do espaço. Em 2005 o mundo foi atraído pelo vôo do empresário Steve Fossett, no seu *Global Flyer* (Figura 14), conseguiu a proeza de dar a volta ao mundo em um avião sem reabastecer. Um sonho a muito restrito ao campo da ficção tornou-se realidade.

Para as pessoas comuns, esses dois feitos citados anteriormente possuem várias semelhanças, dentre elas a ambição pessoal e os esforços do ser humano por conquistar novos espaços. Para qualquer engenheiro, o *Space Ship One* e o *Global Flyer* são grandes desafios de engenharia. Nessa corrida os mais importantes materiais já inventados para superar esse tipo de desafios são os compósitos poliméricos reforçados.

Dois grandes projetos comprovam a importância estratégica dos compósitos no setor aeronáutico e aeroespacial. Desenvolvidos quase simultaneamente por dois dos maiores fabricantes de aviões do mundo, o A380 da Airbus (Figura 15) e o 787 da Boeing (Figura 16) competem em muitos quesitos: tamanho, capacidade e tecnologia. Mas, em se tratando de engenharia, é no uso de compósitos que essa disputa é travada. A razão para isso é simplesmente, só com maior e mais eficaz uso dos compósitos será possível, para o A380 e para o 787, superar limites em tamanho, velocidade e eficiência. O setor aeronáutico e aeroespacial é líder e maior beneficiário na utilização de compósitos poliméricos reforçados, tanto em aplicações civis quanto militares. Algumas outras aplicações são em foguetes, planadores, satélites artificiais, telescópio, ônibus espaciais, estações espaciais, mísseis, motores de foguetes e helicópteros são exemplo nos quais os materiais compósitos são utilizados. As principais razões para o uso dos compósitos poliméricos reforçados na aviação são destacadas pela rigidez específica, resistência específica, customização de projetos, resistência a fadiga, baixo custo de fabricação e redução de manutenção. A estabilidade dimensional, devido as grandes mudanças de temperatura em relação a altitude, também é uma das principais considerações de projetos para aplicações aeronáuticas e aeroespaciais.

Figura 12 – “Space Ship One” (www.Scaled.com)

Figura 13 – “White Knight”

Figura 14 – “Global Flyer” (www.nettribution.co.uk)

Figura 15 - A380 da Airbus (fonte: <http://imagens.kboing.com.br>)

Figura 16 -787 da Boeing (Fonte: [http:// www.warandpeace.ru](http://www.warandpeace.ru)).

2.3 - Processos de Fabricação dos compósitos

Para produzir um material compósito cada processo tem que executar um conjunto de tarefas fundamentais. Algumas dessas são triviais para um processo particular, mas é valioso considerar cada processo e entendê-lo para apreciar seus benefícios e limitações.

Segundo Quinn (2002) as características primárias a serem avaliadas dos processos de produção:

- Mão de obra na confecção do conteúdo;
- Tempo do ciclo;
- Quantidade de produção viável;
- Custo do equipamento;
- Tamanho do componente a ser produzido;
- Forma fundamental a ser produzida.

Essas características primárias são avaliadas para permitir referência fácil e comparação das opções de processo. Uma variedade de fatores pode ditar o tipo de processo que deve ser usado para produção de um produto. Porém é habitual que haja uma escolha do processo que seja satisfatório ao projeto. Isto pode se dar pelo critério de desempenho, mas em geral é o custo da produção o fator mais importante da escolha.

2.3.1 - Descrição dos processos

Uma abordagem sistemática para a descrição será adotada para permitir a comparação e para que os processos sejam facilmente entendidos. Os processos estarão

abaixo destacados nos fundamentos que são em geral básicos a processos de compósitos. Filho (2006) defini os processos como: Autoclave, Pultrusão, Entrelaçamento, Moldagem por transferência de resina e Enrolamento Filamentar.

2.3.1.1 - Autoclave

Uma autoclave é um vaso hermético destinado ao controle da temperatura e da pressão e utilizado para a cura de compósitos poliméricos laminados. O material compósito a ser curado é preparado por laminação manual ou por equipamentos automatizados de laminação. O componente é então colocado na autoclave e submetido a um ciclo controlado de temperatura e pressão. Após a cura, o material compósito exibe as propriedades de engenharia correspondentes. Algumas autoclaves são grandes o suficiente para a cura de componentes estruturais de grandes dimensões, como mostra a Figura 17.

Figura 17 – Autoclave de grandes dimensões

2.3.1.2 - Pultrusão (*Pultrusion*)

A pultrusão é um processo automatizado para a fabricação de componentes que possuem comprimentos contínuos e que têm um formato de seção reta constante (por exemplo, barras, tubos, vigas, etc.). Essa técnica, que está ilustrada esquematicamente na Figura 18, envolve a ação de puxar fibras contínuas através de um banho de resina termofixa líquida para impregnação; estas são então estiradas através de um molde de aço que pré-conforma o componente de acordo com a forma desejada e o excesso de resina é removido para estabelecer a razão resina/fibra. O material passa

então através de um molde que é usinado com precisão, de modo a conferir ao componente sua forma final; esse molde também é aquecido, com o objetivo de dar início ao processo de cura da matriz de resina. Um dispositivo de puxar estira o material através dos moldes e também determina a velocidade de produção. Ao fim do processo, o produto pultrudado é simplesmente cortado no comprimento desejado.

A técnica permite que as fibras tenham orientação na direção axial, ou seja, na mesma direção em que são puxadas. No entanto, os tecidos bidirecionais podem ser adicionados durante o processo de pultrusão para melhorar a resistência do componente a carregamentos na direção transversal. Os principais reforços são as fibras de vidro, carbono e aramida. Os materiais comumente utilizados como matrizes incluem os poliésteres, os ésteres vinílicos e as resinas epóxi. A pultrusão é um processo contínuo e automatizado; as taxas de produção são relativamente altas, o que torna esse processo muito eficaz em termos de custos. Ainda mais, é possível uma ampla variedade de formas.

Figura 18 – Desenho esquemático do processo de pultrusão. (Callister, 2007)

2.3.1.3 Entrelaçamento (*Braiding*)

É uma técnica automatizada para entrelaçar fibras em peças tubulares com geometria complexa e sua origem deriva da indústria têxtil. Este processo é utilizado geralmente para a produção de pré-formas em fibra para subsequente utilização em processos de impregnação e consolidação tais como a moldagem por transferência de resina (*Resin Transfer Molding – RTM*).

O princípio de funcionamento de uma máquina de *Braiding* consiste num anel, nos quais se localizam vários porta-bobinas, que gira em relação a um mandril e este se movimenta paralelamente através do anel. O controle sincronizado do

movimento de rotação do anel com o movimento de translação do mandril determinam o ângulo de entrelaçamento das fibras, ou seja, define a cobertura do trançado sobre a superfície do mandril. No processo de *Braiding* o mandril tem normalmente a forma geométrica da peça a ser fabricada.

Figura 19 – Máquina de entrelaçamento (<http://concom.encs.concordia.ca>)

Uma das vantagens do processo é que muitas fibras são entrelaçadas (processadas) ao mesmo tempo, de forma que há uma redução no tempo de produção. Comparado ao processo de enrolamento de filamento, a técnica de entrelaçamento produz formas mais complexas, porém não tem a mesma capacidade para otimização do ângulo de orientação das fibras. Uma máquina de entrelaçamento (*Braiding*) é mostrada na Figura 19.

2.3.1.4 - Moldagem por transferência de resina (*Resin Transfer Molding*)

Nesse processo uma resina líquida é injetada sob pressão, por meio de uma bomba, para dentro da cavidade de um molde fechado bipartido que contém uma pré-forma em fibra (carbono, vidro, aramida) da geometria do produto desejado. A pré-forma mantém a sua forma geométrica durante a injeção da matriz polimérica na qual após o processo de cura, obtém-se o produto final solidificado. Segundo Chawla (1998), o processo requer o uso de resinas de baixa viscosidade ($< 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), o suficiente para que as fibras sejam facilmente impregnadas. Também se exige que os moldes sejam projetados com orifícios que permitam a saída de ar durante a transferência de resina.

Após o preenchimento da cavidade do molde com resina, os orifícios são fechados para permitir que a bomba aplique pressão à mesma. Um esquema do processo é mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Esquema do processo de moldagem por transferência de resina. (Filho, et al, 2007)

As vantagens potenciais do processo incluem: boa produção, obtenção de peças grandes e com formas complexas, bom acabamento superficial, boa reprodutibilidade, baixa pressão de operação e capacidade de incluir um grande número de insertos no molde.

2.3.1.5 - Enrolamento Filamentar (*Filament Winding*)

O enrolamento filamentar é um processo segundo o qual as fibras de reforço contínuas são posicionadas de maneira precisa e de acordo com um padrão predeterminado para compor a forma do componente desejado. As fibras, submetidas à tração, são primeiramente alimentadas através de um banho de resina líquida para impregnação e em seguida, por meio de um alimentador, são “enroladas” continuamente ao redor de um mandril que tem a forma do produto final, em geral utilizando equipamentos automáticos. No final do processo, após ter sido aplicado o número apropriado de camadas, a cura do componente pode ser executada à temperatura

ambiente, forno ou autoclave, e o mandril pode ser removido. Um desenho esquemático do processo é mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Desenho esquemático do processo de Enrolamento Filamentar (Filament Winding). (Fonte: Carvalho, 1996).

São possíveis vários padrões de enrolamento (isto é, circunferencial, helicoidal e polar), de forma a dar as características mecânicas desejadas, como está mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Representações esquemáticas das técnicas de enrolamento de filamentos circunferencial, helicoidal e polar (Fonte: Callister, 2007).

No enrolamento circunferencial, helicoidal e polar, o alimentador se movimenta ao longo do comprimento do mandril e a velocidade do alimentador em relação à rotação do mandril controla o ângulo de orientação das fibras.

As peças enroladas em filamentos têm razões resistência-peso muito altas. Ainda, essa técnica permite um alto grau de controle sobre a uniformidade e a orientação do enrolamento. Além disso, quando automatizado, o processo é mais economicamente atrativo. Atualmente, máquinas sofisticadas de enrolamento de filamento estão disponíveis com mais de seis graus de liberdade de movimento. As estruturas mais comuns feitas a partir do enrolamento filamentar são:

- Aeronáutica: fuselagens de aviões (Boeing 787 e Airbus A350), as carcaças de motores de foguetes;
- Aeroespacial: caixa para motores de foguetes (“motor cases”), tanques de combustíveis, peças de satélites, tubos de condutores elétricos fabricados em material isolante termo-elétrico;
- Automotiva: cilindros para GNV e tanques de combustíveis;
- Construção Civil: tubos e conexões, formas para pilares e estacas, vigas e pilares sujeitos à ataques químicos;
- Energia: tubos e dutos para indústrias do setor sucroalcooleiro e petroquímico, pás de turbinas eólicas, e vasos de pressão em geral;
- Naval: dutos condutores de arrefecimento, mastros, retrancas de embarcações, guarda - mancebos;
- Militar: cápsulas de mísseis e bombas, protetores de ogivas, invólucros para materiais de resíduos radioativos;
- Médica: próteses e órteses.

Com o avanço dessa tecnologia novas aplicações certamente serão desenvolvidas nos mais diversos tipos de processos.

CAPÍTULO 3

3 – EMBASAMENTO TEÓRICO DE TRAJETÓRIAS ESPECIAIS

Neste capítulo é apresentado o embasamento teórico utilizado inicial e é importante descrever neste momento que os próximos trabalhos desenvolveram e utilizaram gradativamente a teoria descrita, pois neste trabalho será utilizados apenas alguns pontos desta que será implementada em rotinas computacionais para esses cálculos das trajetórias. Vale também esclarecer que a utilização de trajetórias geodésica se deu, pois nesta trajetória a distância entre dois pontos quaisquer, tomados sobre superfície, é sempre a menor distância. Fato esse que implica na estabilidade das fibras, não ocasionando o deslizamento dessas no processo antes da cura final. Conferindo ao processo almejado a obtenção de resultados para desenvolvimento e aprimoramento de trabalhos futuros.

3.1 - Trajetória da fibra em uma superfície de revolução

Nesta secção as equações para uma superfície de revolução, segundo Scholliers (1992), serão desenvolvidas. Estas equações são traduzidas na equação de Clairaut para Geodésicas.

3.1.1 - Trajetória em uma superfície de revolução

A equação de uma superfície de revolução é:

$$S(x, \theta) = \begin{bmatrix} x & r(x)\cos\theta & r(x)\sin\theta \end{bmatrix}^T \quad (3.1)$$

sendo x a coordenada axial e o θ a coordenada circunferencial. A normalização deriva em direção de x e o θ será:

$$S_x = \begin{bmatrix} \frac{1}{A} & \frac{r'}{A}\cos\theta & \frac{r'}{A}\sin\theta \end{bmatrix}^T \quad (3.2)$$

$$S_\theta = [\theta \quad -\sin\theta \quad \cos\theta]^T \quad (3.3)$$

com $r' = \frac{dr}{dx}$ e $A = \sqrt{1 + (r')^2}$.

A tangente t para a trajetória da fibra $\Gamma(s) = [x(s) \quad \theta(s)]^T$ pode ser escrita a partir da derivada de (3.1):

$$t = \left[\frac{dx}{ds} \quad r' \frac{dx}{ds} \cos\theta - r \frac{d\theta}{ds} \sin\theta \quad r' \frac{dx}{ds} \sin\theta + r \frac{d\theta}{ds} \cos\theta \right] \quad (3.2)$$

ou com o *winding angle* w , isto é, o ângulo entre a tangente da trajetória da fibra e a geratriz da superfície, medido na tangente do plano à superfície.

$$t = S_x \cos w + S_\theta \sin w = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} \cos w \\ r' \cos\theta \cos w - A \sin\theta \sin w \\ r' \sin\theta \cos w + A \cos\theta \sin w \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Comparando as equações 3.4 e 3.5 à relação entre $\frac{d\theta}{ds}$, $\frac{dx}{ds}$ e o *winding angle* w pode ser desenvolvido:

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{\sin w}{r} \quad (3.6)$$

$$\frac{dx}{ds} = \frac{1}{A} \cos w = \frac{\cos w}{\sqrt{1 + r'^2}} \quad (3.7)$$

A normal $n = -s_x \times s_\theta$ na superfície é igual a:

$$n = \begin{bmatrix} -\frac{r'}{A} & \frac{1}{A} \cos\theta & \frac{1}{A} \sin\theta \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

A binormal $b = t \times n$ é igual a:

$$b = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} -\operatorname{sen} w \\ -A \operatorname{sen} \theta \cos w + r' \cos \theta \operatorname{sen} w \\ -r' \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} w - A \cos \theta \cos w \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

A curvatura do vetor c é calculada por diferenciação de t por s . À tendência de redução a λ é definido pela equação:

$$\lambda = \frac{c \cdot b}{-c \cdot n} \quad (3.10)$$

Combinando-se as equações 3.5, 3.8 e 3.9, e simplificando tem-se:

$$\lambda = \frac{A^2 r' \operatorname{sen} \omega + A^3 r \frac{d\omega}{ds}}{A^2 \operatorname{sen}^2 \omega - r r'' \cos^2 \omega} \quad (3.11)$$

ou em função de $\frac{d\omega}{ds}$:

$$\frac{d\omega}{ds} = \frac{\lambda(A^2 \operatorname{sen}^2 \omega - r r'' \cos^2 \omega) - A^2 r' \operatorname{sen} \omega}{A^3 r} \quad (3.12)$$

A equação 3.12 obtida com substituição da equação torna-se 3.7:

$$\frac{d\omega}{dx} = \frac{\lambda(A^2 \operatorname{sen}^2 \omega - r r'' \cos^2 \omega) - r' A \operatorname{sen} \omega}{r A^2 \cos \omega} \quad (3.13)$$

3.1.2 - Equação de Clairaut

A equação 3.13 representa uma geodésica

$$\frac{d\omega}{dx} = \frac{-r \operatorname{sen} \omega}{r' \cos \omega} \quad (3.14)$$

ou:

$$r \cos \omega \frac{d\omega}{dx} + \frac{dr}{dx} \operatorname{sen} \omega = \frac{d(r \operatorname{sen} \omega)}{dx} = 0 \quad (3.15)$$

ou:

$$r \operatorname{sen} \omega = c_c \quad (3.16)$$

na qual c_c é uma constante. A equação 3.16 é chamada de equação de Clairaut.

3.1.3 - Cálculo de Geodésicas em uma superfície de revolução

A relação entre o parâmetro radial $d\theta$ e o parâmetro axial dx é dado pela combinações das equações 3.6 e 3.7, descritas pela equação 3.17:

$$d\theta = \frac{\tan \omega}{Ar} dx = \frac{\tan \omega}{r} \sqrt{1 + r'^2} dx \quad (3.17)$$

com a equação de Clairaut (3.16), torna-se:

$$d\theta = \frac{c_c}{r} \sqrt{\frac{1 + (r')^2}{r^2 - c_c^2}} dx \quad (3.18)$$

Integrando sobre a coordenada axial x , temos:

$$\theta(x) = \theta(x_0) + c_c \int_{x_0}^x \frac{1}{r(u)} \sqrt{\frac{1 + r'^2(u)}{r(u)^2 - c_c^2}} du \quad (3.19)$$

3.1.3.1 - Geodésica em um cilindro

Para um cilindro com raio $r(x)$ constante, e a equação (3.19) se torna:

$$\theta(x) = \theta_0 + \frac{c_c(x-x_0)}{r\sqrt{r^2 - c_c^2}} = \theta_0 + (x-x_0)\tan\omega \quad (3.20)$$

3.1.3.2 - Geodésica em um cone

O raio de um cone não é constante, logo ele é dado por $r(x) = r_0 + kx$. A equação 3.19, torna-se então:

$$\theta(x) = \theta_0 + c_c \int_{x_0}^x \frac{1}{r_0 + ku} \sqrt{\frac{1 + r'^2(u)}{(r_0 + ku)^2 - c_c^2}} du \quad (3.21)$$

u é substituído por $v = \frac{r_0 + ku}{c_c}$. A equação 3.21 torna-se:

$$\theta = \theta_0 + \frac{\sqrt{1+k^2}}{k} \int_{\frac{r_0+kx_0}{c_c}}^{\frac{r_0+kx}{c_c}} \frac{1}{v} \sqrt{\frac{1+k^2}{v^2-1}} dv \quad (3.22)$$

v substituído por $z = \frac{1}{v}$:

$$\theta = \theta_0 + \frac{\sqrt{1+k^2}}{k} \int_{\frac{c_c}{r_0+kx_0}}^{\frac{c_c}{r_0+kx}} \frac{-dz}{\sqrt{1-z^2}} \quad (3.23)$$

ou uma segunda equação pode ser:

$$\theta = \theta_0 + \frac{\sqrt{1+k^2}}{k} \left[\arccos\left(\frac{c_c}{r_0 + kx}\right) - \arccos\left(\frac{c_c}{r + kx}\right) \right] \quad (3.24)$$

ou, em função do *winding angle* ω (com Clairaut: $\text{sen}\omega = \frac{c_c}{r}$):

$$\theta = \theta_0 + (\omega_r - \omega_0) \frac{\sqrt{1+k^2}}{k} \quad (3.25)$$

3.1.4 - Trajetória com tendência de diminuição constante em um cilindro

Considere um cilindro, com raio r e comprimento L . A derivada $r' = 0$.

Equação 3.13 torna-se:

$$\frac{d\omega}{dx} = \frac{\lambda \text{sen}^2 \omega}{r \cos \omega} \quad (3.26)$$

A relação entre o *winding angle* ω e a coordenada radial θ , torna-se com o auxílio das equações 3.6 e 3.7:

$$\frac{d\omega}{d\theta} = \frac{\frac{d\omega}{dx} \frac{dx}{ds}}{\frac{d\theta}{ds}} = \lambda \text{sen} \omega \quad (3.27)$$

3.1.4.1 - Trajetória com uma tendência de diminuição constante

Para uma semi-geodésica com tendência de diminuição constante λ , que começa em $x = 0$ e $\theta = 0$, a coordenada x está em função do *winding angle* ω , que muda de ω_0 para ω_e , dado por:

$$x = \frac{r}{\lambda} \int_{\omega_0}^{\omega_e} \frac{\cos \gamma}{\sin^2 \gamma} d\gamma \quad (3.28)$$

Substituindo $t = \tan \frac{\gamma}{2}$:

$$x = \frac{r}{\lambda} \int_{\tan \frac{\omega_0}{2}}^{\tan \frac{\omega_e}{2}} \frac{1-t^2}{2t^2} dt \quad (3.29)$$

ou:

$$x = \frac{r}{2\lambda} \left[\left(\frac{1}{\tan \frac{\omega_0}{2}} + \tan \frac{\omega_0}{2} \right) - \left(\frac{1}{\tan \frac{\omega_e}{2}} + \tan \frac{\omega_e}{2} \right) \right] \quad (3.30)$$

em função do parâmetro radial θ , temos:

$$\theta = \frac{1}{\lambda} \int_{\omega_0}^{\omega_e} \frac{d\omega}{\sin \omega} = \frac{1}{\lambda} \left[\ln \left(\tan \frac{\omega_e}{2} \right) - \ln \left(\tan \frac{\omega_0}{2} \right) \right] \quad (3.31)$$

3.1.4.2 - Exemplo: Enrolando um cilindro com retorno da trajetória da fibra no fim

O cilindro para ser enrolado com retorno da trajetória da fibra no fim pode ser dividido em três partes: a parte com comprimento L_0 , é enrolada com uma constante *winding angle* ω ; e duas partes com comprimento L_μ , no qual o enrolamento com a tendência de diminuição constante é aplicada (Figura 23).

Figura 23 – Trajetória da fibra em um cilindro com retorno no fim (Scholliers, 1992).

O *winding angle* ω muda na parte final de ω_0 para 90° . O comprimento da parte final é derivada da equação (3.30).

$$L_\mu = \frac{r}{2\lambda} \left[\left(\frac{1}{\tan \frac{\omega_0}{2}} + \tan \frac{\omega_0}{2} \right) - \left(\frac{1}{\tan 45^\circ} + \tan 45^\circ \right) \right] \quad (3.32)$$

$$= \frac{r}{2\lambda} \left[\frac{1}{\tan \frac{\omega_0}{2}} + \tan \frac{\omega_0}{2} - 2 \right] \quad (3.33)$$

e o radial cruza a parte final da equação 3.31:

$$\Delta\theta_\mu = \frac{1}{\lambda} \left[\ln(\tan 45^\circ) - \ln\left(\tan \frac{\omega_0}{2}\right) \right] = -\frac{1}{\lambda} \ln\left(\tan \frac{\omega_0}{2}\right) \quad (3.34)$$

O cruzamento global $\Delta\theta$ é igual a:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_0 + 2\Delta\theta_\mu = \frac{L_0}{r} \tan \omega_0 - \frac{2}{\lambda} \left(\tan \frac{\omega_0}{2} \right) \quad (3.35)$$

A tendência de diminuição $|\lambda| \leq \mu$ tem que ser selecionado em função da estratégia de revestimento. Se o próximo circuito de revestimento tem que ser adjacente

ao circuito de revestimento prvio, o cruzamento $2\Delta\theta$ para um circuito de revestimento (uma trajetria da fibra a $+\omega$ e uma trajetria da fibra a $-\omega$) igual a:

$$2\Delta\theta = 2\pi m \pm \Delta\theta_\alpha = 2\pi m \pm \frac{\alpha}{r \cos \omega} \quad (3.36)$$

com $\Delta\theta_\omega$ o cruzamento correspondente com a largura da fita da fibra.

3.2 - Geodsica em uma superfcie desenvolvida

Uma superfcie desenvolvida uma superfcie que pode ser criada em plano, ou em outras palavras, que formado de um plano sem algumas foras no plano. Esta superfcie pode ser vista como o mapeamento de uma grade retangular sem a deformao da grade. As seguintes condies so satisfeitas:

$$S_u \cdot S_u = S_v \cdot S_v = 1 \quad (3.37)$$

$$S_u \cdot S_v = 0 \quad (3.38)$$

Por derivao dessas equaes, temos:

$$\frac{d(S_u \cdot S_u)}{du} = 2S_u \cdot S_{uu} = 0 \quad (3.39)$$

$$\frac{d(S_u \cdot S_u)}{dv} = 2S_u \cdot S_{uv} = 0 \quad (3.40)$$

$$\frac{d(S_v \cdot S_v)}{dv} = 2S_v \cdot S_{vv} = 0 \quad (3.41)$$

$$\frac{d(S_v \cdot S_v)}{du} = 2S_v \cdot S_{vu} = 0 \quad (3.42)$$

$$\frac{d(S_u \cdot S_v)}{du} = S_u \cdot S_{uv} + S_v \cdot S_{uu} = S_v \cdot S_{uu} = 0 \quad (3.43)$$

$$\frac{d(S_u \cdot S_v)}{dv} = S_v \cdot S_{uv} + S_u \cdot S_{vv} = S_u \cdot S_{vv} = 0 \quad (3.44)$$

A geodésica é solucionada resolvendo o sistema de equações $\begin{cases} c.s_u = 0 \\ c.s_v = 0 \end{cases}$

Este sistema de equações é igual a, depois de dispensar as variáveis que são iguais à zero:

$$\begin{aligned} \frac{dt}{ds} . S_u &= \frac{d^2 u}{ds^2} = 0 \\ \frac{dt}{ds} . S_v &= \frac{d^2 v}{ds^2} = 0 \end{aligned} \quad (3.45)$$

Desde que as derivadas de segunda ordem sejam iguais a zero, a geodésica em uma superfície desenvolvida é a imagem de uma linha na superfície desenvolvida.

3.3 - Camada de uma peça revestida por filamentos

3.3.1 - Camada de uma peça tubular

Em uma peça tubular o número de fibras que cruza em uma seção é sempre constante. Se a direção da espinha da superfície $S(u, v)$ corresponde à direção u e a direção circunferencial à direção v , a trajetória da fibra $\Gamma(S) = [u_i(s) \ v_i(s)]^T$, obtido pela mudança circunferencial de uma trajetória de fibra básica $\Gamma_0(S) = [u_0(s) \ v_i(s)]^T$, é:

$$\begin{cases} u_i(s) = u_0(s) \\ v_i(s) = v_0(s) + \frac{iV}{n_p} \end{cases} \quad (3.46)$$

com V o cruzamento total na direção de v e n_p o número de trajetórias de fibra em cada seção cruzada.

À distância dv entre duas fibras, medida ao longo de uma curva com parâmetro v constante, é igual a:

$$dv = \int_v^{v+\frac{V}{n_p}} S_v(u,v) dV \approx \|S_v\| \frac{V}{n_p} \quad (3.47)$$

A distância $d\alpha$, medida perpendicular à trajetória da fibra, é igual a (com ζ_{tv} o ângulo entre a tangente t e S_u):

$$d\alpha = dv \sin \zeta_{tv} = \frac{V}{n_p} \sqrt{(S_v \cdot S_v)^2 - (t \cdot S_v)^2} \quad (3.48)$$

A camada $t\alpha$ do revestimento padrão é inversamente proporcional com a distância entre as fibras:

$$t_\alpha = \frac{\alpha t}{d\alpha} = \frac{n_p \alpha t}{V \sqrt{(S_v \cdot S_v)^2 - (t \cdot S_v)^2}} \quad (3.49)$$

com t e α respectivamente a espessura e a largura do feixe de fibras impregnado.

3.3.2 - Camada de uma superfície de revolução

Uma superfície de revolução S_u é sempre perpendicular a S_v . O ângulo ζ_{tv} é igual a $\frac{\pi}{2} - \omega$, com ω o *winding angle*. A distância dv é igual a $\frac{2\pi r}{n_p}$. A distância perpendicular entre duas fibras é então:

$$d\alpha = \frac{2\pi r}{n_p} \cos \omega = \frac{2\pi}{n_p} \sqrt{r^2 - c_c^2} \quad (3.50)$$

A camada:

$$t\alpha = \frac{n_p \alpha t}{2\pi r \cos \omega} = \frac{n_p \alpha t}{2\pi \sqrt{r^2 - c_c^2}} \quad (3.51)$$

A mais comum peça revestida por filamentos (exeto o cilindro) é o vaso de pressão. Muitos vasos de pressão têm duas aberturas polares com um raio r_0 e uma peça cilíndrica com raio r_u (Figura 24).

Figura 24 – Vaso de Pressão (adaptado de Scholliers, 1992)

A trajetória da fibra começa tangencialmente a abertura polar, perpendicular ao eixo e a geratriz. Conseqüentemente, o começo do *winding angle* ω é igual a 90° , ou:

$$r_0 \sin 90^\circ = r_0 = c_c \quad (3.52)$$

O *winding angle* em uma peça cilíndrica é então, por combinação das equações 3.16 e 3.52:

$$\omega = \arcsen\left(\frac{r_0}{r_u}\right) \quad (3.53)$$

O número de fibras n_p necessária para cobrir completamente o mandril com uma camada igual segundo a equação (3.51) (com $t_\alpha = t$ e $r_u = r$) é:

$$t\alpha = \frac{n_p \alpha t}{\pi \sqrt{r^2 - r_0^2}} \quad (3.55)$$

A espessura aumenta quando menor o raio. No retorno do raio a espessura teórica é infinita.

CAPÍTULO 4

4. METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO DAS TRAJETÓRIAS

Nesse capítulo serão descritos os recursos utilizados na elaboração do trabalho e os procedimentos de cálculos das trajetórias da fibra e do alimentador (olho), bases para implementação do sistema *CALTRAJ*.

4.1 Recursos computacionais

No desenvolvimento e implementação das rotinas de cálculos foram utilizados:

HARDWARE: Foi utilizado um computador com processador Intel® Celeron® M 420 1.60 GHz e CPU de 1,5 GB de memória RAM, sistema operacional Windows XP SP3 .

SOFTWARES: Os softwares utilizados (Em Anexo) como auxílio na elaboração dos cálculos das trajetórias foram Cabri-Géomètre II (pacote para geometria plana), Excel 11.0 (Office 2003), Solid Edge v18 (sistema CAD tridimensional) e o Netbeans 6.0.1 (ambiente de programação JAVA).

4.2 Metodologia de desenvolvimento

O objetivo, como já mencionado anteriormente, é desenvolver algoritmos de cálculos da trajetória da fibra sobre o mandril ao longo do processo de enrolamento filamentar (*FW*) . Tais algoritmos serão inicialmente validados em planilhas eletrônicas para posteriormente servirem de base para criação de ambiente computacional de suporte ao processo de *FW*. Este ambiente irá possibilitar que futuras implementações para cálculos de trajetórias mais complexas possam ser facilmente desenvolvidas, ou mesmo, que possam ser implementadas diferentes estratégias de processo, como por exemplo, permitir a mudança do ângulo de enrolamento entre uma camada e outra ou mesmo ao longo da mesma camada (otimização do *layup*).

Para facilidade de compreensão do leitor, serão apresentados a seguir os procedimentos de cálculo da trajetória juntamente com as telas de entradas de dados solicitados ao usuário durante o processo. Dada à sua grande aplicação em processos, serão implementadas inicialmente as rotinas para cálculo dos revestimentos circunferencial, helicoidal e polar em superfícies cilíndricas utilizando trajetórias geodésicas, ilustradas na Figura 25.

Figura 25 – Tipos de Revestimentos (Carvalho, 1996)

Para tal, o usuário seleciona inicialmente a opção de qual tipo de revestimento será calculado, conforme mostrado na Figura 26.

USP - Universidade de São Paulo EESC - Escola de Engenharia de São Carlos PPG-AEM - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Orientador: Jonas de Carvalho Mestrando: Edgar dos Santos Gomes		
Tipos de Revestimento		
	Revestimento Circunferencial	Ativo
	Revestimento Helicoidal	Ativo
	Revestimento Polar	Ativo

Figura 26 – Escolha dos Tipos de Revestimento para Cálculo.

Uma vez que estes procedimentos tenham sido validados, serão aplicados em dois estudos de caso bastante representativos de aplicação do processo de

enrolamento filamental: vasos de pressão e tubos cônicos, apresentados no próximo capítulo juntamente com a implementação inicial do sistema computacional em ambiente JAVA.

4.3 Revestimento Circunferencial

O primeiro tipo de revestimento a ser descrito é o Circunferencial, que é o revestimento onde as fibras são posicionadas uma ao lado da outra sobre toda a superfície do mandril, em ângulo próximo de 90° em relação ao eixo de rotação do mandril.

O passo inicial para a elaboração dos cálculos é a escolha do tipo de filamento que será utilizado. Estes dados podem ser encontrados em catálogos dos fabricantes, conforme ilustrado na Figura 27, para o fabricante HECXEL ®. Naturalmente outros fabricantes podem ser facilmente incluídos na tabela pelo usuário do sistema.

HECXEL Fibers							
Medida de Filamento (in: 360/100g)							
Tipo de Fibra	Marque com "X"	Número de Filamentos	Resistência a Tração MPA	Módulo de Elasticidade GPA	Secção Transversal mm2	Densidade g/cm3	Diâmetro mm
AS4	x	3000	4278	228	0,12	1,79	0,39
		6000	4278	228	0,24	1,79	0,553
		12000	4278	228	0,28	1,79	0,782
AS4C		3000	4347	231	0,11	1,78	0,374
		6000	4347	231	0,22	1,78	0,529
		12000	4347	231	0,44	1,78	0,748
IM4		12000	4692	245	0,43	1,79	0,74
IM6		12000	4796	276	0,41	1,78	0,723
IM7		12000	5589	279	0,25	1,76	0,74
IM7C		6000	5175	276	0,13	1,78	0,407
		12000	5520	276	0,25	1,76	0,564
		12000	5760	292	0,25	1,79	0,564
IM8		12000	5796	290	0,28	1,8	0,597
IMC		12000	5589	304	0,25	1,79	0,564
PV36/700		12000	5520	290	0,28	1,8	0,597
PV42/600		12000	4690	248	0,43	1,79	0,74
PV42/650		12000	5520	290	0,28	1,8	0,597
		12000	5760	292	0,25	1,79	0,564
							Filamento mm
							0,39

Figura 27 – Tipos de filamentos (adaptado de Silva, 2005)

Após a escolha do tipo de filamento é necessário calcular o número de iterações até 360°, representado por NI , da seguinte forma:

$$NI = 360 \left(\frac{1}{d_t} \right) \quad (3.2.1)$$

onde d_i é o decremento de θ (Figura 28), intervalo em ângulo onde será calculado cada um dos pontos da trajetória ao longo da seção circular (plano YZ). Este dado é definido pelo usuário, ao iniciar os cálculos.

Figura 28 – Planos de referencia e indicação do ângulo θ .

Com a determinação do número de iterações até 360° , NI , é possível calcular o incremento do revestimento circunferencial (I_{rc}), na direção X, necessário para que as fibras sejam posicionadas de forma precisa mantendo-se uma ao lado da outra sobre toda a superfície do mandril, como segue.

$$I_{rc} = \frac{ef}{NI} \quad (3.2.2)$$

onde ef é a espessura do filamento escolhido para este tipo de revestimento. Este incremento I_{rc} corresponde ao avanço na direção X para cada interação que é feita no cilindro, sendo continuamente repetido até que a soma de todos incrementos realizados atinja o comprimento desejado do cilindro, também um dos dados de entrada pelo usuário.

Importante salientar que o Número de pontos até 360° (NI) e o Incremento do Revestimento Circunferencial (I_{rc}) são dados que são visualizados pelo usuário na planilha de cálculo, conforme ilustrado na Figura 29. Esta funcionalidade deverá também ser implementada posteriormente programa *CALTRAJ*.

Simulação "Filament Winding" (Cilindro)		
Tipos de Revestimento		
Polar	Helicoidal	Circunferencial X
Dados de Entrada (Ponto inicial)		
Diâmetro do Cilindro	Ângulo {Teta}	Comprimento do Revestimento
26,6	126	56
Diâmetro Interno do Cilindro		
5,0		
Eixo das Abscissas (X)	0	
Incremento do X	0,001083333	
Eixo das Ordenadas (Y)	-5,000	
Eixo das Cotas (Z)	8,660	
Raio do Cilindro (r)	10,00	
Ângulo θ	120	
Decremento do θ	-1	
Passo	0,39	
Ângulo α	89,44	
Filamento (mm)	0,39	
Distância Olho-Cilindro	1	

Figura 29 – Dados de Entrada e Informações Complementares

Os dados de entrada que serão necessários para a execução dos cálculos são (Figura 30): Diâmetro do Cilindro, Ângulo θ (Ponto Inicial, ou seja, onde irá iniciar o revestimento), Comprimento do Revestimento (mandril), Distância do Olho em Relação ao Cilindro e o decremento de θ .

Entre com os seguintes dados:
-Diâmetro do Cilindro
-Ângulo Teta (Ponto Inicial)
-Comprimento do Revestimento
-Distância do Olho em Relação ao Cilindro
-Decremento de Teta

Figura 30 – Dados de entrada para o cálculo do revestimento circunferencial

Com os dados de entrada inseridos serão calculadas as coordenadas X, Y e Z, conforme indicado na Figura 31, da seguinte forma: a Coordenada X iniciará na posição 0 (zero) e para cada iteração será somado um Incremento do Revestimento Circunferencial (I_{rc}). A Coordenada Y é calculado então da seguinte forma:

$$Y = R \cdot \cos \theta . \quad (3.2.3)$$

A Coordenada Z é calculada como segue.

$$Z = R.\text{sen}\theta \quad (3.2.4)$$

Sendo R o raio do cilindro.

Figura 31 – Parâmetros para cálculo das coordenadas X, Y e Z

Antes de calcular as coordenadas X, Y e Z são necessários desenvolver outros cálculos para se chegar ao resultado acima mostrado. Para iniciar esses cálculos cada iteração o ângulo θ , ângulo de posicionamento inicial, fornecido pelo usuário, é subtraído de um decremento de θ (d_i) (Figura 32) e esse ângulo é transformado em radianos. O procedimento é repetido até quando a soma de todos os incrementos do revestimento circunferencial realizados atinja o comprimento do cilindro.

Números de iterações	<i>Resultados dos Cálculos:</i>				
	Raio $r(x)$ 10,00				
	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z	Ângulo (Teta)	Quadrante
1	0,000000	-5,000000	8,660254	120	2º
2	0,001083	-4,848096	8,746197	119	2º
3	0,002167	-4,694716	8,829476	118	2º
4	0,003250	-4,539905	8,910065	117	2º
5	0,004333	-4,383711	8,987940	116	2º

Figura 32 – Decremento do ângulo θ (para 1º)

Em seguida é necessário determinar em qual quadrante cada ponto se encontra. Com o contínuo decremento o ângulo θ inicial, atinge valores em modulo

acima de 360° . Para se determinar o quadrante de cada ponto em sua respectiva iteração primeiramente é calculado o Número da Volta (NV) em que o ponto está:

$$NV = INT\left(\frac{\theta}{360}\right) \quad (3.2.5)$$

onde $INT()$ aproxima um número para baixo até o número inteiro mais próximo. Esse Número da Volta (NV) determina em que volta está o ângulo θ , sendo que o mesmo pode assumir valores negativos, pois o sentido da rotação é horário. Um próximo passo é calcular o ângulo θ no intervalo entre $0^\circ - 359^\circ$ (θ_e). Para determinar θ_e faremos

$$\theta_e = \theta - 360.NV. \quad (3.2.6)$$

Após o cálculo acima, é estabelecida uma sequência lógica para determinar o Quadrante (Q) (Figura 33):

$$Q = \begin{cases} se & 0 \leq \theta_e \leq 90; & 1^\circ \text{ Quadrante} \\ se & 90 < \theta_e \leq 180; & 2^\circ \text{ Quadrante} \\ se & 180 < \theta_e \leq 270; & 3^\circ \text{ Quadrante} \\ se & 270 < \theta_e < 359; & 4^\circ \text{ Quadrante} \end{cases} \quad (3.2.7)$$

com a sequência acima descrita determina-se em qual quadrante está o ponto calculado em cada passo.

Números de iterações	Cálculo dos Quadrantes			
	Diâmetro $d(x)$		20,00	
	Ângulo (Teta)	Ângulo entre 0 e 359 (Teta)	Número de Voltas	Quadrante
1	120	120	0	2º
2	119	119	0	2º
3	118	118	0	2º
4	117	117	0	2º
5	116	116	0	2º
6	115	115	0	2º
7	114	114	0	2º

Figura 33 – Cálculo dos Quadrantes

Em seguida devem ser calculados o Ângulo Omega (ω) (*winding angle*) e o Passo da trajetória (P) (Figuras 34 e 35), que são informações complementares usadas para validar os cálculos até então descritos.

Figura 34 – Indicação do ângulo Omega e Passo

Diâmetro $d(x)$		20,00		
ΔX		ΔY		Tangente (Omega)
X_f	X_i	Y_f	Y_i	
0,5200	0,3250	10,0000	-10,0000	102,5641026
ω (Winding Angle)		Passo (mm)		
Grau	Radiano	X_f	X_i	0,3900
89,44	1,561046636	0,7150	0,3250	

Figura 35 – Ângulo Omega e Passo

O Ângulo Omega (ω) é descrito da maneira como segue:

$$\omega = \arctg\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \quad (3.2.8)$$

Para o passo da trajetória é utilizada a seguinte estratégia: determina-se o valor da coordenada X (que chamaremos de X_i) para um determinado valor de θ_e . Em seguida é determinado o valor da coordenada X (que chamaremos de X_f), para o ângulo $(\theta_e + 360^\circ)$. Determinado X_i e X_f , calcula-se o passo P segundo:

$$P = X_f - X_i \quad (3.2.9)$$

Validado os cálculos da trajetória sobre o mandril, serão desenvolvidos os cálculos da posição do Olho (*Alimentador*), Figura 36a, em relação à trajetória anteriormente descrita. As fibras, submetidas à tração, são primeiramente alimentadas através de um banho de resina líquida para impregnação e em seguida, por meio de um *alimentador*, são “enroladas” continuamente ao redor do mandril. O Cálculo da posição do Olho (Figura 36b) é gerado de forma automática através dos dados de entrada.

Figura 36a – Desenho Esquemático da Posição do Olho

Números de Iterações	Cálculos da Posição do Olho (Pay-out):				
	Diâmetro $d(x)$ 20,00			Tipos de Revestimento	
	Cálculo RC				
	Ponto Inicial	X'	Y'	Z'	Distância do Cilindro
		0,2048	11,0000	17,8979	1
	Coordenada X'	Coordenada Y'	Coordenada Z'	Quadrante	Ângulo ψ
1	0,2048	11,0000	17,8979	1º	58,4252
2	0,2059	11,3107	17,7032	1º	57,4252
3	0,2070	11,6179	17,5031	1º	56,4252
4	0,2081	11,9216	17,2976	1º	55,4252
5	0,2092	12,2217	17,0869	1º	54,4252
6	0,2102	12,5180	16,8710	1º	53,4252

Figura 36b – Cálculos da Posição do Olho

Para determinar a Posição do Olho é necessário estabelecer outros cálculos auxiliares, como por exemplo, as coordenadas X', Y' e Z' (Figura 37), o quadrante da posição do Olho, que é determinado de forma análoga ao quadrante da trajetória e o Ângulo ψ (Figura 38). Inicialmente são apresentados os cálculos das coordenadas X', Y' e Z'.

Figura 37 – Desenho Esquemático das Coordenadas X' , Y' e Z' .

Figura 38 – Desenho esquemático do Ângulo ψ e Cilindro Virtual

A Coordenada X' iniciará na posição de $\Delta X'$ e para cada iteração será somado um Incremento do Revestimento Circunferencial (I_{rc}). A Coordenada Y' é calculado assim:

$$Y' = R_v \cdot \cos \psi \quad (3.2.10)$$

A Coordenada Z' é calculada como segue:

$$Z' = R_v \cdot \sin \psi \quad (3.2.11)$$

onde R_v é o raio do cilindro virtual (Figura 36). Para a determinação das coordenadas X' , Y' e Z' é necessário calcular o ângulo ψ . Esses cálculos serão subdivididos em três casos: θ igual a 90° , θ maior que 90° e θ menor que 90° , apresentados a seguir.

4.3.1 Cálculo da Posição do Olho com θ igual a 90°

Este cálculo, Figura 39, se inicia com a determinação do Raio do Cilindro Virtual (R_v), que é o raio do cilindro somado com a Distância Olho-Cilindro.

Figura 39 – Cálculo da Posição do Olho com $\theta = 90^\circ$

A Distância Olho-Cilindro (Figura 40) é a medida, com relação a eixo Y, da diferença entre o Raio do Cilindro Virtual (R_v) e o Raio do Cilindro (R).

Figura 40 – Desenho esquemático da Distância Olho-Cilindro

Após determinar os raios acima citados será considerado $\Delta Y'$ igual R_v e $\Delta Z'$ igual a R , e em seguida o ângulo ψ , responsável pelo ângulo inicial do Olho:

$$\psi = \arctg\left(\frac{\Delta Z'}{\Delta Y'}\right) \quad (3.2.12)$$

A partir desse momento será estabelecida a medida da distância OP (Figura 41). Como já possuímos os valores de $\Delta Y'$ e $\Delta Z'$, basta aplicarmos o Teorema de Pitágoras, conforme visualizado na figura:

Figura 41 – Desenho esquemático da distância OP

Determinado a distância OP, o próximo passo é obter da distância $X'P$ (Figura 42), pois esta é responsável pela posição inicial do Olho, em relação ao eixo X (ou $\Delta X'$).

Figura 42 – Distância $X'P$ do Revestimento Circunferencial

À distância $X'P$ é obtida através do ângulo complementar de ω , que denotaremos por ω' , calculado da seguinte forma:

$$\omega' = 90 - \omega \quad (3.2.13)$$

com ω' calculado seguiremos para a determinação de $X'P$, propriamente dito. O cálculo é realizado segundo:

$$X'P = tg \omega' \cdot OP \quad (3.2.14)$$

que será o ponto inicial do Olho, em relação ao eixo X.

4.3.2 Cálculo da Posição do Olho com θ maior que 90°

Os cálculos desse caso (Figura 43) se iniciam da mesma forma que o caso anterior, ou seja, determina-se o Raio do Cilindro Virtual (R_v).

Figura 43 – Cálculo da Posição do Olho com $\theta > 90^\circ$

O próximo passo é determinar o ângulo α (Figura 42) da maneira que segue:

$$\alpha = 180 - \theta \quad (3.2.15)$$

Figura 44 – Desenho esquemático do ângulo α

Demonstrado o ângulo α , as próximas medidas a que serão determinadas são Y_{min} e Y_{max} , conforme Figura 45.

Figura 45 – Desenho esquemático das medidas Y_{min} , Y_{max} e $\Delta Z'$

com observado na figura acima podemos descrever Y_{min} e Y_{max} , como segue:

$$Y_{min} = \frac{R}{\cos \alpha} \quad (3.2.16)$$

$$Y_{max} = Y_{min} + R_v \quad (3.2.17)$$

Com o auxílio dos cálculos acima será descritos a medida $\Delta Z'$, da seguinte maneira:

$$\Delta Z' = \frac{Y_{\max}}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (3.2.18)$$

A seguir será descrito o Ângulo ψ (Figura 46) para θ maior que 90° que é responsável pelo ângulo inicial do Olho, da mesma maneira que discutida anteriormente, equação (3.2.12).

Figura 46 – Desenho esquemático do ângulo ψ e distância OP

Estabeleceremos nesse momento a distância OP, já demonstrada para o caso θ igual 90° . Determinado essa distância prosseguiremos os cálculos, utilizando as mesmas estratégias do caso anterior, na obtenção da distância $X'P$.

4.3.2 Cálculo da Posição do Olho com θ menor que 90°

Os cálculos que serão apresentados (Figura 47) se iniciam da mesma forma que os dois casos anteriores, determinando o Raio do Cilindro Virtual (R_v).

Figura 49 – Desenho esquemático das medidas Y_{max} e Y_{min} , no caso $\theta < 90^\circ$

Para determinar Y_{max} e Y_{min} utilizam-se as seguintes relações:

$$Y_{max} = \frac{R}{\cos \theta} \quad (3.2.19)$$

$$Y_{min} = Y_{max} + R_v \quad (3.2.20)$$

A seguir será determinada a medida $\Delta Z'$ (Figura 50)

Figura 50 – Desenho esquemático da medida $\Delta Z'$

da seguinte maneira:

$$\Delta Z' = \frac{Y \min}{\operatorname{tg} \theta} \quad (3.2.21)$$

Determinado a medida $\Delta Z'$, torna-se possível descrever o ângulo ψ e as distâncias OP e X'P (Figura 51) da mesma forma do caso $\theta > 90^\circ$.

Figura 51 – Desenho esquemático do ângulo ψ e das distância OP e X'P

Desenvolvidos os cálculos extras, será elaborado os Cálculos do Quadrante do Olho (Figura 52), necessários para completar os Cálculos da Posição do Olho.

Figura 52a – Parâmetros para o cálculo dos quadrantes da posição do Olho

Números de Iterações	Cálculo dos Quadrantes do Olho				
	Diâmetro $d(x)$ 1,00				
	Ângulo ψ (graus)	Ângulo ψ (Radianos)	Ângulo ψ entre 0 e 359	Número de Voltas	Quadrante
1	18,4349	0,321750554	18,4349	0	1º
2	17,4349	0,304297262	17,4349	0	1º
3	16,4349	0,286843969	16,4349	0	1º
4	15,4349	0,269390677	15,4349	0	1º
5	14,4349	0,251937384	14,4349	0	1º

Figura 52b – Cálculos dos Quadrantes do Olho

Inicialmente para calcular os quadrantes do Olho, deve-se determinar o ângulo ψ inicial em destaque na figura acima. Determinado esse ângulo é necessária uma sequência de testes lógicos que serão descritos a seguir:

$$\psi = \begin{cases} \text{se } \theta = 90^\circ \Rightarrow \psi_1 \\ \text{se } \theta > 90^\circ \Rightarrow \psi_2 \\ \text{se } \theta < 90^\circ \Rightarrow \psi_3 \end{cases} \quad (3.2.22)$$

onde ψ_1 é o ângulo ψ correspondente aos cálculos do ângulo $\theta = 90^\circ$, ψ_2 é o ângulo ψ correspondente aos cálculos do ângulo $\theta > 90^\circ$ e ψ_3 é o ângulo ψ correspondente aos cálculos do ângulo $\theta < 90^\circ$. Determinado o ângulo ψ para a primeira posição, como mostrado, a obtenção desse ângulo para as demais posições é adicionando o decremento de θ em cada iteração.

Com os cálculos descritos anteriormente sobre o ângulo ψ o próximo passo é determinar o Números da Volta (NV_o) em que o Olho se encontra, pois o mesmo dará n voltas ao redor do mandril até atingir o comprimento do cilindro, dá seguinte maneira:

$$NV_o = INT\left(\frac{\psi}{360}\right) \quad (3.2.23)$$

Como apresentado sabe-se que o ângulo ψ é decrementado em função do decremento de θ para cada iteração, logo pode-se concluir que ψ assume valores negativos, pois o sentido da rotação do mandril é horário. Segue que para se determinar em que quadrante está o ponto calculado é necessário converter os ângulos em valores entre $0^\circ - 359^\circ$, que será denominado ângulo ψ_e , da maneira que segue:

$$\psi_e = \psi - 360.NV \quad (3.2.24)$$

A equação acima auxiliará na determinação do Quadrante (Q_o) em referência a posição do Olho inserindo uma seqüência lógica para determiná-lo, como segue abaixo:

$$Q_o = \begin{cases} se \ 0 \leq \psi_e \leq 90; 1^\circ \text{ Quadrante} \\ se \ 90 < \psi_e \leq 180; 2^\circ \text{ Quadrante} \\ se \ 180 < \psi_e \leq 270; 3^\circ \text{ Quadrante} \\ se \ 270 < \psi_e < 360; 4^\circ \text{ Quadrante} \end{cases} \quad (3.2.25)$$

com a seqüência acima descrita consegue-se determinar em qual Quadrante está o ponto calculado do Olho em cada iteração.

Analizamos até o momento um tipo de revestimento específico, ou seja, Revestimento Circunferencial, passaremos a discutir um outro tipo de revestimento, chamado Revestimento Helicoidal.

4.4 Revestimento Helicoidal

O segundo tipo de revestimento a ser apresentado é o Revestimento Helicoidal, na qual a rotação do mandril e a velocidade de deslocamento do alimentador são sincronizadas de tal forma que a hélice desejada e o ângulo sejam gerados. Este tipo de revestimento é versátil, tendo um amplo número de combinações de diâmetro, comprimento e ângulos de revestimento (*winding angle*). O conceito básico do revestimento helicoidal tem sido estendido aos formatos não simétricos. Algoritmos especiais determinam a seqüência adequada para o revestimento de superfícies mais complexas.

O passo inicial para a elaboração dos cálculos do Revestimento Helicoidal é a escolha do tipo de filamento que será utilizado, fato idêntico ao do caso anterior, pois os cálculos nesse tipo de revestimento são análogos aos do Revestimento Circunferencial. Somente as diferenças serão descritas no decorrer desse tópico, os

cálculos já descritos serão ocultados. Escolhido o tipo de filamento que será utilizado, nota-se que para o revestimento helicoidal não é necessário determinar o Número de Interações até 360° e o Incremento do Revestimento Helicoidal, pois os mesmos não são relevantes para esse tipo de revestimento. Diferentemente do Revestimento Circunferencial, o Revestimento Helicoidal não depende do decremento de θ para determinar o melhor posicionamento das fibras, pois θ (Figura 53) é calculado a partir da variável X e do Ângulo ω (*winding angle*), onde o último é um dado de entrada e θ será descrito da seguinte maneira, segundo o trabalho de Scholliers (1992).

$$\theta = \theta_0 + \frac{c_c(x - x_0)}{r\sqrt{r^2 - c_c^2}} = \theta_0 + (x - x_0)tg\omega \quad (3.2.26)$$

onde θ_0 é o ângulo θ da iteração anterior, x é o valor de assumido por X na iteração, x_0 é o valor assumido por X na iteração anterior e ω é o ângulo de Revestimento (*winding angle*).

Figura 53 – Desenho esquemático da obtenção do ângulo θ

Estabelecido como será calculado o ângulo θ , outro ponto relevante para os cálculos desse tipo de revestimento são os dados de entrada (Figura 54) que serão necessários para o desenvolvimento dos mesmos. Esses dados são: Diâmetro do Cilindro (D), Ângulo θ (Ponto Inicial, ou seja, onde irá iniciar o revestimento), Ângulo

ω (*winding angle*), Comprimento do Revestimento (C_r), Distância do Olho em Relação ao Cilindro e Incremento de X.

Figura 54 – Dados de entrada para cálculo do revestimento helicoidal

Vale destacar que os Limites do Ângulo ω é a abertura mínima e máxima que o ângulo ω pode assumir nesse caso e está em destaque na Figura 55 para melhor compreendê-los. Esses limites serão divididos em duas partes, primeiro será calculado o menor ângulo ω_i e depois o maior ω_f da seguinte forma:

$$\omega_i = \arctg\left(\frac{D}{C_r}\right) \quad (3.2.27)$$

$$\omega_f = 90 - \arctg\left(\frac{ef}{D}\right) \quad (3.2.28)$$

Figura 55 – Limite do Ângulo ω para o Revestimento Helicoidal

As equações acima descritas determinam os limites do ângulo ω que é mais uma diferença entre os revestimentos Circunferencial e Helicoidal.

Os cálculos da posição do olho para o Revestimento Helicoidal são determinados de modo análogo a posição do Olho para o revestimento Circunferencial. Será comentada somente a diferença entre os cálculos citados. Como mencionado anteriormente o Revestimento Helicoidal não depende do decremento de θ para determinar o melhor posicionamento das fibras, pois θ é calculado a partir da variável X e do Ângulo ω (*winding angle*). Considerando a posição do Olho e sabendo que o ângulo ψ é determinado em função o ângulo θ , após determinar o ângulo ψ para a primeira iteração, os demais ângulos são calculados como segue:

$$\psi = \psi_0 + \frac{c_c(x - x_0)}{r\sqrt{r^2 - c_c^2}} = \psi_0 + (x - x_0)tg\omega. \quad (3.2.29)$$

onde ψ_0 é o ângulo ψ da iteração anterior, x é o valor de assumido por X na iteração, x_0 é o valor assumido por X na iteração anterior e ω é o ângulo de Revestimento (*winding angle*). A fórmula acima constitui a última diferença nos cálculos entre os dois primeiros casos de revestimento. A partir desse momento passaremos a discutir sobre o último tipo de revestimento abordado nesse trabalho, chamado Revestimento Polar.

4.5 Revestimento Polar

Nesse revestimento as fibras são posicionadas através de uma trajetória num plano tangencial até ambas as aberturas polares, que estão situadas nas extremidades do mandril. O mandril avança uma faixa de largura constante durante cada novo ciclo. A vantagem principal do revestimento polar é sua simplicidade e a possibilidade para manter velocidade de revestimento regular. Provê um método de velocidade alta ideal para fabricar formas esféricas

Todos os cálculos do Revestimento Polar são idênticos ao do Revestimento Helicoidal, salvo um único que é os Limites do Ângulo ω . Nesse caso, em destaque na Figura 56 para melhor compreendê-los. Pode-se observar que os limites

no caso do Revestimento Polar serão divididos em duas partes, o primeiro ângulo ou o menor ângulo ω_i é sempre igual a 0 (zero) e depois o maior ω_f da seguinte forma.

$$\omega_f = \arctg\left(\frac{D}{C_r}\right) \quad (3.2.30)$$

Figura 56 – Limite do Ângulo ω para o Revestimento Polar

Vale citar que todos os cálculos do Revestimento Polar relacionados a posição do olho são idênticos ao do Revestimento Helicoidal. Logo não havendo a necessidade de comentá-los encerra-se aqui o desenvolvimento dos cálculos dos Revestimentos Circunferencial, Helicoidal e Polar. A seguir estabeleceremos uma Estratégia de Revestimento.

4.6 Estratégia de Revestimento

Segundo Silva (2005), no Revestimento Helicoidal somente após certo número de ciclos, será possível se ter uma indicação da nova estrutura que estará sendo formada ao longo da superfície do mandril, que corresponde à estratégia de sequenciamento do enrolamento (“*winding strategy*”), conforme proposto por Lossie (1994). Essa estratégia é caracterizada pela mudança angular entre sucessivos ciclos de revestimentos. Isto quer dizer que se a circunferência é subdividida dentro de um

número de segmentos correspondendo ao número de revestimentos por camada, a estratégia pode ser expressa pela razão do número de posições mudando no início de um novo ciclo e o número total de ciclos considerando as posições ao longo da circunferência.

Como exemplo a Figura 57, que descreve a estratégia utilizada por Carvalho (2006), mostra a estratégia chamada “5/16” que indica que a cada novo ciclo o mandril irá girar sobre uma fração de 5/16 da circunferência resultando em uma sequência: 1, 6, 11, 16, 5, 10, etc. Essa sequência se dará até que a superfície esteja completamente revestida.

Figura 57 – Estratégia de Revestimento (Carvalho, 1996)

Nesse trabalho será sugerida uma estratégia de revestimento chamado de “22/45” (Figura 58) que indica que a cada novo ciclo o mandril irá girar uma fração de 22/45 ou 172° para iniciar um novo ciclo da trajetória, resultando na sequência: 1, 23, 45, 22, 44, 21, etc. Essa estratégia visa que a cada novo ciclo o próprio filamento se fixe nas extremidades do cilindro, não permitindo que mesmo deslize sobre as extremidades o que causaria a perda da geometria desejada. Como já mencionado essa estratégia se repetirá até que a superfície seja revestida completamente.

Figura 58 – Estratégia de Revestimento Sugerida

A estratégia de revestimento para a posição do Olho é determinada através dos cálculos já descritos nos três casos de revestimentos abordados nesse trabalho. Será necessário elaborar uma estratégia mais sofisticada para obter o preenchimento de toda a superfície do mandril.

CAPÍTULO 5

5. ESTUDOS DE CASO E IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA CALTRAJ

Com o desenvolvimento deste surgiu a necessidade de dois estudos de caso aplicados em processo de enrolamento filamentar: vasos de pressão e tubos cônicos. Em seguida, será apresentada a primeira versão do programa *CALTRAJ*, com o auxílio do programa Solid Edge são apresentadas interfaces gráficas para visualização dos resultados obtidos nos cálculos.

5.1 Estudos de caso

Neste tópico serão apresentados os cálculos de trajetórias em Tubos Cônicos e Vasos de Pressão. Esses estudos surgiram da necessidade de se verificar aplicações no processo de enrolamento filamentar que vá além de superfícies cilíndricas e que se vislumbrem superfícies que juntamente com a anterior abranja a maioria das aplicações no processo de Filament Winding.

5.1.1 Cálculo de Trajetória em Tubos Cônicos

O estudo sobre os cálculos de trajetória em Tubos Cônicos surgiu do interesse de simular as trajetórias geodésicas sobre a superfície do mesmo, com o intuito de futuramente implementar esses cálculos na linguagem de alto nível JAVA,. Nesta fase do trabalho, visando validar os procedimentos já descritos no capítulo anterior, serão utilizadas a planilhas desenvolvidas. Os Tubos Cônicos são muito utilizados em aplicações de Filament Winding, certo desse tipo de aplicação tornou-se indispensável realizar esse estudo de caso para dar continuidade nos estudos das aplicações do Processo de Enrolamento Filamentar.

O tipo de revestimento a ser descrito é o Revestimento Helicoidal. Outros tipos de revestimentos, como os revestimentos circunferencial e polar, não serão contemplados, pois se julgou desnecessário descrevê-los. Os procedimentos para

cálculo o de trajetória em tubos cônicos é análogo ao utilizado em superfícies cilíndricas, logo serão omitidos os cálculos já apresentados no capítulo anterior. Para iniciar o estudo, como em todos os tipos de processos descritos até o momento, é necessário escolher o tipo de filamento que será utilizado para o revestimento da superfície de Tubos Cônicos, essa escolha é desenvolvida da mesma forma já apresentada no estudo de superfície cilíndrica. Escolhido o tipo de filamento que será utilizado, há novamente a necessidade de se enfatizar que no Revestimento Helicoidal o ângulo θ é calculado segundo Scholliers (1992).

Os dados de entrada descritos na planilha eletrônica (Figura 59) que serão necessários para o desenvolvimento dos cálculos são: Diâmetro Inicial (D), Diâmetro Final (d), Ângulo θ (Ponto Inicial, ou seja, onde irá iniciar o revestimento), Ângulo ω (winding angle), Comprimento do Tubo Cônico (C_{tc}), Distância do Olho em Relação ao Cilindro e Incremento de X.

Figura 59 - Dados de Entrada para cálculo de Tubo Cônico

Com os dados de entrada inseridos os cálculos para se determinar a trajetória de um tubo cônico são idênticos aos do capítulo anterior, com exceção do raio. Pois o raio de um cone não é constante, logo ele é dado por

$$R(x) = R_0 + kx. \quad (4.1.1)$$

onde R_0 é o raio inicial, relativo ao diâmetro inicial (D) e k é o coeficiente angular.

Com auxílio de planilhas geradas no Excel e com o software Solid Edge, os resultados obtidos nos cálculos são importados para o sistema CAD que irá interpretá-los para que possa ser visualizado o resultado. Esse último está apresentado

na Figura 60, onde a trajetória geodésica está descrita sobre a superfície do Tubo Cônico.

Figura 60 – Trajetória Geodésica sobre a superfície de um Cone

A partir da trajetória acima o próximo passo é desenvolver os cálculos da posição do Olho (Alimentador) em relação ao cálculo da trajetória acima descrita. Esse cálculo é gerado de forma automática através dos dados de entrada, como demonstrado para os cálculos do cilindro, salvo o raio do cone que assume valores diferentes a cada iteração devido a sua geometria, como segue:

$$R'(x) = OP + kx' \quad (4.1.2)$$

onde R' é o raio da posição do Olho e x' é a somatória da distância $X'P$ com o valor de x na iteração correspondente.

Figura 61 - Trajetória Geodésica sobre a superfície de um Cone e a Posição do Olho relativo a mesma.

Analísado o Revestimento Helicoidal para Cones. A partir desse momento será visualizado o resultado obtido com o auxílio do programa Solid Edge que interpretará visualmente todos os pontos calculados para validar os resultados obtidos (Figura 61).

A Figura 61 valida os resultados obtidos. Este estudo de caso foi elaborado para estimular e apoiar os futuros interessados nesse tipo de pesquisa, onde os mesmo encontrarão uma ferramenta que auxiliará na implementação de um software para esse tipo de superfície.

5.1.2 Cálculo de Trajetória em Vasos de Pressão

O estudo sobre os cálculos de trajetória em Vasos de Pressão surgiu do interesse de simular as trajetórias geodésicas sobre a superfície do mesmo, afim de que o presente estudo e os demais já apresentados contemplem 95% das aplicações e que futuramente esse cálculo seja implementado na linguagem de alto nível JAVA. Vasos de Pressão são muito utilizados em aplicações no processo de enrolamento filamental, certo disso tornou-se indispensável realizar esse estudo de caso para dar continuidade nas aplicações. Com os tipos de superfícies até aqui estudadas para essa dissertação, espera-se que no futuro haja interesse em descrever as superfícies que contemplam os 5% das aplicações restantes para o Processo de Filament Winding.

O tipo de revestimento a ser descrito na aplicação de Vaso de Pressão é o Revestimento Helicoidal. Como no estudo de caso anterior, outros tipos de revestimentos, como os revestimentos circunferencial e polar, não serão contemplados. Para iniciar o estudo do Processo de Revestimento Filamentar em Vaso de Pressão é necessário escolher o tipo de filamento que será utilizado para o revestimento da superfície do Vaso de Pressão. Escolhido o tipo de filamento, é necessário enfatizar que no Revestimento Helicoidal o ângulo θ é determinado segundo o trabalho de Scholliers (1992).

Os dados de entrada da planilha eletrônica (Figura 62) que serão necessários para o desenvolvimento dos cálculos são: Diâmetro do Vaso de Pressão (D), Ângulo θ (Ponto Inicial, ou seja, onde irá iniciar o revestimento), Ângulo ω (*winding*

angle), Comprimento do Vaso de Pressão (C_v), Distância do Olho em Relação ao Cilindro e Incremento de X .

Figura 62 - Dados de Entrada Inicial para Vasos de Pressão

Com os dados de entrada inseridos todos os cálculos seguem o mesmo modelo dos casos anteriores. O que vale ser ressaltado sobre a diferença de cálculo do vaso de pressão é o raio para cada iteração. A geometria de um vaso de pressão (Figura 63) é mais complexa que os casos anteriores e torna-se necessário desenvolver estratégias para se determinar a trajetória desejada.

Figura 63 – Vaso de Pressão

Como os raios de um Vaso de Pressão não são constantes a estratégia desenvolvida para se determinar a trajetória é descrita segundo a Figura 63, ou seja, o vaso de pressão será dividido em três partes: semi-esfera 1, tubo e semi-esfera 2. Com essa divisão será possível determinar os raios de cada uma das três partes da peça e consequentemente a trajetória, como mostrado na figura abaixo.

Figura 64 – Esquema para Cálculo dos Raios de um Vaso de Pressão

Estabelecido os parâmetros da estratégia, para se calcular os raios é necessário dividir o Vaso de Pressão em três peças distintas, duas semi-esferas e um tubo. A primeira peça, chamada de semi-esfera 1, o raio ($R_1(x)$) será calculado da seguinte maneira:

$$R_1(x) = \sqrt{R^2 - (R - I_r)^2} \quad (4.1.3)$$

onde R é o raio do vaso de pressão e I_r é incremento do revestimento.

A segunda peça, denominada de Tubo, o raio é constante ($R_2(x)$) mantendo o raio que é determinado a partir do dado de entrada do Diâmetro do Vaso de Pressão (D).

A terceira peça, Semi-esfera 2, o seu raio ($R_3(x)$) será calculada da seguinte forma:

$$R_3(x) = \sqrt{R^2 - (C_{fv} - X)^2} \quad (4.1.4)$$

onde C_{fv} é o valor comprimento final do Vaso de Pressão e X é o valor da coordenada X na iteração correspondente. As Coordenada X , Y e Z para semi-esfera 1, tubo e semi-esfera 2 são calculadas como descrito em superfícies anteriores.

A seguir vamos comprovar a partir das planilhas geradas no Excel e com o auxílio do programa Solid Edge V18, os resultados obtidos nos cálculos importando as planilhas para o sistema CAD que irá interpretá-los para que possamos visualizar o resultado obtido. Resultado esse que está apresentado na Figura 65, onde a superfície do Vaso de Pressão foi tomada pela trajetória calculada até o presente momento.

Figura 65 - Trajetória sobre a superfície de um Vaso de Pressão

Com a obtenção da trajetória geodésica sobre um vaso de pressão o próximo passo é desenvolver os cálculos da posição do Olho (Alimentador) em relação aos cálculos da trajetória anteriormente descrita. Esse cálculo é gerado de forma automática através dos dados de entrada. Como mostrado em situações anteriores, salvo os raios que serão comentados abaixo (Figura 66).

Os raios da posição do Olho referentes ao de um Vaso de Pressão não são constantes e será determinado segundo a Figura abaixo:

Figura 66 – Esquema para os Cálculos dos Raios da Posição do Olho Referentes ao de um Vaso de Pressão

Para calcular os raios da Posição do Olho de um Vaso de Pressão será necessário também dividi-lo em três peças distintas, duas semi-esferas e um tubo. A primeira peça, denominada de semi-esfera 1, o raio será calculado da seguinte maneira:

$$R'_1(x) = \sqrt{R'^2 - (R' - I_r)^2} . \quad (4.1.5)$$

onde R'_1 é o raio referente a posição do olho para semi-esfera 1 e R' é igual a distância OP.

A segunda peça, denominada de tubo, o raio ($R'_2(x)$) é constante mantendo o raio que é determinado pelo dado entrada do Diâmetro do Vaso de Pressão (D).

A terceira peça chamada de semi-esfera 2 e o seu raio será calculado da seguinte forma:

$$R'_3(x) = \sqrt{R'^2 - (C_{fv} - I_r)^2}. \quad (4.1.6)$$

onde R'_3 é o raio referente a posição do olho para semi-esfera 2 e C_{fv} é o valor comprimento final do Vaso de Pressão.

Todos os demais cálculos aqui omitidos procedem de modo análogo ao já descrito em situações anteriores.

Foi analisado até aqui Revestimento Helicoidal para Vaso de Pressão. A partir desse momento será visualizado o resultado obtido desse revestimento com o auxílio do programa Solid Edge que interpretará visualmente todos os pontos calculados para validarmos os resultados obtidos (Figura 67).

Figura 67 - Trajetória sobre uma superfície de um Vaso de Pressão e a Posição do Olho relativo a mesma.

5.2 Implementação do Programa *CALTRAJ*

O desenvolvimento do Programa *CALTRAJ* é voltado para atender as necessidades encontradas nas planilhas desenvolvidas para cálculo das trajetórias

geodésicas em superfícies cilíndricas. O fluxograma abaixo (Figura 68) descreve o interesse inicial para o desenvolvimento do software.

Figura 68 - Fluxograma da Implementação de Rotinas Computacionais para Cálculo de Trajetórias Geodésicas no Processo de FILAMENT WINDING

A tela inicial do programa *CALTRAJ* (Figura 69) tem a função de facilitar a integração entre homem-máquina através de recursos como botões de execução, tabelas dinâmicas, figuras, etc.

Figura 69 – Tela inicial do Programa *CALTRAJ*

Nesse programa a primeira ação a ser executada é a escolha do tipo de revestimento, como mostrado na figura 70.

Figura 70 – Seleção dos tipos de revestimento no programa *CALTRAJ*

Após selecionar o tipo de revestimento, a descrição do mesmo deve aparecer abaixo da inscrição “EESC – Escola de Engenharia de São Carlos” (Figura 71) para indicar ao usuário qual o tipo de revestimento está sendo gerado.

Figura 71 – Indicação do tipo de revestimento que está sendo gerado

O objetivo inicial do programa é calcular as coordenadas X, Y, Z, Ângulo θ e Quadrantes para a trajetória da fibra sobre a superfície de um cilindro. Esta trajetória sobre a superfície do cilindro é desenvolvida através do olho de revestimento da máquina para revestimento em materiais compósitos (Filament Winding). Essa trajetória possui formato espiral ao longo dos eixos de movimentação da máquina, representados através das coordenadas X, Y e Z, conforme mostrado no capítulo anterior. Com os valores para estas três coordenadas calculadas pelo programa *CALTRAJ* é possível construir e visualizar a trajetória formada ao longo do revestimento do cilindro através de um software CAD. O software CAD utilizado para auxiliar nessa visualização é o Solid Edge v18, disponível na Escola de Engenharia de São Carlos – USP, licença acadêmica.

O programa também calcula, como já mencionado na metodologia, os valores de X', Y', Z', Ângulo ψ e os Quadrantes referentes aos eixos Y e Z. Ao término do processo dos cálculos, os valores são armazenados em tabelas que ficam a disposição do usuário para as devidas análises, validando os cálculos, ângulos e quadrantes até o final do revestimento. Como o programa tem o objetivo de calcular pontos, tornou-se necessário informar o quadrante em que o referido ponto calculado está na trajetória, conseqüentemente influi na determinação do quadrante da posição do Olho de Revestimento, pois o cálculo da posição do Olho segue os mesmos conceitos do Cálculo da trajetória dos Revestimentos. Com estes dados calculados, é possível importá-los para que as trajetórias sejam visualizadas, através do programa Solid Edge, descritas pelas coordenadas fornecidas pelo programa *CALTRAJ*.

5.2.1 Interface Gráfica do Revestimento Circunferencial

A Interface Gráfica do Programa *CALTRAJ* para o Revestimento Circunferencial têm uma particularidade nos cálculos para que os resultados fossem satisfatórios. A particularidade está no fato de que as fibras necessariamente têm que estar posicionadas uma adjacente a outra até que o cilindro seja totalmente revestido. Fato esse que pode ser observado na espessura da fibra, pois essa espessura é igual ao valor encontrado no Passo X, que é a distância entre os centros das fibras.

A interface do Programa *CALTRAJ* para o Revestimento Circunferencial (Figura 72) foi desenvolvida através de conceitos simples e de fácil interpretação.

Figura 72 – Interface gráfica para o revestimento circunferencial

Com base nas planilhas desenvolvidas no Excel, os dados de entrada do programa são:

Espessura do Filamento: é a medida em milímetros da espessura do filamento que se deseja trabalhar. A opção pelo tipo de filamento é feita através do botão “Pesquisar” (Figura 73). Ao pressionar esse botão será aberto uma janela de opções de filamentos para se trabalhar. Podendo acrescentado outros tipos de filamento, inclusive de fabricantes diferentes segundo a necessidade do usuário (Figura 72).

Figura 73 – Botão pesquisar tipo de filamentos

Tipo	N.º Filamentos	Diâmetro(mm)
AS4	3000	☐ 0.390
AS4	6000	☐ 0.553
AS4	12000	☐ 0.782
AS4C	3000	☐ 0.374
AS4C	6000	☐ 0.529
AS4C	12000	☐ 0.748
AS4D	12000	☐ 0.740
BM4	12000	☐ 0.723
BM6	12000	☐ 0.740
BM7	6000	☐ 0.407
BM7	12000	☐ 0.564
BM7C	12000	☐ 0.597
BM8	12000	☐ 0.564
IMC	12000	☐ 0.597
PV36/700	12000	☐ 0.740
PV36/800	12000	☐ 0.597
PV36/850	12000	☐ 0.564

Figura 74 – Tabela de escolha do tipo de filamento

Diâmetro do Cilindro: é uma corda que passa pelo centro do cilindro, medindo em milímetros a distância entre as extremidades da corda que corta o cilindro;

Ângulo Teta: é a abertura inicial desejada, com relação ao plano YZ, para o primeiro ponto a ser calculado pela trajetória;

Comprimento do Revestimento: é a medida em milímetros do comprimento do cilindro;

Distância do Olho: é a medida em milímetros, com relação ao eixo Y, da distância entre cilindro e o Olho;

Decremento de Teta: é o decremento do ângulo θ com relação a cada iteração executada.

Após inserir os dados de entrada é necessário pressionar o botão “*Calcular Trajetória*”, para que sejam executados os cálculos requeridos e mostrados na tabela abaixo (Figura 75).

Iterações	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z	Angulo Teta	Quadrante
1	0.0	3.061616997868383...	5.0	90.0	1.º
2	0.002938888888888...	0.1744974835125054	4.9969541350954785	86.0	1.º
3	0.005877777777777...	0.3487823687206273	4.987820251299121	84.0	1.º
4	0.008816666666666...	0.5226423163382673	4.972609476841367	82.0	1.º
5	0.011755555555555...	0.6958655048003284	4.951340343707852	80.0	1.º
6	0.014694444444444...	0.8682408883346521	4.92403876506104	78.0	1.º
7	0.017633333333333...	1.0395584540887972	4.890738003669028	76.0	1.º
8	0.020572222222222...	1.2096094779983395	4.851478631379982	74.0	1.º
9	0.023511111111111...	1.3781867790849958	4.8063084796915945	72.0	1.º
10	0.026450000000000...	1.5450849718747373	4.755282581475767	70.0	1.º

Figura 75 – Tabela dinâmica de apresentação dos cálculos das trajetórias

Com os cálculos do Revestimento Circunferencial processados algumas informações sobre a trajetória e a posição do Olho são exibidas na caixa de informações complementares (Figura 76).

Informações Complementares	
Numero de Iterações:	60302
Cálculo do Incremento do Revestimento:	0,001658
Raio do Cilindro:	25.0
Posição Inicial do Olho (Pay Out)	
Winding Angle (grau):	89,657896
Passo X (mm):	0,597000
Delta X:	0.2331714659694645
Delta Y:	30.0
Delta Z:	25.0

Figura 76 – Informações Complementares sobre a trajetória e a posição do Olho.

Essas informações complementares são:

Número total de iterações: é a quantidade de repetições no processo de resolução (de uma equação, de um problema) mediante uma seqüência finita de operações em que o objeto de cada uma é o resultado da que a precede;

Cálculo do incremento do revestimento: é o valor no qual cada iteração sofre uma adição constante na coordenada X;

Raio do Cilindro: é um valor muito usado nos cálculos, logo julgou-se necessário sua exibição, que é a metade do diâmetro;

Winding Angle: é a abertura, em graus, formada entre a fibra e a geratriz do cilindro;

Passo: é a distância em milímetros de um ponto a outro de uma trajetória, após um giro de 360°;

Delta X: é a posição inicial da coordenada X em relação a posição do Olho;

Delta Y: : é a posição inicial da coordenada Y em relação a posição do Olho;

Delta Z: : é a posição inicial da coordenada Z em relação a posição do Olho;

Após todos os procedimentos apresentados a próxima ação é visualizar essa simulação com a ajuda do programa Solid Edge, importando os dados da tabela. A Figura 77 mostra a trajetória resultante da simulação do Revestimento Circunferencial. Observe que a ilustração abaixo se comporta de forma uniforme durante toda a superfície do cilindro, mostrando a principal característica desse tipo de revestimento, que é a medida do Passo X igual a Espessura dos Filamento.

Figura 77 – Simulação de Revestimento Circunferencial

5.2.2 Interface Gráfica do Revestimento Helicoidal

Com o desenvolvimento da Interface Gráfica do Revestimento Circunferencial, a próxima interface a ser desenvolvida é a Interface do Revestimento Helicoidal (Figura 78)

Figura 78 – Interface Gráfica para o Revestimento Helicoidal

Esse revestimento, diferentemente do anterior, não exige que as fibras sejam posicionadas uma adjacente a outra e sim que obedeçam ao “Winding Angle”, ou o Ângulo Omega (ω), durante todo o revestimento. Essa diferença é clara no software, o desenvolvimento da trajetória é calculada considerando-se o Ângulo de enrolamento. Caso o ângulo inserido esteja fora dos parâmetros estabelecidos para os limites de Omega, como comentado no capítulo anterior, será apresentada a seguinte mensagem (Figura 79):

Figura 79 – Mensagem do Limite do Omega para o Revestimento Helicoidal

A interface do Programa *CALTRAJ* para o Revestimento Helicoidal foi desenvolvida com conceitos simples e de fácil interação homem-máquina. Selecionado o tipo de revestimento que será trabalhado. Os seguintes dados de entrada do programa são inseridos:

Espessura do Filamento;
Diâmetro do Cilindro;
Ângulo Teta;
Comprimento do Revestimento;
Distância do Olho;
Incremento de X e
Ângulo Omega (*Winding Angle*).

Após inserir os dados de entrada é necessário pressionar o botão “*Calcular Trajetória*”, para que sejam executados os cálculos requeridos. Com os cálculos realizados é necessário visualizar os resultados através do programa Solid Edge, importando os dados da tabela. A Figura 80 mostra a trajetória resultante da simulação do Revestimento Helicoidal. Observe que a ilustração abaixo ilustra o posicionamento da trajetória da fibra de maneira constante durante toda a superfície do cilindro, mostrando a principal característica desse tipo de revestimento, ou seja, o Passo é superior à Espessura dos Filamento, o que não ocorre no Revestimento Circunferencial.

Figura 80 – Simulação de Revestimento Helicoidal

5.2.3 Interface Gráfica do Revestimento Polar

Por último, a Interface Gráfica do Revestimento Polar (Figura 81) igualmente ao anterior não exige que as fibras sejam posicionadas uma adjacente a outra

e sim que obedecem ao “*Winding Angle*”, ou o Ângulo Omega (ω), durante todo o revestimento.

EESC - CALTRAJ

EESC - Escola de Engenharia de São Carlos

Revestimento Polar

Informações Complementares

Numero de Iterações: 4000
Cálculo do Incremento do Revestimento: 0.5
Raio do Cilindro: 200.0

Posição Inicial do Olho (Pay Out)

Winding Angle (grau): 4
Passo X (mm): 0.0
Delta X: 4054.9639409097567
Delta Y: 201.0
Delta Z: 200.0

Revestimento Polar

Iterações	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z	Angulo Teta	Quadrante
1	0.0	1.2246467991473532E-...	200.0	90	1°
2	0.5	0.12204530280825748	199.9998627623567	89.96503658402825	1°
3	1.0	0.24409056017170822	199.99989104944062	89.9300731880565	1°
4	1.5	0.3661357266405424	199.99986408129236	89.89510976238475	1°
5	2.0	0.48818075676910505	199.99940419798435	89.860146378113	1°
6	2.5	0.6102256051106588	199.99906905961055	89.82518297014124	1°
7	3.0	0.7322702262185783	199.99865944629678	89.79021956416949	1°
8	3.5	0.8543145746462785	199.99817535919557	89.75525915019774	1°
9	4.0	0.9763586049474089	199.99761679548072	89.72029275222599	1°
10	4.5	1.0984022716756492	199.99698375837966	89.68532934625424	1°

Salvar X,Y,Z

Figura 81 – Revestimento Polar

Caso o ângulo ω inserido esteja fora dos parâmetros estabelecidos para os limites de Omega uma mensagem de alerta (Figura 82) será exibida para o usuário.

Figura 82 – Limites de Omega para o Revestimento Polar

Todas as funções do Revestimento Polar são análogas aos do Revestimento Helicoidal, salvo os limites de Omega estabelecidos para cada revestimento.

A Figura 83 mostra a trajetória resultante da simulação do Revestimento Polar, importando os dados da planilha para o SolidEdge. Observe que a ilustração abaixo se comporta de forma uniforme na superfície do cilindro, mostrando a principal característica desse tipo de revestimento, que é a trajetória ligando as extremidades desse cilindro. Vale enfatizar que esse tipo de revestimento é muito utilizado para superfícies em forma de esfera.

Figura 83 – Simulação de Revestimento Polar

Validado os cálculos implementados para superfícies cilíndricas, um sugestão para trabalhos futuros, já visando a aplicação dos cálculos desenvolvidos, consiste em implementar as trajetórias sobre a superfície de Cones e Vasos de Pressão.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

Materiais Compósitos são conhecidos pela alta resistência mecânica e baixo peso, o desempenho superior, a resistência à corrosão e a baixa densidade são umas das características marcantes dos compósitos já testados e aprovados pela engenharia.

A importância dos compósitos, como discutido nos capítulos 1 e 2, mostra-se diante da sua ampla aplicação nos variados segmentos de mercado e por possuir vasta gama de materiais onde os engenheiros podem buscar a melhor combinação para atingir o objetivo procurado no projeto, seja ele na obtenção de resistência mecânica, química, etc. As aplicações dos materiais compostos expandirão à medida que a sociedade, os engenheiros e os pesquisadores não se limitem à procura e desenvolvimento de novos materiais.

O Revestimento de materiais compósitos (“*Filament Winding*”) ou processo de enrolamento filamentar consiste no processo de fabricação de materiais compósitos reforçados por fibras impregnadas com resinas, com uma trajetória definida sobre uma superfície de um compósito tendo como objetivo aumentar a resistência, rigidez e resistência à corrosão do compósito.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver as rotinas de cálculo e aplicá-las em um sistema computacional que descreva a trajetória da fibra de modo otimizado. O sistema desenvolvido, denominado preliminarmente de *CALTRAJ*, foi apresentado, bem como suas limitações e propostas para expansão discutidas. Diante dos anseios citados no início dessa dissertação os cálculos da trajetória geodésica foram descritos e mostraram-se confiáveis diante das simulações visualizadas. O software desenvolvido foi escrito na linguagem de alto nível JAVA que mostrou bons resultados em termos de interface gráfica com o usuário e portabilidade. Assim as interfaces gráficas desenvolvidas se mostraram amigáveis, confiáveis e didáticas. A visualização gráfica supriu a necessidade deste trabalho que este é o primeiro passo para um programa que

tem seu código fonte aberto e que com certeza será aperfeiçoado, modificado e estendido a outras funções e módulos.

6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para Futuros Trabalhos estão baseadas nos seguintes parâmetros.

- a) Desenvolver um algoritmo que calcule a trajetória da fibra através de Splines, esta técnica de aproximação suaviza as curvas da trajetória;
- b) Desenvolver um algoritmo que calcule a trajetória através dos protocolos IGES e STL sem que o usuário tenha de fornecer os dados, mas através do próprio desenho da peça o programa calcule e desenvolva a trajetória;
- c) Desenvolver um algoritmo que permita o cálculo de peças não geodésicas;
- d) Desenvolver um algoritmo que controle os motores e servos de uma máquina de Filament Winding;
- e) Desenvolver interface gráfica de modo que o usuário consiga visualizar o desenho da trajetória e a superfície sem a necessidade de um programa CAD;
- f) Desenvolver algoritmos que combinem duas ou mais superfícies distintas para formação de peças complexas;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A História da Microsoft Excel** (2008). Desenvolvido por Web Livre Informação em Primeiro Lugar! Disponível em: <<http://www.weblivre.net/artigo/excel/a-historia-do-microsoft-office-excel>>. Acessado em 04/03/2008.
- ALVES, A. D. (2000). **Visualização na www: Estudo e Implementação de um Sistema**. 114p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- ALMEIDA, W. M. (2003). **Conhecendo o C++ Builder** . 324 p. Florianópolis, SC: Editora Visual Books.
- ANACLETO, R. C. (1991). **Aumento da Produtividade dos Sistemas CAD através da utilização de Parametrizados**. 143p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.
- BALDIN, Y. Y. e VILLAGRA, G. A. L.(2002). **Atividades com o Cabri-Géomètre II**. São Carlos, SP: EdUFSCar.
- BÍBLIA SAGRADA** (1990). São Paulo – SP: Sociedade Bíblica Católica Internacional e Edição Paulinas.
- BRASIL INFORMÁTICA®** em Busca de um Novo Tempo (2003). Uberlândia – MG: Art Nova Editora Gráfica Ltda.
- BERTOLUCCI, E. A. (2003). **Ensinando e Aprendendo Geometria: uma experiência com o software Cabr-Geometre II na 5ª série do Ensino**

- Fundamental.** 224p. Dissertação (Mestrado em Metodologia de Ensino) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2003.
- CALLISTER JR., W.D. (1991). **Materials science and engineering: An Introduction.** New York: John Wiley & Son, Inc.
- CALLISTER JR., W.D. (2007). **Materials science and engineering: An Introduction. Department of Metallurgical Engineering** (The University of Utah) with special contributions by David G. Rethwisch (The University of Iowa). 7ª edição. New York: John Wiley & Son, Inc.
- CARVALHO, J. (1996). **Computer Integrated Desing Optimisation and Manufacturing of Filament Wound Parts.** V1, p5-198. Tese (Doutorado) – Faculty of Applied Sciences, Division PMA, K. U. Leuven.
- CHAWLA, K.K. (1998). **Composites materials: science and engineering.** 2nd ed. New York: Springer-Verlag.
- DEITEL, H. M.; DEITEL, P. J. (2003) **Java, Como Programar.** 4ª edição. Tradução de Carlos Arthur Lang Lisboa. Porto Alegre: Bookman.
- FERRANTE, M. (2005). **Conceitos e Metodologia de Seleção de Materiais.** Revista do Plástico Reforçado/Composites, Ano VI, nº42, p.24-29, mar/abr.
- FILHO, G. D. S. (2001). **Comportamento Mecânico de Poliuretano de Óleo de Mamona Reforçado por Fibra de Carbono: Contribuições para o projeto de hastes de Implante de Quadril.** 136p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- FILHO, G. D. S. (2006). **Projeto e análise estrutural de haste femoral de implante de quadril em material compósito polimérico.** 203p. Tese (Doutorado) –

Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

GAY, D.; HOA, S.V.; TSAI, S. W. (2003). **Composite Materials: Design and Applications**. Florida: CRC Press LLC.

GONÇALVES, E. L. P.; ROMANO, M. C.; PASCHOALINO, R. A. (2006). **Elaboração de teses e dissertações na EESC-USP: guia rápido**. São Carlos: EESC-USP.

HOLMANN, M. (1983). **Composite Aircraft Design**. California: Aircraft Design, Inc.

HULL D. (1981). **An introduction to composite materials**. London, Cambridge University Press

JAVA (2008). Desenvolvido por Javafree.org. Disponível em: <http://www.javafree.org/wiki/Java>>. Acessado em 28/03/2008.

LEME DA SILVA, M. C. (2002) **Contribuições do uso do ambiente CABRI_GEOMETRE para a formação inicial e contínua de professores de Matemática**. 183p. Tese (Doutorado), Pontifícia Universidade Católica, Campinas, São Paulo, 2002.

MATHEWS, F.L.; RAWLINGS, R.D. (1999). **Composite Materials: engineering and science**. London: Chapman & Hall.

MAZUMDAR, S. K. (2002). **Composites manufacturing: materials, product and process engineering**. Florida: CRC Press LLC.

Microsoft Excel (2008). Desenvolvido pela Wikipédia. Disponível em: http://pt.Wikipédia.org/wiki/Microsoft_Excel>. Acessado em 04/03/2008.

- MISKULIN, R. G. S. (1999). **Concepções teórico-metodológicas sobre a Introdução e a Utilização de Computadores no processo ensino/aprendizagem de Geometria**. 538p. Tese (Doutorado). Faculdade de Educação, UNICAMP, Campinas, 1999.
- MONTINI, D. A. (2003). **Universidade Excel**. São Paulo: Digerati Books (Série Universidade).
- PANDEY, P. C. (2004). **Composite Materials** - Web-based Course (Learning Material). Dept.of Civil Eng., IISc Bangalore.
- PESSÔA, M. e SPINOLA M. (2005). **Sistema CAD/CAE/CAM Integração da Manufatura (CIM)**. 5p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Produção.
- PLÁSTICO REFORÇADO/COMPOSITES. (2005). **Aeroespacial**. Revista do Plástico Reforçado/Composites, São Paulo, Ano VI, nº42, p.66-71, mar./abr.
- QUINN, J. A. (2002). Composites – **Design Manual**. 3ª ed. Liverpool: James Quinn Associates Ltda.
- RAMON, F. (2001). **Guia de Consulta Rápida Java 2**. São Paulo: Novatec Editora Ltda.
- SCANAVINI, M. CASTRO, J. F. e SOLIGO, M. S.(2004). **Softwarte Cabri Géomètre no trabalho com Matemática: experiências no Ensino Fundamental e Médio**. (Oficinas e Cursos) In Resumos VII Encontro Paulista de Educação Matemática. São Paulo: Sociedade Brasileira de Educação Matemática, p.93.

SCHOLLIERS, J. (1992). **Robotic Filament Winding of Asymmetric Composite Parts**. 264p. Ph.D. Dissertation, Faculty of Applied Sciences, Division PMA, K.U.Leuven, 1992

SILVA, M. M. (2004) **Protótipo de uma plataforma para software de cálculos para otimização da trajetória de fibras em revestimento de materiais compósitos**. 89p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

Solid Edge (2008). Desenvolvido por Raihsa. Disponível em: <http://www.raihsa.com.br/soluções_produto.asp?fCodProduto=25>. Acessado em 26/03/2008.

SOUZA, G. P. (2003). **Avaliação de Critérios de Falhas de Compósitos Poliméricos Reforçados Aplicados a Vigas sob Carregamento de Flexão**. 96p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

STAAB, G. H. (1999). **Laminar Composites**. Woburn: Butterworth – Heinemann.

TITA, V. (1999). **Análise Dinâmica Teórica e Experimental de Vigas Fabricadas a partir de Materiais Compósitos Poliméricos Reforçados**. 125p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999.

TUTORIAL JAVA: O QUE É JAVA?. Desenvolvido por Javafree.org. Disponível em: <http://www.javafree.org/wiki/Tutorial_Java:_O_que_é_Java?>. Acessado em 28/03/2008.

ANEXO

RECURSOS COMPUTACIONAIS E AS POTENCIALIDADES DIDÁTICO-METODOLÓGICAS DOS SOFTWARES:

Nesse tópico serão descritas os recursos computacionais e as potencialidades didático-metodológicas do software Cabri-Géomètre II para o ensino da Geometria, Microsoft Excel, CAD e Java para a implementação dos cálculos.

A.1 - Cabri-Géomètre II

Com a necessidade de resgatar o ensino da Geometria e o desenvolvimento tecnológico que perpassa o país, comentaremos e delinearemos reflexões a respeito da presença de recursos de informática nos ambientes e meios de ensino que tem chamado a atenção dos professores para assumir uma nova postura diante desse novo cenário educacional ao qual eles são submetidos e o seu auxílio em processo de resolução de problemas. Diante do descrito acima, e motivado a desenvolver um trabalho também voltado ao ensino de Geometria utilizando um software geométrico Cabri Géomètre, são feitas neste capítulo referências aos estudos de Rodrigues e Rezende (1991), Baldin e Villagra (2002), Leme da Silva (2002), Miskulin (1999), Bertolucci (2003) e Scanavini, M. Castro, J. F. e Soligo, M. S. (2004).

As escolas públicas receberam o software Cabri-Géomètre II para que os professores pudessem ter recursos tecnológicos que satisfizessem as atuais necessidades do ensino no mundo globalizado.

A primeira versão, Cabri-Géomètre I, foi desenvolvida por Yves Baulac e Jean Marie Bellemain, no Laboratório de Estruturas Discretas e de Didática do IMAG - Instituto de Informática e Matemática Aplicada de Grenoble, na Universidade Joseph Fourier de Grenoble. Vale lembrar que, em 1988, o ambiente em questão recebeu o troféu Apple como o melhor software para o ensino da Geometria.

O nome Cabri foi inspirado nas palavras da língua francesa “cahier de brouillon interactif”, que em português significa “*caderno de rascunho interativo*”. Como o próprio nome sugere, o usuário pode utilizá-lo como uma folha de caderno com

o objetivo de realizar construções geométricas, sendo possível investigar e explorar, de forma dinâmica, as diversas propriedades intrínsecas à construção de figuras geométricas. Segundo Leme da Silva (2002), a segunda versão, Cabri-Géomètre II, foi desenvolvida por Jean Marie Laborde e Franck Bellemain no IMAG em colaboração com a Texas Instruments em 1994, chegando ao Brasil em 1998.

Na Internet pode-se obter o Cabri II em uma versão Demo, onde o usuário pode utilizá-lo por um tempo limitado. O programa completo pode ser adquirido pela PUC-SP, que detém os direitos comerciais e foi quem traduziu o software para a língua portuguesa. A versão comercial de software é disponível em Inglês, Francês, Alemão, Espanhol e Italiano.

A.1.1 - Características do Cabri-Géomètre II

O software Cabri-Géomètre II vem sendo muito utilizado no processo ensino/aprendizagem de Geometria Euclidiana Plana, por possuir características, tais como as indicadas abaixo:

- o software possui ferramentas que possibilitam o estudo da Geometria Euclidiana Plana e Desenho Geométrico de maneira dinâmica;
- permite a construção de figuras geométricas planas;
- permite a movimentação de figuras inicialmente construídas para observação das propriedades geométricas existentes;
- permite a deformação de figuras geométricas, mantendo algumas características da figura de partida;
- mediante a utilização de seus menus, e com simples toques de um mouse, é possível traçar retas, círculos, triângulos, segmentos, marcar ponto médio ou traçar mediatriz de um segmento, traçar retas paralelas e perpendiculares a outras retas, determinar o centro de um círculo, traçar bissetrizes, medir segmentos e ângulos e etc;
- auxilia o aluno em sua visualização espacial, por meio de representações planas do espaço, como a perspectiva;
- permite a criação de atividades pelo professor, que tenha como objetivo a construção de conceitos, formulação de hipóteses, etc;

- oferece a facilidade ao estudante para formar ou testar convicções, formular conjecturas, etc;
- oferece a possibilidade ao professor, por meio da retirada do menu de certas ferramentas, de graduar a complexidade do programa conforme o estágio de desenvolvimento dos alunos.

Diante de tantas características vale lembrar que o principal fator a ser observado é a preparação do professor para a utilização adequada do programa e equipamento, pois sem essa preparação, um laboratório de informática numa escola perde sua eficiência e objetividade. O professor quando preparado torna-se capaz de extrair e criar novas atividades através dessa nova forma de ensino e aplicá-lo no auxílio de resolução de problemas com maior nível de complexidade.

A.1.2 - Conhecendo a tela do Cabri-Géomètre II.

Ao entrar no Cabri, o programa apresenta uma tela (Figura 84). Essa tela funciona como uma grande folha de caderno de desenho ao qual podemos desenhar e interagir com figuras geométricas.

Figura 84 – Tela do Cabri-Géomètre II.

A configuração do ambiente do Cabri é formada por duas barras de menus, uma textual (barra de ferramentas do Windows, Figura 85), e outra iconizada - barra de ferramentas do Cabri – (Figura 86).

Figura 85 – Barra de Ferramentas do Windows.

Figura 86 – Barra de Ferramentas do Cabri-Géomètre II

Na barra de menu textual cada opção possui várias opções. Consideram-se importantes neste estudo alguns comentários a respeito de algumas dessas opções, principalmente para aqueles que, ao lerem esse texto, estarão tendo um primeiro contato com o software.

No menu **Arquivo** existem as seguintes opções:

- Novo: criar uma nova página, ou seja, uma nova folha de desenho (tela);
- Salvar ou Salvar como: salva trabalho para uma posterior consulta (a extensão dos arquivos de figuras do Cabri é “fig”);
- Abrir: abre a tela de um trabalho que já foi salvo pelo Cabri;
- Fechar: encerrar a tela que está sendo trabalhada;
- Configurar Página: defini e escolhe o tamanho do papel usado para impressão, as margens, etc;

- Mostrar Página: abre-se uma janela que exibe toda a área de trabalho, com um pequeno retângulo no centro da folha que corresponde à área de trabalho que está sendo visualizada. Colocando o mouse sobre a janela, vê-se o ponteiro transformar-se em uma “mão”. Clicando sobre a janela com o botão esquerdo do mouse e mantendo o botão pressionado, vê-se a mão “agarrar” a tela. Com essa mão podemos mover a tela para onde quisermos dentro da área de trabalho, com um simples arrastar de mouse.
- Sair: fecha o Cabri.

No menu **Editar** existem as seguintes opções:

- Desfazer: funciona como uma “borracha” desfazendo a última ação realizada na tela;
- Recortar: apaga a construção ou texto selecionado e encaminha para uma área de transferência;
- Copiar: copia sem apagar a construção ou texto e encaminha para uma área de transferência;
- Colar: insere o conteúdo da área de transferência na posição desejada;
- Seleciona tudo: marca todo o trabalho;
- Limpar: apaga tudo o que foi feito até então;

No menu **Ajuda** tem a opção:

- Ajuda: é muito útil, pois ativando esta opção aparece numa área inferior da tela a função do comando que está ativo e queremos usar.

A barra de menu iconizada, ou seja, na “barra de ferramentas do Cabri” possui 11 ícones, onde cada um deles possibilita o acesso a um número variado de ferramentas como descrito nas tabelas seguintes:

Ponteiros	Pontos	Retilíneos	Curvas
Ponteiro	Ponto	Reta	Circunferência
Giro	Ponto sobre objeto	Segmento	Arco
Semelhança	Ponto de interseção	Semi-reta	Cônica
Giro e Semelhança		Vetor	
		Triângulo	
		Polígono	
		Polígono Regular	

Tabela 1 – Ícones e suas Ferramentas 1.

Construções	Transformações	Macro-Construções	Propriedades
Reta perpendicular	Simetria axial	Objetos iniciais	Colinear
Reta paralela	Simetria central	Objetos finais	Paralelo
Ponto médio	Translação	Definir macro	Perpendicular
Mediatriz	Rotação		Eqüidistante
Bissetriz	Homotetia		Pertencente
Soma de vetores	Inversão		
Compasso			
Transferência de medidas			
Lugar Geométrico			
Redefinir objeto			

Tabela 2 - Ícones e suas Ferramentas 2.

Medidas	Anotações e Animações	Aspectos
Distância e comprimento	Rótulo	Esconder/mostrar
Área	Comentário	Cor
Inclinação	Edição numérica	Preencher
Ângulo	Marcar ângulo	Espessura
Equação e coordenadas	Fixo/Livre	Pontilhado
Calculadora	Rastro On/Off	Modificar aparência
Planilha	Animação	Mostrar/Esconder eixo
	Múltiplas animações	Novos eixos
		Definir grade

Tabela 3 - Ícones e suas Ferramentas 3.

É importante ressaltar que são muitas as contribuições que esse software traz ao processo ensino-aprendizagem da geometria, isto por que, permite que sejam feitos movimentos com os objetos construídos na tela do Cabri.

Segundo Leme da Silva (2002),

“durante o processo de representação de um conceito geométrico, o aluno pode identificar as propriedades que já estão preservadas, assim como aquelas que devem ser acrescidas, o que permite que o próprio aluno possa identificar as modificações necessárias na sua construção. Este processo possibilita ampliar a autonomia do aluno se, compararmos com as construções representadas no papel e lápis”.

A diversidade de menus oferecidos pelo software permite construções geométricas complexas que, se feitas com lápis e papel, poderiam causar obstáculos para os alunos. Leme da Silva (2002) enfatiza que

“a decisão de quais recursos estarão disponíveis ao aluno para a realização da atividade é feita pelo professor, considerando os objetivos e o tipo de atividade”.

Diante das discussões realizadas até o momento e pela minha formação profissional, foi realizada uma aplicação do referido software em simulações do comportamento de entidades geométricas no revestimento de um cilindro com o propósito de desenvolver as fórmulas para o desenvolvimento de um algoritmo, planilha eletrônica e um sistema de cálculo de trajetórias circunferenciais, helicoidais e polares. Nesse sentido, no próximo tópico será discutido a história, definição, recursos, etc. de uma planilha eletrônica.

A.2 - Microsoft Excel

A.2.1 - Planilha Eletrônica e suas principais características.

As planilhas eletrônicas impulsionaram o mercado de informática aumentando as vendas de softwares e de ações desse segmento, possibilitando uma realidade que é vivida por todos nós.

Para observar essa realidade basta dirigir nossos olhares as instituições educacionais, laboratórios, empresas de diversos ramos e vislumbrar o crescente desenvolvimento desses através da exploração máxima desses softwares. Em outras palavras o computador deixou de ser um brinquedo para se tornar uma poderosa ferramenta no mundo dos negócios, sobretudo por causa de suas características.

São três as principais características que discutiremos: Cálculo automático, Armazenamento de dados e Geração automática de gráficos. Vejamos cada um deles.

A.2.2 – Cálculo Automático

O Microsoft Excel pode efetuar qualquer tipo de cálculo desde que nós coloquemos precedidos de qualquer cálculo o sinal de igualdade (=), caso esse sinal não seja colocado o cálculo não será efetuado. Após digitar uma fórmula podemos pressionar a tecla F9, para que seja exibido somente o resultado ou pressionar ENTER para efetuar o cálculo e deixar a fórmula ativa. A tabela abaixo traz alguns exemplos de operadores aritméticos.

Alguns Operadores Aritméticos

Operador	Nome da Operação	Exemplo
+	Adição	= 3 + 7
-	Subtração	= 3 - 7
*	Multiplificação	= 3 * 7
/	Divisão	= 3 / 7
^	Exponenciação	= 3 ^ 7
&	Concatenação	= 3 & 7
%	Porcentagem	= 3 % * 7

Tabela 4 – Operadores Aritméticos

Os cálculos Aritméticos podem ser executados juntamente com operadores relacionais para comparar valores obtidos em sua planilha. Veja alguns exemplos:

Operadores Relacionais

Operador	Nome da Operação	Exemplo
=	Igualdade	= 3 = 7
<	Menor	= 3 < 7
>	Maior	= 3 > 7
<=	Menor ou Igual	= 3 <= 7
>=	Maior ou Igual	= 3 >= 7
<>	Diferente	= 3 <> 7

Tabela 5 – Operadores Relacionais

Com esses operadores, tanto os aritméticos como os relacionais o Microsoft Excel é um dos programas para computador mais populares conhecidos.

A.2.3 – Armazenamento de Dados.

Essa característica é fundamental para o sucesso de qualquer empresa, pois armazenar e organizar grande quantidade de dados é fundamental para qualquer prática empresarial e essa é outra vantagem de uma planilha eletrônica que vem aumentando desde o seu advento.

Como já apresentada anteriormente a Figura 26 mostra a Tela inicial do Excel, essa tela é uma pasta que contém inicialmente três folhas de cálculo, ou seja, três planilhas. Cada planilha é composta por 256 colunas e 65.536 linhas ao multiplicarmos o número de linhas pelo número de colunas obteremos um total de 16.777.216 células em cada planilha. Sabendo que o limite máximo de planilha que o Excel suporta é de 256 em cada pasta de trabalho, embora essa quantidade dependa muito da memória disponível no sistema, teremos 4.294.967.296 em uma única pasta se o sistema permitir.

Todavia os números acima apresentados são válidos até a versão Excel 11.0 (Office 2003) a última versão o Excel 12.0 (Office 2007) esses valores mudaram nessa nova versão possui 16.384 colunas, 64 vezes o número de colunas da versão Excel 11.0, e 1.048.576 linhas, 16 vezes o número de linhas da versão Excel 11.0. Logo multiplicando o número de linhas, da versão Excel 12.0, pelo número de colunas obterá um total de 17.179.869.184 células em cada planilha.

Obviamente que será difícil de usar toda essa capacidade, mas é extremamente interessante citar e enfatizar que esse software pode ajudar os mais diferentes segmentos a armazenar e organizar uma grande quantidade de informações, por meio de seus recursos. Outra característica fundamental é a geração de gráficos será discutido a seguir.

A.2.4 - Geração de Gráficos

A geração automática de gráficos é a última característica fundamental do Microsoft Excel e talvez o ponto que diferencia o Excel das demais planilhas

eletrônicas, pois com um simples pressionar de uma tecla, F11, podemos gerar um gráfico, basta selecionar uma tabela, como o exemplo abaixo, e pressionar F11 e seu gráfico estará pronto.

<i>Contas Mensais</i>		
<i>EMPRESA (CREDORA)</i>		<i>Valor da Conta</i>
<i>ELEKTRO</i>	R\$	152,35
<i>TELEFÔNICA</i>	R\$	86,37
<i>PREFEITURA</i> IPTU	R\$	78,45
ÁGUA	R\$	8,38
<i>DEPERON</i>	R\$	425,57
<i>SUPERMERCADO</i>		
<i>AUTOPOSTO BAMBUS</i>	R\$	70,05
<i>FUNERÁRIA SANTA CRUZ</i>	R\$	36,00
<i>LOJA DO ARISTEU</i>	R\$	57,50
<i>ÓTICA RUBI</i>	R\$	70,00
<i>POLLINI VÍDEO</i>	R\$	7,01
<i>ZELADOR</i>	R\$	25,00
<i>GUARDA PATRIMONIAL</i>	R\$	10,00
<i>TOTAL</i>	R\$	1.026,68

Tabela 6 – Tabela de Contas Mensais

Figura 87 – Gráfico Gerado pelo Microsoft Excel

A.2.5 – O Divisor de Águas Chamado Microsoft Excel

Inicialmente a Microsoft® comercializou uma planilha chamada Multiplan que não fez muito sucesso no ambiente DOS, frente a poderosa Lótus 1-2-3 a planilha mais popular para esse sistema operacional. Isso levou ao desenvolvimento do Excel, que foi desenvolvido para fazer tudo o que o 1-2-3 fazia e com o objetivo de ser

melhor, essa é a tarefa a ser desenvolvida pelo Excel, que inicialmente foi desenvolvido, em 1985, para Macintosh e somente em novembro de 1987 foi lançada para Windows numerado com 2.0 para se alinhar com o Macintosh. A Lótus demorou em desenvolver o 1-2-3 para o ambiente Windows, cedendo por volta de 1988 a posição de planilha eletrônica mais vendida à Microsoft Excel e desde então é a líder em desenvolvimento de softwares para PC. A Microsoft® consolidou essa vantagem com o lançamento periódico de novas versões a cada dois anos. A versão atual da plataforma Windows é o Excel 12.0, também chamado de Microsoft Excel 2007. A versão atual para a plataforma Macintosh é o Microsoft Excel 2004.

Um fato curioso é que o Excel tornou-se alvo de um processo judicial de marca registrada por outra empresa que já comercializava um produto registrado chamado “Excel” na Indústria Financeira. Após o fim desse processo judicial a Microsoft® foi solicitada a se referir ao seu produto como “Microsoft Excel” para todos os fins formais e documentais legais. Destacamos ainda que com o passar dos tempos essa prática foi caindo em desuso e a Microsoft® resolveu a questão comprando a marca registrada reservada ao outro programa. Ela também incentivou o uso das XL para designar o Excel, mas essa prática não obteve sucesso, embora as letras serem utilizadas até hoje no ícone do programa para Windows como mostra a Figura 88 abaixo:

Figura 88 – Ícone do Microsoft Excel 2003

A extensão dos arquivos também utiliza as letras XL, até a versão 11.0 (Excel 2003) a extensão é .xls e sendo .xlsx a partir da versão 12.0 (Excel 2007), acompanhando a mudança nos formatos de arquivos dos aplicativos do Microsoft Office.

O Excel foi o programado do seu tipo a permitir ao usuário determinar a aparência de suas planilhas, podendo alterar fontes, atributos de caractere e aparência de células. Também introduziu recomputação inteligente de células, na qual apenas as células dependentes da célula a ser modificada são atualizadas. O grande diferencial do Excel em relação aos demais programas de sua categoria, como já mencionado, é a flexibilidade apresentada para formatação gráfica dos dados contidos em cada planilha. A partir de 1993, o Excel incluiu o Visual Basic for Applications (VBA), uma linguagem de programação com base no Visual Basic que soma ao Excel a capacidade de automatizar tarefas e prover funções pelo usuário através de macros.

Abaixo segue as tabelas referentes às versões do Excel para Windows e Macintosh.

Versões Microsoft Windows

Ano	Versão
1987	Excel 2.0 para Windows
1990	Excel 3.0
1992	Excel 4.0
1993	Excel 5.0 ³
1995	Excel 7.0 (Office 95)
1997	Excel 8.0 (Office 97)
1999	Excel 9.0 (Office 2000)
2001	Excel 10.0 (Office NT)
2003	Excel 11.0 (Office 2003)
2007	Excel 12.0 (Office 2007)

Tabela 7 – Versão do Microsoft Excel para o Ambiente Windows

Versões Apple Macintosh

Ano	Versão
1985	Excel 1.0
1988	Excel 1.5
1989	Excel 2.2
1990	Excel 3.0
1992	Excel 4.0
1993	Excel 5.0
1998	Excel 8.0 (Office 98)
2000	Excel 9.0 (Office 2001)

³ Office 4.2 e 4.3, também uma versão de 32 bits para o Windows NT somente.

2003

Excel 11.0 (Office 2003)

2007

Excel 12.0 (Office 2007)

Tabela 8 – Versão do Microsoft Excel para o Ambiente Macintosh**A.3 – CAD**

Os Sistemas CAD - *Computer-Aided Design* (Projeto Auxiliado por Computador) são projetados para auxiliar na criação, modificação, documentação ou recuperação, análise ou otimização do desenvolvimento de um projeto (Pessoas e Spinola, 2005).

Segundo Llewelyn (1989; in Anacleto; 1991) para se fazer uma revisão histórica dos sistemas CAD/CAM, devem ser considerados três períodos a partir de 1958.

O primeiro período foi denominado pelas pesquisas militares, sendo que o primeiro fato importante nas aplicações civis foi o desenvolvimento do sistema chamado SKETCHPAD. Esse sistema gráfico interativo foi demonstrado na Massachussets Institute of Technology (M.I.T.) em 1963.

O segundo período foi caracterizado por um crescimento exponencial dos sistemas CAD. Uma nova onda de firmas que desenvolvem softwares independentes, usando microcomputadores com custo-performance melhores, desenvolveram sistemas gráficos interativos que levaram as “workstation” gráficas. Esses sistemas proveram as configurações multiusuários em redes locais, utilizando bases de dados distribuídas. Em termos de inovação de software, foram verificados avanços nos sistemas operacionais, nas linguagens e nas ferramentas gráficas, com interfaces para “linkagem” de pacotes aplicativos e de análises. Também foram adotados os sistemas modulares. Surgiram sistemas integrados projeto – manufatura, para a indústria eletrônica, microeletrônica, e manufatura com máquinas CN.

No terceiro período, houve uma maior ênfase na manufatura. Intensificou-se o uso de robôs em células de manufatura e montagem, e a integração em todos os aspectos da indústria.

Os primeiros sistemas CAD foram motivados pela necessidade de interagir com o computador de uma maneira mais eficiente. Ouviu-se falar muito de

interface homem-máquina e da necessidade de se desenvolver idéias criativas usando recursos gráficos para comunicação visual. Um grande esforço foi feito para desenvolver a visualização e o modelamento 3D, pois transformaram idéias em coisas concretas significativa descrever e definir objetos 3D (Anacleto, 1991).

O desenvolvimento de sistemas eficientes, mais econômicos de melhor custo-benefício e grandes reduções no custo do hardware viabilizou comercialmente os sistemas CAD, o que possibilitou o desenvolvimento de uma indústria de serviços de software e suporte. O desenvolvimento dos sistemas CAD deu enfoque a duas tendências. Uma delas foi a intenção de desenvolver uma genuína ferramenta do tipo “*computer-aided*” para o engenheiro de projeto baseada em poderosas “workstation” e tecnologia baseada em conhecimento. A outra foi baseada no desenvolvimento de modelamentos 3D, para auxiliar o projeto conceitual, através da visualização em tempo real e simulação dinâmica.

Atualmente uma Tendência dos sistemas CAD modernos é a inclusão de características de topologia, além das de geometria. Entende-se por geometria a posição, orientação, e o tamanho de cada elemento geométrico no projeto de um objeto. Topologia é a conectividade entre esses elementos geométricos (Pessôa e Spinola, 2005). Os sistemas orientados apenas a geometria (sistemas CAD clássicos) armazenam apenas a geometria final. Os sistemas paramétricos trabalham com topologia, armazenando os comandos usados pelo usuário para definir a geometria. Por exemplo quando um usuário especifica que um arco pode ser criado com um dado raio, tangente ao final de um segmento previamente definido e com um dado ângulo incluso, pode ser armazenada seqüência de operações executadas para a construção da geometria. Se o segmento for modificado o sistema paramétrico pode recuperar a construção do arco (apesar de ter sido alterada a geometria, que fará com que o ângulo interno seja diferente). Os sistemas variacionais são ainda mais avançados, pois armazenam a topologia tanto quanto a geometria. Por exemplo, um usuário entra com um arco, especifica que possui um dado raio, tangente ao final de um dado ângulo. O sistema variacional guarda não somente a localização dos pontos e do arco, mas também as regras para o arco. Se, mais tarde, o usuário decide trocar a regra do ângulo interno por uma regra de tangencia apropriada. O sistema recupera as outras regras sobre o arco e automaticamente recalcula a geometria (Pessôa e Spinola, 2005).

A dimensionalidade se refere ao tipo de geometria processada e armazenada num sistema CAD. Com relação a esta característica os sistemas CAD podem ter as seguintes representações:

- *Sistemas de duas dimensões (2D)*, equivale ao desenho em papel. Cada ponto é representado por dois números (por exemplo a distância horizontal em relação à borda esquerda do papel e a distância vertical da borda inferior do papel). Há representação também para segmento, círculo, arcos e outras curvas planares. Os primeiros sistemas CAD basearam-se em representações 2D. Ainda Hoje, apesar de desenvolvimento de sistemas 3D, a representação em 2D é melhor para realizar as atividades de demonstração e detalhamento final de um projeto. Há limitações, sobretudo, na visualização dos objetos.
- *Sistemas de duas e meia dimensão (2½D)*, que acrescentam às representações 2D, a representação de objetos tridimensionais tais como uma seção de corte arbitrária. Podem ser calculadas propriedades de objetos sólidos, tais como o volume.
- *Sistemas de três dimensões (3D), wireframe*, que utilizam segmentos de reta, círculos, arcos e outras curvas em três dimensões e que trabalham com múltiplas visões (de qualquer direção arbitrária) e perspectivas. A representação de um paralelepípedo, por exemplo, é feita através de suas 12 bordas.
- *Sistemas de três dimensões (3D), superfícies*, onde cada sólido é representado por seus limites, que consistem de superfícies planares, cilíndricas, cônicas e esféricas. É a representação mais utilizada no projeto de automóveis.

- **Sistemas de três dimensões (3D), sólidos**, que trabalha de forma similar com a utilização de blocos para construir um sistema sólido real. Possuem um conjunto de objetivos primitivos e podem mover (translação e rotação) estes objetos, além de combiná-los usando um conjunto de operações básicas (união, intersecção, diferença). Estes sistemas permitem a melhor visualização.

Diante do descrito anteriormente o sistema CAD escolhido no auxílio do desenvolvimento desse trabalho é o Solid Edge (Figura 89).

Figura 89 – Tela de Trabalho do Solid Edge®

O Solid Edge é um software de CAD 3D que permite as empresas projetarem intuitivamente reduzindo custos e aumentando a qualidade. Seus avançados recursos de modelagem, gerenciamento de projeto e fluxo de trabalho baseados em processos, oferecem vantagem competitiva ímpar para a conclusão de projetos com qualquer nível de complexidade (Raihsa, 2008).

Possui recursos para modelamentos de peças, criação de pequenas e grandes montagens, simulação de movimentos e geração automática do detalhamento 2D, bem como ambientes dirigidos aos projetos de chapas, tubulações, peças plásticas, moldes de injeção e solda, além de uma grande facilidade na migração de dados ligados 2D para 3D com a adição sem paralelos de inteligência às informações recebidas. O

aumento constante na complexidade desse produto motivou os projetistas em todos os setores da indústria de manufatura a adaptar-se a essa tecnologia 3D.

A.4 - Java

Os programadores escrevem instruções para gerar um programa de computador através de várias linguagens de programação, dentre as centenas de linguagens algumas podem ser diretamente interpretadas pelo computador e outras precisam de um intermediário para traduzi-lo. As linguagens de programação podem ser divididas em três tipos: Linguagens de Máquina; Linguagens Assembler e Linguagens de alto nível (Deitel, 2003).

As linguagens de máquinas são incomodas para os programadores, pois é uma “linguagem natural” de um computador específico que é definida pelo projeto do hardware. Essas linguagens consistem geralmente em seqüências de números (em última instância reduzido a 1s e 0s) que instrui o computador que executem tarefas uma de cada vez. A medida que os computadores foram se tornando mais acessíveis e as linguagens de programação foram sofrendo transformações para se tornarem menos tediosa, ao invés de seqüência de números começou a se utilizar abreviações próximas ao inglês para se escrever instruções que foi a base das linguagens assembler. Programas-Montadores, chamados de montadores, foram criados para traduzir a linguagem assembler em linguagem de máquina à velocidade de computador. Embora tal código seja mais claro aos programadores e que tenha, graças a ele, aumentado o uso de computadores a programação na linguagem assembler ainda exigia muitas instruções mesmo para executar a mais simples das tarefas. Para otimizar a velocidade de criação de um programa foi desenvolvida a linguagem de alto nível onde as instruções poderiam ser escritas para realizar tarefas substanciais. Os programas tradutores de linguagem de alto nível em linguagem de máquina são chamados de compiladores. Essa linguagem permite aos programadores que escrevam instruções que parecem o inglês ou o português, como o programador se sentir mais confortável. Vale destacar que a linguagem de alto nível é mais desejável do ponto de vista do programador do que a linguagem de máquina e da linguagem assembler. C, C++ e Java são linguagens de alto

nível mais comumente utilizadas e poderosas. Nesse trabalho será utilizada a linguagem de programação Java, mas faremos um breve relato sobre o C++.

A.4.1 - C++: A história começa

A linguagem de programação C++ surgiu a partir da linguagem C que por sua vez se desenvolveu a partir de duas outras linguagens anteriores BCPL e B.BCPL que foi desenvolvida em 1967 por Martin Richards como uma linguagem para escrever softwares de sistemas operacionais e compiladores (Deitel, 2003). A linguagem B, desenvolvida por Ken Thompson, modelou muitos de seus recursos a partir da linguagem BCPL e B.BCPL que foi utilizada para desenvolver as versões primárias do sistema UNIX nos “Bell Laboratories” no ano de 1970. A linguagem C foi criada a partir da linguagem B nos “Bell Laboratories” no ano de 1972 por Dennis Ritchie. C tornou-se muito conhecido como uma linguagem de desenvolvimento do sistema operacional UNIX. Hoje, praticamente todo sistema operacional importante é escrito em C ou C++.

C++ foi desenvolvido, a partir do C, por Bjarne Stroustrup no início da década de 1980 na “Bell Laboratories” que é o aprimoramento de muitos recursos de C e fornece recursos para a programação orientada a objetos (POO). Com a revolução dos softwares foi necessário criar métodos de desenvolvimentos mais rápidos e poderosos de software. Os objetos foram essencialmente a solução encontrada que são softwares reutilizáveis que modelam itens do mundo real. POO são mais fáceis de entender, corrigir e modificar do que a técnica de programação popular, como a programação estruturada. No próximo tópico iremos descrever a contribuição de C e C++ para o desenvolvimento da linguagem Java.

A.4.2 - Java: A história

No início da década de 1990 a Sun Microsystems inicia um projeto chamado *Green*, o berço do Java uma linguagem desenvolvida por Patrick Naughton, Mike Sheridan e James Gosling que tinham o objetivo de criar um produto voltado para equipamentos e eletrodomésticos comumente usados no cotidiano por pessoas comuns

(Alves, 2000). Para provar o potencial desse projeto em 1992, surgiu o protótipo *StarSeven*, um controle remoto que tinha a habilidade de controlar diversos dispositivos e aplicações com um pacote, hoje popularmente conhecido no mundo Java como *Duke*, que auxiliava os usuários na utilização de equipamentos. James Gosling especificou uma nova linguagem de programação, baseada em C e C++, e decidiu chamá-lo de “Oak” (Carvalho) em homenagem a uma árvore que dava para a janela de seu escritório na Sun (Deitel, 2003). Descobriu-se mais tarde que já havia uma linguagem de computador chamada de “Oak”. Contudo o projeto *Green* com protótipo *StarSeven* precisava encontrar mercado para dispositivos eletrônicos inteligentes destinados ao consumidor final, mas o mesmo não estava se desenvolvendo tão rápido quanto a Sun havia previsto. A idéia certa, na época errada foi salva pelo crescimento exponencial da Internet em 1993 e rapidamente uma grande rede interativa estava se estabelecendo. Um acontecimento de sorte que a equipe da Sun soube aproveitar o produto que estava desenvolvendo para criar paginas da web com o chamado conteúdo dinâmico. Isso deu nova vida ao projeto. O nome Java se deu quando uma equipe da Sun visitou uma cafeteria local, o nome Java (cidade de origem de um tipo de café importado) foi sugerido e pegou (Deitel, 2003).

Em maio de 1995 a Sun anunciou Java formalmente que gerou um interesse imediato na comunidade comercial por causa do crescente interesse pela Internet na criação de paginas com conteúdo interativo e dinâmico, além de criar aplicativos corporativos, fornecer aplicativos destinados ao consumidor final e para muitas outras finalidades.

A.4.3 - Principais características da linguagem Java.

Segundo Alves (2000), Java é uma linguagem multiplataforma, o que é possível devido a estrutura interpretada que a caracteriza e o processo de compilação do código fonte. Os programas Java passam por cinco fases para serem executados. São as seguintes: Edição, Compilação, Carga, Verificação e Execução, ilustrado na Figura 90 abaixo:

Figura 90 – Ambiente Java (Deitel, 2003)

A fase 1 consiste em editar um arquivo que é desenvolvido com um programa editor e salva. Ambientes de Desenvolvimento Integrado (*IDEs – Integrated Development Environments*) Java como *Forté for Java Community Edition*, *Netbeans*, o *JBuilder* da *Borland*, o *Visual Cafe* da *Symantec* e *Visual Age* da *IBM* tem editores embutidos que são transparentemente integrados ao ambiente de programação. O Ambiente de Desenvolvimento Integrado que foi utilizado nesse trabalho é o *Netbeans 6.0.1* e sua tela inicial esta demonstrada na Figura 91.

Figura 91 – Tela Inicial do Netbeans 6.0.1

Na fase 2 é compilado o programa. O compilador cria bytecodes e os armazena em discos. Os bytecodes são uma linguagem intermediária entendida pelo interpretador Java. Se o programa compilar corretamente, o compilador produz um arquivo .class que contém os bytecodes que são interpretados durante a execução. A fase 3 é chamada de carga o programa deve ser primeiro colocado na memória para poder ser executado. O carregador de classe coloca os bytecodes na memória, ou seja, pega o arquivo .class que contém os bytecodes e o transfere para a memória. Na fase 4 os bytecodes são verificados. O verificador de bytecodes confirma que todos os bytecodes são válidos e não violam restrições de segurança do Java. Por fim, na fase 5, o interpretador lê os bytecodes, um por vez, e os traduz para uma linguagem que o compilador pode entender, possivelmente armazenando valores dos dados enquanto executa o programa. O interpretador Java ou *runtime* Java é conhecido como JVM (*Java Virtual Machine*), uma máquina imaginária que é implementada pela emulação - em software - de máquina real (Ramon, 2001). Outras características da linguagem são (Alves, 2000):

- é dotada de recursos *multithreaded*, permitindo a implementação de aplicações multitarefas;
- possui um vasto conjunto de componentes para implementação de Interface Gráfica com o Usuário (*GUIs – Graphic User’s Interface*), por meio das classes da biblioteca AWT (*Abstract Window Toolkit*);
- devido a sua natureza gráfica, inclui recursos de manipulação de elementos gráficos independente do dispositivo gráfico e da plataforma operacional;
- permite a manipulação de recursos de texto e características das fontes de texto;
- permite o controle dos eventos de mouse e teclados sobre os objetos “encapsulados” da interface gráfica bem como sobre os eventos definidos pelo programador;

- possui recursos para o processamento e análise de imagem na maioria dos formatos gráficos padrões, como por exemplo, arquivos GIF e JPEG;
- permite a inclusão de bibliotecas de protótipos específicos pela definição de interfase, denominadas *packages* (como exemplo, pode-se citar bibliotecas para computação gráfica, hipermídia, programação concorrente, banco de dados e outras);
- a API (*Application Program Interface*) Java 3D é uma interfase de programação voltada para a criação de aplicações gráficas e *applets*⁴ que manipulam componentes tridimensionais possuindo mecanismos de alto nível para criar e manipular geometrias 3D (Sow 97: In Alves, 2000).

Essas características fazem parte de todas as versões Java que se tornou uma das linguagens mais usadas e serve para qualquer tipo de aplicação entre elas podemos citar: Web, Desktop, Servidores, Mainframes, Jogos, Aplicações Móveis, Chips de Identificação, etc. Esses são alguns dos motivos que a linguagem Java foi escolhida para esse trabalho.

⁴ Uma applet é definida como um “pequeno programa” Java que necessita de uma página da Web e um browser (tal como Netscape Navigator, Microsoft Internet Explorer ou outros) para ser executados.(fonte: Deitel, 2003).